

Markgeokemiska kartan

Morängeokemi i södra Norrbotten *Till geochemistry in southern Norrbotten*

Anna Ladenberger, Mikael Carlsson, Madelen Andersson,
Stefan Bergman, Jo Uhlbäck, Sten-Åke Ohlsson, Colby Smith,
George Morris & Nikolaos Arvanitidis



Markgeokemiska kartan
Morängeokemi i södra Norrbotten
Till geochemistry in southern Norrbotten

Anna Ladenberger, Mikael Carlsson, Madelen Andersson,
Stefan Bergman, Jo Uhlbäck, Sten-Åke Ohlsson, Colby Smith,
George Morris & Nikolaos Arvanitidis

ISSN 1652-8336

ISBN 978-91-7403-378-6

Omslagsbild: Postglacialt landskap i Överkalix med utsikt mot norr. Foto: Anna Ladenberger.
Cover: Post-glacial landscape with a view to the north. Photo: Anna Ladenberger.

Layout: Ulrika Hurtig & Johan Sporrang, SGU

INNEHÅLL

Geokemisk kartering vid SGU	5
Användning av de markgeokemiska kartorna	5
Provtypen morän	6
Metodik	7
Provtagning	7
Provberedning	8
Randomisering	8
Analysering	9
Kvalitetskontroll	9
Databehandling	11
Percentilindelning	11
Kartor	11
Elementens förekomst och rörlighet	11
Geologiska förutsättningar	11
Markprocesser	14
Lakbarhet och associationer	15
De kemiska elementen i näringskedjan	16
Miljögeokemi – gränsvärden för känslig markanvändning	16
Områdets geologi	17
Berggrunden	17
Mineraliseringar	19
Kvartärgeologi	21
Geokemi i området – elementens förekomst och associationer i morän	23
Summary	25
Referenser	27
Bilaga 1. Regionala markgeokemiska kartor	
<i>Regional geochemical maps</i>	30
Bilaga 2. Översiktlig elementbeskrivning	
<i>General description of elements</i>	59

GEOKEMISK KARTERING VID SGU

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

2014 publicerades Geokemisk Atlas över Sverige (Andersson m.fl. 2014). Den visar geokemiska mönster i hela landet och bakgrundshalter med användning av morän (2 578 prov), betesmark (179 prov) och bäckvattenväxter (38 066 prov) i översiktlig skala (med provtäthet av 1 moränprov per 150 km²).

Den markgeokemiska karteringen i södra Norrbotten (ca 10 000 km²) utfördes under två fältsäsonger, med provtagning 2009 och 2011 (fig. 1).

Rapporten innehåller utdrag ur den geokemiska databasen. Den markgeokemiska informationen har för detta ändamål tagits fram för att visa enskilda grundämnens regionala frekvens och distribution. De flesta analyserade element som uppfyller stipulerade krav på analyskvalitet redovisas.

Föreliggande rapport utgör en del i en presentation av markens naturliga innehåll av grundämnena i Sverige, samt surhetsgraden mätt som pH. Kartor över de kemiska parametrarna baseras på moränprov normalt tagna på ca 0,6–1,2 m djup och analyserade på finfraktionen (<0,063 mm) med ICP MS efter salpetersyralakning och kungsvattenlakning.

Rapporten är en fortsättning på den serie rapporter om markgeokemi som tidigare publicerats i SGUs serier Rapporter och meddelanden, K samt Gk (se t.ex. Andersson & Lax 1996, Andersson m.fl. 1997, Andersson & Lax 2000, Andersson m.fl. 2007, Ladenberger m.fl. 2012).

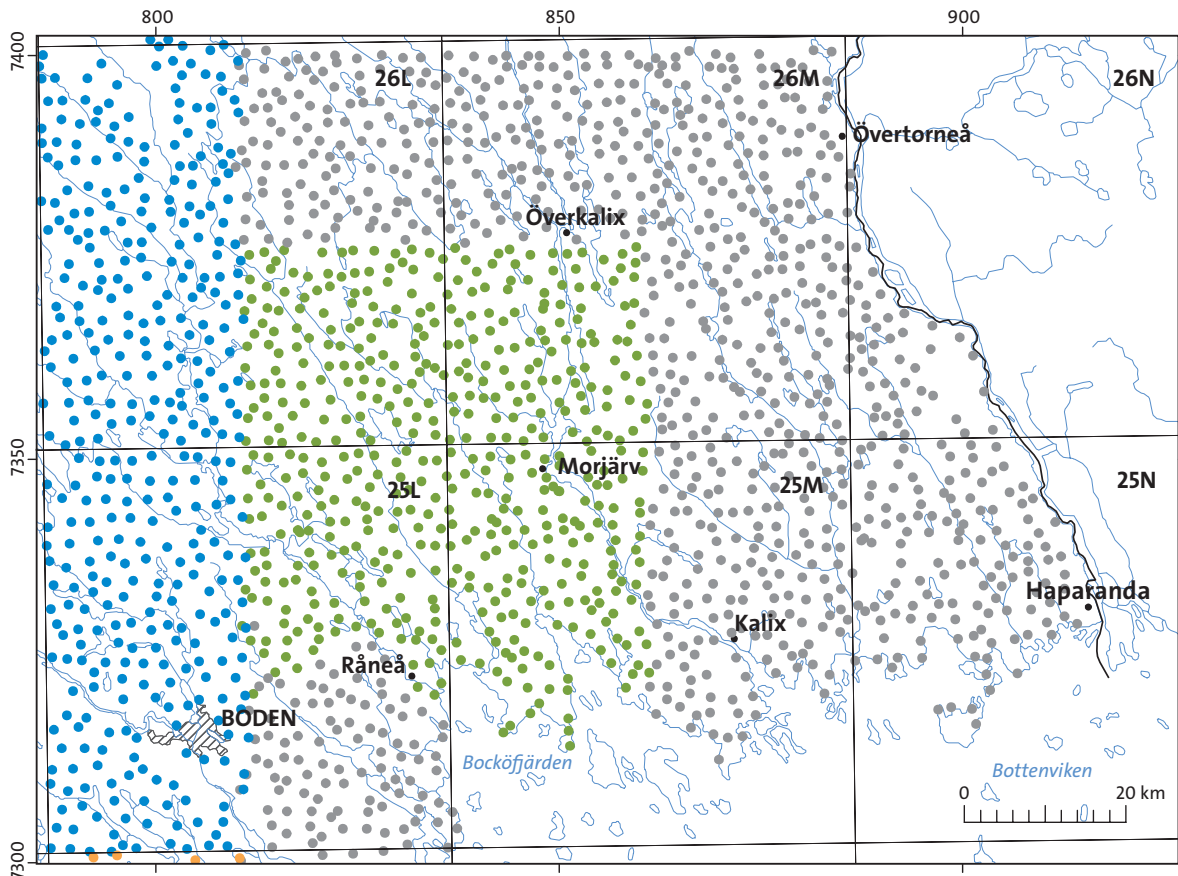
Rapporten har framställts av Anna Ladenberger (tolkning, sammanställning), Colby Smith (kvartärgeologi), Jo Uhlbäck (arbetskartor), Stefan Bergman (berggrund), Nikolaos Arvanitidis (mineraliseringar) samt George Morris (kvalitetskontroll av geokemiska data) och Madelen Andersson (granskning). Kartorna har framställts av Mikael Carlsson. Ansvarig för pH-mätningar har varit Birgitta Löwenhielm och Alicja Kawalec-Majka, för ICP-analyser Sten-Åke Ohlsson.

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 malmetning, försurning, recipientskydd och förorenad mark kan kartorna och informationen anpassas till olika relevanta verksamhetsområden.

Kartorna, som visar den naturliga förekomsten av grundämnena 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 element som uppmäts. I Sverige anses ett undantag från detta vara områden runt Falun, som förorenats av gruvdriften vid Falu koppargruva till den grad att t.o.m. 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 t.ex. till smycken. Under hela den förindustriella epoken har keramik, glas, vapen, färgämnen och läkemedel tillverkats. Oavsiktlig och omfattande spridning av metaller har gjort att zink, tenn, bly, kobolt, kadmium, silver, arsenik, antimon m.fl. under mycket lång tid har cirkulerat i miljön. Det är främst i humus och ytlig jord man ibland kan spåra antropogent metalltillskott. I djupare jordlager kan man generellt anta att mängderna av dessa metaller är så låga att de inte kan särskiljas från naturliga halter. Ett undantag är antropogent tillfört svavel som på grund av sin höga mobilitet kan nå större markdjup.



- Provtagningsår
- 2000
 - 2009
 - 2011
 - 1999

Figur 1. Provtagningslokaler med morän (n = 1360). Kartblad enligt koordinatsystem RT90. Till sampling sites (n = 1360). Map sheet according to coordinate system RT90.

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 vitt-ringsbenägna mineral frigör tillräckligt med ämnen som växter och djur tillgodogör sig (gäller såväl huvudkomponenter som spårämnen och metaller). Den geokemiska statusen är därför god. Inom andra regioner kan i stället nyttiga ämnen förekomma i låga halter eller med låg lakbarhet, samtidigt som pH kan vara lågt. Den geokemiska statusen är därmed betydligt sämre.

Många av de nyttiga spårämnena kan samtidigt vara skadliga för hälsan om de förekommer med höga halter eller i olika associationer. Höga elementhalter kan i vissa fall indikera mineralisering, vilket är av intresse vid malmprospektering, men kan också, speciellt i regioner med lågt pH, betyda att skadliga metaller riskerar att läcka ut till grundvattnet. Låga halter av ett essentiellt spårämne i marken indikerar en risk för att en bristsituation på det nyttiga ämnet kan uppstå eller redan råder.

PROVTYPEN MORÄN

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

Tre huvudtyper av morän förekommer: basalt deponerad morän, utsmältningsmorän samt flyt-morän. 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 t.ex. runt stenar. Moräntypen kan därför vara ganska inhomogen. Den kan dessutom ha sitt ursprung långt ifrån depositionsplatsen och därför ge en sämre spegling av den lokala berggrunden.

Flytmorän avsätts genom att vattenmättad morän skredar ut från t.ex. ett isberg. Den kan i detta sammanhang (geokemiska tolkningsmöjligheter) sägas ha samma egenskaper som 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 modern materialet som de moränbildande processerna. För mer ingående diskussioner rörande olika moräntyper, strukturer och texturer se t.ex. Krüger (1979).

Transportlängden, som är en viktig parameter vid framför allt morängeokemisk malmprospektering, kan variera kraftigt för moräner. Här är det viktigt att skilja på transportlängder för olika kornstorleksfraktioner i moränerna. Allteftersom eroderade bergartsfragment nöts ner minskar t.ex. förekomsten av en bergart i blockfraktionen medan representationen i finare fraktioner ökar. Olika bergarter har också olika förmåga att motstå vittring och nötning. Sedimentära bergarter, t.ex. skifferar, nöts snabbt ner. 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, variationer i transportlängder etc. finns det få alternativ till denna provtyp om avsikten är att få en bild av berggrundens generella sammansättning. Morän ses som kompositprov av moderbergarterna.

METODIK

Provtagning

För karteringsändamål insamlas moränproven med kriterierna att de ska vara representativa för regionen och om möjligt vara av normal typ (s.k. sandig morän). Provtagningen sker förutsättningslöst, dvs. man tar ingen hänsyn till förekomst av malmer, mineraliseringar eller bergartstyper. 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, växt-rötter, djupt gående markprocesser, underliggande sediment etc. Om B-horisonten eller svallkappan är för mäktig för att grävas igenom, där man påträffar håll nära markytan eller där materialet är för



Figur 2. Typisk provlokal i podsol från Norrbotten. Provdjup: ca 0,8 m.

Typical sampling site in podzol from Norrbotten. Sampling depth: ca 0.8 m.

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.

Provberedning

Proven vakuumtorkas och siktas på nylonsikt med maskvidder på 2 mm och 0,063 mm. Anledningen 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 % kontrollprov utgör populationen för analys. Randomiseringen görs för att sprida den oundvikligt systematiska variation som introduceras under provberedning och analysering över hela dataset.

Analysering

1360 prover analyserades för 56 element och pH på SGUs geokemiska laboratorium i Uppsala. Analyserna görs av morän med kornstorlek <0,063 mm. Efter partiell lakning av 2 g prov med salpetersyra (7M HNO₃) och av 5 g prov med kungsvatten (HCl+ HNO₃, 3:1) analyseras den lösta delen av provet med plasmateknik (ICP-MS). Som kontroll används replikatprov (dubbelprov taget i fält) och internt kontrollprov.

SGUs metod är något modifierad från Svensk Standard metod SS 02 83 11 och anpassad till de stora mängder prov som insamlas för regional geokemisk kartering. SGUs laboratorium är ackrediterat av SWEDAC (Styrelse för ackreditering och teknisk kontroll) för att utföra analyser med salpetersyralakning för 12 element: As, Ba, Pb, Fe, Cd, Co, Cu, Cr, Mn, Ni, V och Zn. Av 56 element (fig. 3), har 52 grundämnen erhållits med salpetersyralakning (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) och fyra grundämnen med kungsvatten lakning (Au, Sb, Ta och Te).

Jordarternas surhetsgrad anges efter en pH-bestämning av provens finfraktion (<0,063 mm) efter uppslamning av 4 g prov i 20 ml avjoniserat vatten. Ytterligare en pH-mätning görs när man har tillsatt utspädd svavelsyra (12,5 mM H₂SO₄). Med de båda mätningarna kan provets förmåga att motstå surt markvatten beräknas, dvs. dess buffertkapacitet eller försurningsresistens. Man mäter de vätejoner som har adsorberats vid markpartiklarna i det uppslammade provet. Fler vätejoner medför alltså lägre pH-värde. Efter svavelsyratillsats sjunker pH i genomsnitt -0,4 enheter. Eftersom pH-skalan är logaritmisk, innebär varje sänkning med en pH-enhet att halten vätejoner i lösningen ökar tiofalt.

Kvalitetskontroll

Vid all hantering av analyser är det nödvändigt med en omfattande kvalitetskontroll. Mindre haltvariationer kan uppstå och uppstår i princip i varje enskilt skede vid en geokemisk kartering. Genom att undersöka dubbelprov (replik) tagna i fält undersöks den s.k. totalvariansen. I denna ingår skillnader som uppkommer på grund av småskalig inhomogenitet i moränens sammansättning, som normalt är relativt liten (undantaget guld som uppvisar en s.k. kluster- eller nuggeteffekt), samt varianser uppkomna vid torkning, siktning, uppvägning, 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 % av alla analyser någon form av kontrollprov (t.ex. 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 t.ex. med nivåskillnader i analysresultaten för en del element. 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 elementvis vid kartframställning. Med nivellering av analysvärden kan man skapa en homogen bild av elementens distribution.

1	H Hydrogen Väte	2	He Helium
3	Li Lithium	4	Be Beryllium
5	B Bor	6	C Köhl Carbon
7	N Kväve Nitrogen	8	O Syre Oxygen
9	F Fluor Fluorine	10	Ne Neon
11	Na Natrium	12	Mg Magnesium
13	Al Aluminium	14	Si Kisel Silicon
15	P Fosfor Phosphorus	16	S Svavel Sulphur
17	Cl Klor Chlorine	18	Ar Argon
19	K Kalium	20	Ca Kalcium
21	Sc Scandium	22	Ti Titan
23	V Vanadin	24	Cr Krom
25	Mn Mangan	26	Fe Järn
27	Co Kobolt	28	Ni Nickel
29	Cu Koppar	30	Zn Zink
31	Ga Gallium	32	Ge Germanium
33	As Arsenik	34	Se Selen
35	Br Brom	36	Kr Krypton
37	Rb Rubidium	38	Sr Strontium
39	Y Yttrium	40	Zr Zirkonium
41	Nb Niob	42	Mo Molybden
43	Tc Technetium	44	Ru Rutenium
45	Rh Rhodium	46	Pd Palladium
47	Ag Silver	48	Cd Kadmium
49	In Indium	50	Sn Tenn
51	Sb Antimon	52	Te Tellur
53	I Jod	54	Xe Xenon
55	Cs Cesium	56	Ba Barium
57-71		72	Hf Hafnium
73	Ta Tantal	74	W Wolfram
75	Re Rhenium	76	Os Osmium
77	Ir Iridium	78	Pt Platina
79	Au Guld	80	Hg Kvicksilver
81	Tl Tallium	82	Pb Bly
83	Bi Bismut	84	Po Polonium
85	At Astat	86	Rn Radon
87	Fr Francium	88	Ra Radium
89-103		104	Rf Rutherfordium
105		106	Sg Seaborgium
107		108	Hs Hassium
109	Mt Meitnerium	110	Ds Darmstadtium
111	Rg Roentgenium	112	Cn Copernicium
113	Uut Ununtrium	114	Fl Flerovium
115	Uup Ununpentium	116	Lv Livermorium
117	Uus Ununseptium	118	Uuo Ununoctium

57	La Lantan	58	Ce Cerium	59	Pr Praseodym	60	Nd Neodym	61	Pm Prometium	62	Sm Samarium	63	Eu Europium	64	Gd Gadolinium	65	Tb Terbium	66	Dy Dysprosium	67	Ho Holmium	68	Er Erbium	69	Tm Thulium	70	Yb Ytterbium	71	Lu Lutetium
89	Ac Aktinium	90	Th Torium	91	Pa Protaktinium	92	U Uran	93	Np Neptunium	94	Pu Plutonium	95	Am Americium	96	Cm Curium	97	Bk Berkelium	98	Cf Californium	99	Es Einsteinium	100	Fm Fermium	101	Md Mendelevium	102	No Nobelium	103	Lr Lawrencium

Alkalimetall Alkali metal	Alkaliskt jordartsmetall Alkaline earth metal	Övergångsmetall Transition metal	Halvmetall Semimetal	Ikke-metall Nonmetal
Övrig metall Basic metal	Halogen Halogen	Ädelgas Noble gas	Lantanoid Lanthanide	Aktinoid Actinide

Figur 3. Periodiska systemet. Röd färg indikerar analyserade grundämnen.
Periodic system. Red colour indicates analysed elements.

DATABEHANDLING

Percentilindelning

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

Kartor

I rapporten redovisas ett antal grundämnen och pH i form av rasterkartor (bilaga 1). Kartskalan är 1:1 000 000. 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 elementkartor är satta från grönt (låga halter för elementen, höga pH-värden) till rött (höga halter för elementen, låga pH-värden). Färgskalan är relativ och används för att kunna sätta olika geokemiska regioner i relation till varandra. Oberoende av färgskala är det viktigt att påpeka att höga halter eller andra värden inte automatiskt innebär att det t.ex. finns någon risk för negativ miljöpåverkan. Klassindelningen med percentiler på färgkartorna grundar sig på denna rapportens dataset.

En del av kartorna är framställda med både nya (2009–2011 års provtagningar) och äldre data (från 1999, 2000 och 2005 års provtagningar). Anledningen till detta är att dessa data inte är publicerade tidigare och kan visas för de element som uppfyller kvalitetskontroll och krav för analysresultat.

ELEMENTENS FÖREKOMST OCH RÖRLIGHET

Geologiska förutsättningar

Berggrundens kemiska sammansättning varierar beroende på de ingående bergarternas sammansättning och proportioner. Halterna av många metaller är t.ex. jämförelsevis låga i de 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 bl.a. järn, magnesium, kobolt, koppar, krom och nickel. Om det finns skifferinslag blir halterna ofta betydligt högre eller mycket höga för en del spårämnen, t.ex. uran (tabell 2).

I tabell 3 visas medelhalterna för element i olika vanligt förekommande bergarter i Finland (Koljonen 1992), 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 4 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 % (medianvärde 0,11 %).

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

Elementmönstren visar också påverkan från den kvartära historien. Moränen i ett område kan ha transporterats mer eller mindre långt och kan ha en något annorlunda sammansättning än den

Tabell 1. Beräknade percentiler (p10–p99) för morän (<0,063 mm, n = 1360). Analysmetod: Lakning med salpetersyra eller kungsvatten (Au, Sb, Ta och Te) och analys med ICP-MS, samt pH.

Calculated percentiles (p10–p99) for till (<0,063 mm, n = 1360). Analytical method: Extraction by nitric acid or aqua regia (Au, Sb, Ta and Te) and analyzed by ICP-MS, pH.

n=1360	Enhet	Metod	p10	p30	p50	p70	p90	p95	p99	max
Na	ppm	7M HNO ₃	86	106	121	138	170	187	237	408
Ag	ppm	7M HNO ₃	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,15
Al	ppm	7M HNO ₃	2 952	4 127	5 336	6 964	10 221	11 874	15 919	25 094
As	ppm	7M HNO ₃	0,7	0,9	1,2	1,6	2,8	3,4	5,6	8,9
Au	ppb	AR	0,3	0,6	0,8	1,2	2,0	3,2	10,7	87,4
B	ppm	7M HNO ₃	0,14	0,19	0,22	0,27	0,37	0,43	0,58	1,03
Ba	ppm	7M HNO ₃	15	20	26	33	48	58	91	173
Be	ppm	7M HNO ₃	0,12	0,16	0,19	0,24	0,34	0,39	0,50	0,70
Bi	ppm	7M HNO ₃	0,02	0,03	0,03	0,05	0,09	0,10	0,18	1,76
Ca	ppm	7M HNO ₃	1 836	2 259	2 512	2 764	3 201	3 421	4 028	15 537
Cd	ppm	7M HNO ₃	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,09	1,97
Ce	ppm	7M HNO ₃	21	25	30	36	53	62	85	224
Co	ppm	7M HNO ₃	1,7	2,4	3,0	3,8	5,6	6,6	8,3	40,6
Cr	ppm	7M HNO ₃	6	9	12	18	28	34	53	189
Cu	ppm	7M HNO ₃	4	7	9	14	24	30	47	470
Dy	ppm	7M HNO ₃	1,0	1,2	1,3	1,5	1,9	2,2	3,0	6,9
Er	ppm	7M HNO ₃	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,7	4,0
Eu	ppm	7M HNO ₃	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,8	1,8
Fe	ppm	7M HNO ₃	5 128	6 815	8 332	10 403	14 947	17 294	24 555	44 125
Gd	ppm	7M HNO ₃	1,6	1,9	2,1	2,5	3,1	3,7	4,7	13,1
Ge	ppm	7M HNO ₃	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,19
Ho	ppm	7M HNO ₃	0,19	0,23	0,26	0,30	0,37	0,43	0,60	1,34
K	ppm	7M HNO ₃	458	666	879	1111	1697	2020	3 371	8 636
La	ppm	7M HNO ₃	10	12	14	16	22	25	33	76
Li	ppm	7M HNO ₃	3,5	5,2	6,5	8,2	11,5	14,1	21,0	34,6
Lu	ppm	7M HNO ₃	0,06	0,08	0,09	0,10	0,13	0,15	0,21	0,49
Mg	ppm	7M HNO ₃	1 267	1 795	2 225	2 895	4 201	5 105	6 937	10 748
Mn	ppm	7M HNO ₃	60	78	95	116	158	187	251	366
Mo	ppm	7M HNO ₃	0,17	0,24	0,33	0,43	0,67	0,91	1,79	6,36
Nd	ppm	7M HNO ₃	8	10	11	13	17	20	26	71
Ni	ppm	7M HNO ₃	3	4	5	7	11	13	20	61
P	ppm	7M HNO ₃	619	730	796	867	974	1 027	1 148	2 202
Pb	ppm	7M HNO ₃	2,3	2,9	3,5	4,2	6,5	8,7	18,5	46,4
Pr	ppm	7M HNO ₃	2,3	2,7	3,0	3,5	4,5	5,1	6,3	19,2
Rb	ppm	7M HNO ₃	4,8	7,2	9,5	12,3	19,2	23,2	33,7	59,5
Sb	ppb	AR	29	42	62	86	142	158	192	360
Sc	ppm	7M HNO ₃	1,1	1,4	1,7	2,1	2,8	3,4	4,4	8,8
Se	ppm	7M HNO ₃	0,07	0,09	0,11	0,13	0,16	0,18	0,27	0,81
Sm	ppm	7M HNO ₃	1,5	1,8	2,0	2,4	3,0	3,5	4,5	13,4
Sn	ppm	7M HNO ₃	0,16	0,21	0,24	0,27	0,33	0,36	0,46	0,78
Sr	ppm	7M HNO ₃	5	6	7	8	10	11	14	21
Ta	ppb	AR	4	6	9	13	25	32	51	81
Tb	ppm	7M HNO ₃	0,19	0,23	0,26	0,30	0,37	0,43	0,57	1,39
Te	ppb	AR	4	6	8	10	15	18	30	60
Th	ppm	7M HNO ₃	3	4	5	6	9	10	13	19
Ti	ppm	7M HNO ₃	434	552	663	792	1 087	1 205	1 532	2 081
Tl	ppm	7M HNO ₃	0,04	0,06	0,08	0,10	0,15	0,18	0,26	0,45
Tm	ppm	7M HNO ₃	0,07	0,08	0,10	0,11	0,14	0,16	0,23	0,47
U	ppm	7M HNO ₃	0,8	1,0	1,2	1,6	2,5	3,1	4,8	9,5
V	ppm	7M HNO ₃	11	14	18	23	33	39	50	78
W	ppm	7M HNO ₃	0,05	0,06	0,08	0,10	0,17	0,20	0,33	0,95
Y	ppm	7M HNO ₃	5,1	6,1	6,8	7,9	9,9	11,2	15,8	37,3
Yb	ppm	7M HNO ₃	0,45	0,54	0,63	0,72	0,91	1,03	1,54	3,14
Zn	ppm	7M HNO ₃	9,6	12,8	15,7	19,4	26,6	31,3	46,6	77,5
Zr	ppm	7M HNO ₃	4,3	5,5	6,4	8,0	10,9	12,8	15,6	32,1
			p10	p30	p50	p70	p90	p95	p99	max
pH			5,1	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,4	7,9
pH1			2,8	3,1	3,3	3,5	3,8	3,8	4,0	4,5

Tabell 2. Bergartstyper med associerade element.

Rock types and associated elements.

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

Tabell 3. Medelhalter av element (mg/kg) i olika vanligt förekommande bergarter i Fennoskandia (Koljonen 1992, Tauber 1988).

Average concentrations (mg/kg) of elements in common rock types occurring in Fennoscandia (Koljonen 1992, Tauber 1988).

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

¹ Koljonen (1992)

² Tauber (1988)

Tabell 4. Innehåll (i gram) av olika grundämnen i 1 kg svensk morän (C-horisont, fraktion <0,063 mm). Data från SGUs markgeokemiska databas.

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	Summa	1000
Nickel	0,016		

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

Markprocesser

Vertikalt i marken varierar den kemiska sammansättningen bl.a. på grund av jordmånsbildande markprocesser. Vilken typ av jordmån (markprofil) som bildas beror på ett flertal faktorer, t.ex. 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, t.ex. järn och aluminium, har fällts ut i den underliggande, ofta rostfärgade B-horisonten. Den kemiska sammansättningen i dessa båda markskikt beror främst på innehållet av primära (bergartsbildande) mineral och på sekundära mineral och föreningar som bildats vid vittring och urlakning. En del ämnen kan dock tillföras via luft och nederbörd. Denna föroreningsfaktor tilltar i betydelse i befolkningstäta eller industriintensiva områden. Under B-horisonten, i C-horisonten, har markprocesserna ingen eller liten effekt på mineraljorden och grundämnena förekommer så gott som uteslutande i primära mineral. Undantag från detta är t.ex. vissa sulfidmineral som är instabila ovan grundvatten-

Tabell 5. Lakbarhet (medianvärden) för utvalda element. N = antal prov av morän (C-horisont, fraktion <0,063 mm), lakbarhet i % = (syralakad elementhalt/totalhalt) × 100. Data från SGUs markgeokemiska databas.

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

Element	N	lakbarhet, %	Element	N	lakbarhet, %
P	13989	88	Co	23283	25
Cu	23283	87	Ca	23283	19
Zn	23283	69	Ti	23283	18
Fe	23283	61	Rb	7287	16
Ni	23283	60	Al	23283	13
Mn	23283	51	Ba	23283	7
Mg	23283	39	Sr	23283	7
V	14764	38	K	23283	5
Pb	23283	38	Na	23283	1
Cr	14764	29			

ytan. Metaller som frigjorts när dessa mineral vittrat har i stället fastlagts i andra former, exempelvis genom jonbytesprocesser (t.ex. Cu^{2+} för K^+ i biotit).

Lakbarhet och associationer

Ett mått på elementens rörlighet är deras lakbarhet, som varierar kraftigt beroende på vilka mineral de sitter bundna i. Hög lakbarhet för ett element anger att en procentuellt stor del av den totala tillgången på elementet blir löslig vid en tillsats av syra, t.ex. salpetersyra eller kungsvatten. Detta anger elementets tillgänglighet på sikt för växterna och för markens neutralisationsförmåga. En låg lakbarhet anger däremot att elementet är hårt bundet i markmineralen och svåråtkomligt. En beräkning av lakbarheten har tidigare gjorts för upp till ca 23 000 moränprov insamlade i hela riket för den regionala karteringen (Holmberg 2006). Tabell 5 visar hur lakbarheten för vanliga element varierar från någon procent för natrium till närmare 90 % för fosfor och koppar.

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

Ett och samma element kan uppträda i flera olika mineral och vara olika hårt bundet. Ett sådant element är kalcium, som återfinns i de flesta nämnda mineraler, 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 återfinns i sådana mineral som vittrar tämligen lätt, dvs. i hornbländegruppen. Variationer i lakbarheten för elementen i morän ger indirekt en uppfattning om provens mineralogiska sammansättning.

Tillgången till element beror alltså på mineralinnehållet i moränen och miljön som moränen befinner sig i, dvs. pH, oxiderande eller reducerande miljö etc. Förhållandet mellan olika element kan också avslöja något om mineralinnehållet i marken. Som exempel kan nämnas elementen kalcium och strontium som är starkt geokemiskt associerade genom sina närliggande jonradier. Det kemiska släktskapet gör att strontium kan ersätta kalcium i mineralens kristallgitter. Strontium förekommer därför i de flesta mineral som innehåller kalcium. I magmatiska bergarter varierar dock förhållandet, eller kvoten, mellan dem beroende på i vilket kristallisationsskede bergartens mineral bildats. I ett tidigt kristallisationsskede i en svalnande magma dominerar kalciumjonen över strontiumjonen. Detta innebär att andelen kalcium i förhållande till andelen strontium är högre i apatit och pyroxen eftersom

dessa mineral bildas först i den stelnde magman. I senare skeden bildas plagioklaser. Förhållandet mellan elementen ändras så att andelen kalcium minskar medan strontium ökar. Genom att studera mönstret för kvoten mellan dessa element 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 ges en översiktlig beskrivning av elementens naturliga uppträdande.

DE KEMISKA ELEMENTEN I NÄRINGSKEDJAN

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

Bristrelaterade eller toxiska sjukdomar hos människor och djur som direkt kan relateras till markens innehåll av grundämnen har dokumenterats på många håll i världen. I Sverige är sådana samband inte vanliga. 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 bl.a. mellan markradon och lungcancer, selenbrist och hjärtsjukdomar och kadmium i dricksvatten och barndiabetes. Hårt dricksvatten, dvs. vatten med mycket kalcium och magnesium, anses däremot ha en positiv effekt genom ett samband med lägre frekvens uppkomna hjärt- och kärlsjukdomar. Dyliga samband har konstaterats vara relativt vanliga internationellt (Karppanen 2002, Selinus m.fl. 2005). Under senare tid har även förekomst av uran i dricksvatten identifierats som en riskfaktor (Kurtzio 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 kemiska element. Oftast har ekosystemen anpassat sig till de förhållanden som råder, men snabba miljöförändringar kan innebära stora påfrestningar. Detta kan inträffa om belastningar såsom kraftig förorening av metaller eller sura regn påverkar näringskedjan.

Av de karterade elementen har bl.a. följande dokumenterat skadliga effekter på levande organismer, om elementet förekommer i ”rätt” form och halterna är tillräckligt höga: arsenik, aluminium, antimon, kadmium, koppar, molybden, nickel, krom, kobolt, mangan, tallium, zink, bly, vanadin och uran. Det bör påpekas att även om halter av potentiellt skadliga element klassas som höga i den här rapporten, innebär detta inte automatiskt att det finns någon risk för negativ miljöpåverkan. Dels kan elementen vara relativt hårt bundna till mineral, dels kan förekomst av element med antagonistisk effekt (t.ex. kadmium–selen) påverka eventuella risker. För konkreta riskbedömningar krävs betydligt mer detaljerade undersökningar.

MILJÖGEOKEMI – GRÄNSVÄRDEN FÖR KÄNSLIG MARKANVÄNDNING (KM)

För miljögeokemisk bearbetning av analysresultat används de salpetersyralakade elementhalterna samt kungsvattenlakade halter för guld, antimon och molybden. Naturvårdsverket har slagit fast gränsvärden i markfraktionen <2 mm för känslig markanvändning (KM) för flera metaller och metalloider: antimon 12 mg/kg, arsenik 10 mg/kg, barium 200 mg/kg, bly 50 mg/kg, kadmium 0,5 mg/kg, kobolt 15 mg/kg, krom 80 mg/kg, koppar 80 mg/kg, kvicksilver 0,25 mg/kg, molybden 40 mg/kg, nickel 40 mg/kg, vanadin 100 mg/kg och zink 250 mg/kg (Naturvårdsverket 2008). Naturvårdsverket har även fastlagt generella riktvärden för direkt kontakt med jordmaterial. Gränsvärdet för arsenik vid hudkontakt med jord och damm ligger på 33 mg/kg i fraktionen <2 mm. Omräknat till SGUs analyserade moränfraktion <0,063 mm är motsvarande arsenikhalt 47 mg/kg. Tidigare undersökta analyser av fraktioner <0,063 mm och <2 mm från samma moränprov resulterade i att en metallhalt i moränfraktionen <0,063 mm kan multipliceras med faktor 0,7 för att erhålla teoretisk metallhalt i

fraktionen <2 mm som direkt kan jämföras med KM-värdet. Erfarenhetsmässigt vet man också att om en moränlokal har kraftigt förhöjd metallhalt är sannolikheten mycket stor 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 lösliga 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 element 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 elementen kan ha börjat lösas ut och att de nått grundvattnet. Det kan ha till följd att dricksvattenkvaliteten i enskilda brunnar påverkas.

OMRÅDETS GEOLOGI

Berggrunden

Den berggrundsinformation som ges här grundar sig främst på resultat från SGUs kartläggning av området (Ödman 1957, Åhman m.fl. 1990, Wikström 1993, 1995, 1996, Kathol m.fl. 2012, Åkerman & Kero 2012, Bergman m.fl. 2014, Bergström m.fl. 2015). För mer information om berggrunden och dess strukturer hänvisas till dessa publikationer och referenser däri.

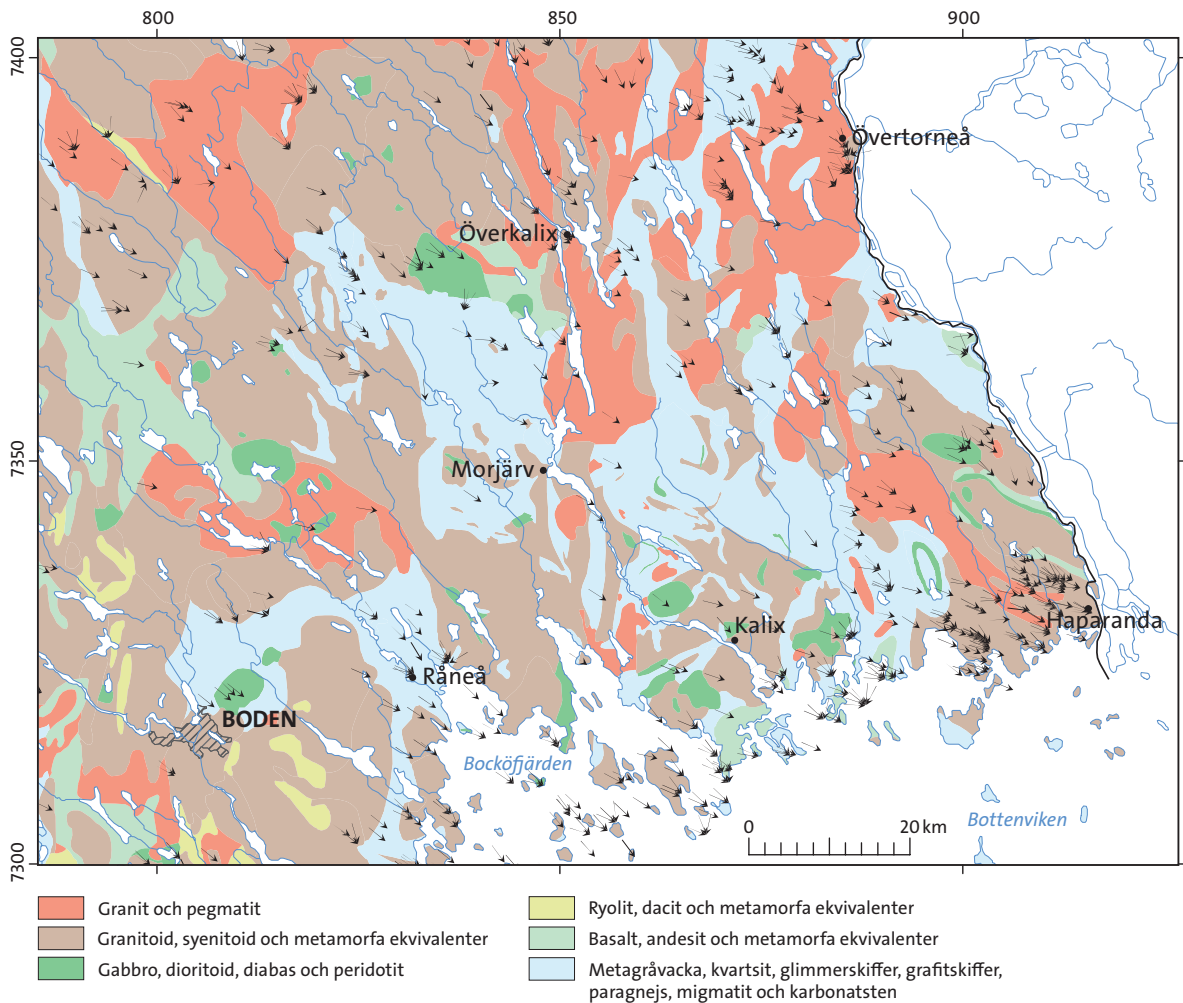
Berggrunden i området ligger inom den svekokarelska orogenen och genomkorsas av den nord-sydliga Pajalaskjuzonen (fig. 4). Förekomsten av deformationszoner och stora veckstrukturer gör att berggrundsenheter på olika stratigrafiska och strukturella nivåer är blottade. Bergarterna bildades huvudsakligen under tiden 2,7–1,8 miljarder år sedan.

Den äldsta berggrunden är 2,7–2,6 miljarder år gammal och finns blottad söder om Boden och norr om Haparanda. Bergarterna är vanligen gnejsiga och migmatitiska och har huvudsakliga sammansättningar som motsvarar granodiorit, tonalit, monzodiorit, diorit och gabbro. Dessa bergarter genomgick deformation och höggradig metamorfos innan resten av berggrunden i området bildades.

I anslutning till den äldsta berggrunden i Haparandaområdet finns mafiska och ultramafiska intrusivbergarter som bildades för 2,5–2,4 miljarder år sedan. Mäktigheten för dessa intrusiva kroppar varierar mellan några meter och ca 200 m. De har en heterogen sammansättning och består av metapyroxenit, metaperidotit, hornbländit, serpentinit, talk-karbonatbergarter, metanorit, meta-gabbro, amfibolit och anortosit. I de ultrabasisiska bergarterna förekommer tunna band av kromit och disseminerad kromhaltig magnetit. De har varit föremål för prospektering efter krom, platinagruppens metaller och guld.

De ovan nämnda enheterna utgör underlaget till karelska ytbergarter med åldrar kring 2,1 miljarder år. Norr om Kalix finns stora områden med finbandad, kvartsitisk till fältspatkvartsitisk gnejs, lokalt med kromglimmer, i vissa områden växellagrande med eller gradvis övergående i glimmerskiffer eller biotitgnejs. Liknande bergarter finns i ett mindre område väster om Överkalix. Mafiska gångar är vanligt förekommande i de karelska ytbergarterna. Massiv och finbandad metabasalt förekommer i kusttrakten söder och öster om Kalix. I denna lagerföljd finns även mäktiga karbonatstenar, både dolomitisk och kalcitisk, samt underordnade kvartsitiska inlagringar. Bergarterna är välbevarade och uppvisar exempelvis stromatolitstrukturer. Lagerföljden återspeglar avsättning i en riftmiljö, som utvecklades via en marint påverkad, riftad kontinentkant till en kontinentalsöckel med karbonatavsättning.

De svekofenniska ytbergarterna överlagras de karelska och bildades för 1,96–1,88 miljarder år sedan. Den ytmässigt största enheten är av sedimentärt ursprung och domineras av metasiltsten och meta-gråvacka, i många fall utbildad som skiffer. I områden med högre metamorfosgrad förekommer biotitgnejs. De metamorfa indikatormineralen cordierit och andalusit förekommer allmänt. Svekofenniska



Figur 4. Berggrundskarta med isrörelseriktningar (SGU databas, modifierad).
 Bedrock map with the ice movement directions (SGU database, modified).

bergarter med vulkaniskt ursprung är vanliga i områdets västra del och i närheten av Överkalix. I några fall förekommer de som inlagringar i metagråvacka, men som regel är deras stratigrafiska läge i förhållande till de metasedimentära bergarterna oklar. De vulkaniska bergarterna har avsatts som lava, tuff eller vulkanoklastit. Vissa finkorniga, porfyriska förekomster tolkas som ytliga intrusioner. Sammansättningsmässigt varierar de från basalt till ryolit. I Bodénområdet dominerar metaryolit till metaandesit medan metaandesit är vanligare mot norr.

Intrusivbergarter med åldrar i tidsintervallet 1,9–1,8 miljarder år dominerar helt i områdets berggrund. De tillhör ett flertal olika intrusiva sviter och är mer eller mindre deformerade och omkristalliserade. I detta sammanhang behandlas de som en enhet. Gabbro och diorit förekommer som rundade eller avlånga kroppar spridda i hela området. Det finns även rikligt med mafiska gångar i vissa områden. Betydligt större utbredning har de felsiska intrusivbergarterna. Dessa har även en stor variation i sammansättning, huvudsakligen granit, granodiorit, kvartsmonzonit och kvartsmonzodiorit. Inom de olika intrusionssviterna har mafiska och felsiska magmor bildats samtidigt och blandat sig med varandra i olika grad. I Haparandaområdet innehåller bergarterna pyroxen på många ställen. Det finns gradvisa övergångar mot monzodiorit och diorit. Granitisk sammansättning är vanligast i de norra och sydvästra delarna. I nordväst är pegmatitisk granit en väsentlig beståndsdel, i en del fall innehåller den turmalin.

Den svekokarelska orogenesisen (1,96–1,8 miljarder år sedan) skedde i en subduktionszonsmiljö intill en kontinentkant. Som framgått av redogörelsen ovan skedde en omfattande nybildning av bergarter. Denna hade även stor betydelse för flera faser av deformation och metamorfos som påverkade både den nybildade och den pre-existerande 2,7–2,1 miljarder år gamla berggrunden. Deformation ledde till stora veckstrukturer och deformationszoner. Under metamorfosen nybildades mineral. I vissa områden var temperaturen så hög att berggrunden började smälta.

I Kalix skärgård finns en stor mängd smala gångar i nord–sydlig riktning av lamprofyr och karbonatit med en ålder av ca 1,1 miljarder år. Den äldre berggrunden överlagras av sandsten, siltsten och lersten i ett område under Bottenviken, men några förekomster på land är inte kända i Sverige.

Mineraliseringar

Metalliska mineralförekomster

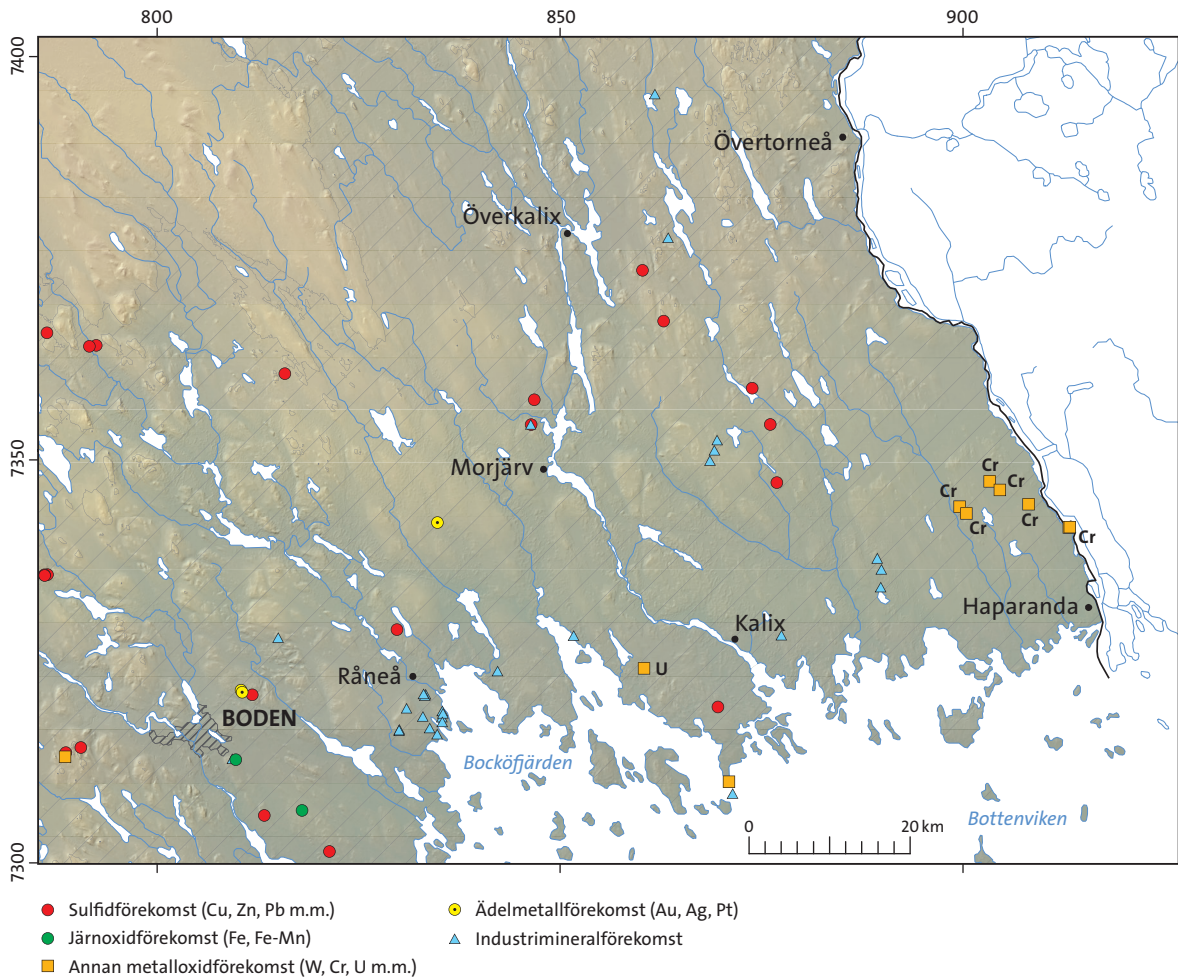
Sulfidförekomster dominerar i undersökningsområdet (fig. 5). Vanliga kopparmineraliseringar förekommer ofta associerade med antingen Co-Ni (i mafiska bergarter t.ex. gabbro-amfibolit i Lillträsk och ultramafiska bergarter, t.ex. i Kukasjärvi) eller Ag-Au-Mo (Lillån Norra). Kopparsulfidmineraliseringar kan man hitta i metasedimentära bergarter, såsom gråvacka och arenit, men också i skarnförekomster (Stora Pahtavaara). En del sulfidmineraliseringar förekommer i lagrade mafiska intrusioner t.ex. Ni-Co-Cu i Notträsk och Cr-Pt (PGE)- Au i Kukkola. Ädelmetaller som guld och platina-palladium finner man också i mafiska bergarter (t.ex. Notträsk gabbro).

Bara enstaka järnmineraliseringar i koppling till vulkaniska bergarter (ryolit-dacit) är kända i undersökningsområdet, t.ex. Gruvberget och Brändåsen, SÖ om Boden. I Kalixtrakten förekommer den välkända apatitförande uranmineraliseringen i Pålänge.

Det finns för närvarande ingen pågående gruvdrift i kartområdet. Så vitt det är känt har endast Stora Pahtavaara gruva funnits i området, men brytningen av kopparmalm har för länge sedan upphört. Boliden prospekteringsborrade från slutet av 1970-talet till början av 1980-talet i Kukasjärvi. Den består av en Ni-Cu mineraliserad ultramafisk lagergång. Fyndigheten beräknas innehålla 0,4 % Ni och 0,4 % Cu. Ytterligare en nickelfyndighet i Furuberget har undersökts av Boliden: pentlandit- och kopparkismineraliseringen finns i detta fall av en differentierad mafisk lagergång med 0,3 % Ni och 0,16 % Cu (Åkerman & Kiero, 2012).

I Haparandaområdet har Torniointrusionen varit föremål för prospektering efter krom, platina-gruppens metaller och guld. Det har gjorts en del observationer av sulfider och indikationer på nickel-sulfider finns i gabbro i områdets nordligaste del. Området är i övrigt fattigt på sulfidmineraliseringar och omvandlingar kopplade till dessa (Bergman m.fl. 2014).

I de västra delarna av Pålkebladen finns tre mindre mineralförekomster: Försthuvudet (även kallad Gallaberget), Lillån Norra (även kallad Åsarna) och Norra Lillån (även kallad Lillån). De är alla sulfidmineraliseringar i en vulkanisk värdbergart, med lokala guldhalter högre än 1 g/ton och anomala halter av koppar, zink, bly, molybden och silver. Dessa kända mineraliseringar är små, men indikerar en intressant mineraliseringstyp och är tänkta malmgeologiska mål i området eftersom ädelmetallhalterna är relativt höga (Bergström m.fl. 2015). Vid Fiskelträsk har Boliden lokaliserat en nickelmineralisering med låghaltig nickel-kopparmalm i en gabbro relaterad till Haparandasviten. Denna typ av nickelförande gabbro finns också i omgivande kartområden, t.ex. Notträsk (Arvanitidis 1982) och Östra Skogträsk. Sulfidmineralsammansättningen i Notträsk består huvudsakligen av magnetkis, pentlandit, violarit och kopparkis, och i mindre mängder av mackinavit, gersdorffit, kobaltit, kubanit, molybdenglans, pyrit, magnetit och ilmenit. Halterna av PGE+Au varierar från 160 till 1700 ppb. Diamantborringar som utfördes i Notträsk i slutet på 1980-talet (Filén m.fl. 1989) påträffade sulfidmineraliseringar med PGE+Au koncentrationer över 4 ppm. En lite annan typ är mineraliseringen vid Kukasjärvi inom kartområdet 26M Överkalix. Där förekommer nickelmineralisering i en ultramafisk bergartskropp i en sedimentär miljö. Sådana ultramafiska kroppar har noterats i håll på några ställen inom kartområdet 26L Pålkem och tillsammans med sulfider vid Långsel.



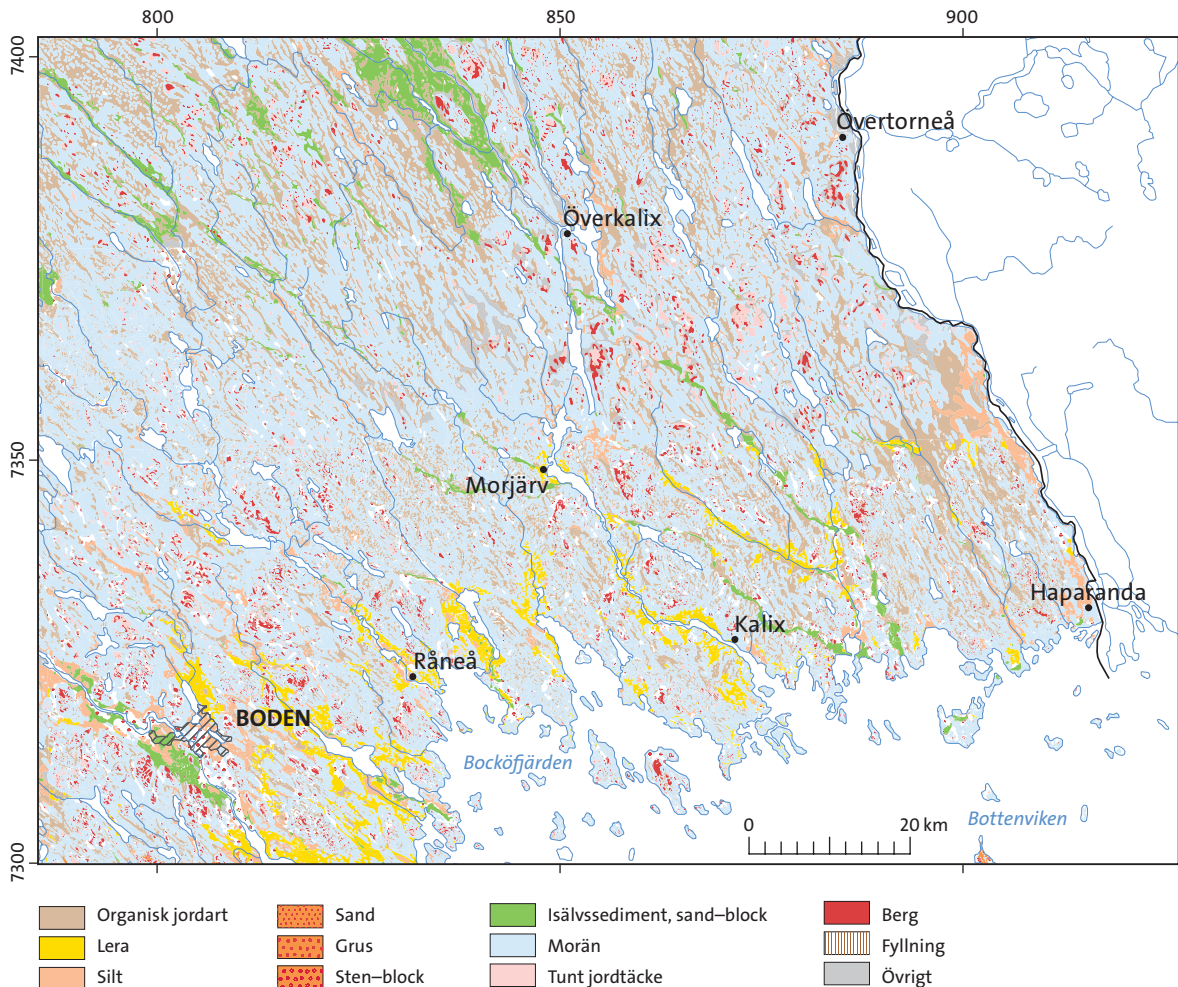
Figur 5. Översiktskarta över undersökningsområdet med mineralförekomster (SGU databas, modifierad).
 Overview map of the surveyed area with mineralisation sites (SGU database, modified).

Skärpningar och enstaka mindre gruvhål i sulfidförande metasedimentära bergarter finns i ett flertal områden mellan Boden och Niemisel. Vid Hällkölen ca 6 km sydost om Avafors vid Lillån, förekommer mineralisering med löllingit som sprickfyllnad i gnejs (Carlsson 1982). Vid Höträskkölen ca 7 km söder om Råneå finns tre nedlagda pegmatitbrott som är kända bland mineralsamlare för fynd av radioaktiva mineral. Vid Lillträsk 6 km nordväst om Råneå förekommer en nickel- och kopparmineraliserad ultramafisk bergart. Den innehåller disseminerad kopparkis och magnetkis (med halter mellan 0,5 och 0,7 % nickel och 0,4 och 2,3 % koppars) och utgör en del av en mafisk intrusion som intruderat sulfidrika metasedimentära bergarter. Ett flertal kopparmineraliseringar i håll och block är sedan länge kända i ett område ostnordost om Svartlå vid gränsen mellan kartområdena 25K Harads NO och 25L Boden NV. Till exempel, en kopparmineraliserad pegmatit med amazonsten från Gruvbergets sydöstra sluttning innehåller 920 ppm koppars, 0,1 ppm guld och 1,46 ppm silver (Kathol m.fl. 2012).

Industrimineralförekomster

Industrimineral som glimmer, kvarts, fältspat, andalusit bryts eller bröts på några ställen mellan Kalix och Haparanda och i Överkalix område (t.ex. pegmatit bestående av mikroklin, kvarts och biotit i Isakgruvan). Marmor och kalkförekomster är kända på några ställen t.ex. nära Prästhalm (Paulinbrottet) där bytning utfördes under slutet av 1960 talet.

Några historiska täkter med grafitförande metasedimentära bergarter förekommer nordost om Boden. På Huvudköllandets sydsluttning 15 km nordost om Boden finns flera äldre skärpningar i



Figur 6. Förenklad karta över kvartärgeologi i undersökningsområdet (SGU databas, modifierad).
Simplified map of the Quaternary geology in the studied area (SGU database, modified).

grafitförande metasedimentära bergarter med rostvittrad grafitkiffer eller kvartsit. Grafit har brutits åtminstone under början av nittonhundratalet. Vid Tväråkölen, 11 km nordväst om Råneå, förekommer skärpningar i rostvittrad grafitkiffer. Den mineraliserade zonen ser ut att vara 1–2 m bred med paragnejs som ett sidoberg.

Kvartärgeologi

Norra Sverige är typområde för bevarade glaciala landskap som orsakats av den begränsade erosion bottenfrusna täcken av inlandsis åstadkommer. Den glaciala geomorfologin kan dessutom innehålla komponenter från flera stadialer och nedisningar. Bevis för sådana konserverade landskap och relativt omfattande glaciala stratigrafier i norra Skandinavien sammanställdes som en del av Nordkalottprojektet, ett samarbete som involverade de geologiska undersökningarna i Finland, Norge och Sverige. Projektet producerade en serie om fem kartor i skala 1:1 miljon: Kvartära avlagringar, Glacial geomorfologi, Isrörelseindikation, Kvartär stratigrafi och Isrörelseriktningar (Nordkalottprojektet 1986). Medan Nordkalottkartorna ger en utmärkt översikt av regionen, har SGU tagit fram mer detaljerade kartor av kvartära avlagringar i skalor 1:100 000 och 1:250 000 (fig. 6, SGU, databas). Tillsammans ger dessa kartor, i olika skalor, en ram för att tolka glacial geomorfologi och kvartär stratigrafi i projektområdet.

Även om morän från tidigare glaciationscykel (Saale) ibland kan påvisas i grävningar, är de flesta glaciala landformer i norra Sverige från den senaste glaciala cykeln – Weichsel. Under Weichsel, avancerade inlandsisen över norra delen av landet flera gånger. Under det tidigaste glaciala stadiet av

Weichsel (I), rörde sig isen från nordväst och skapade väldefinierade, strömlinjerade glaciala landformer (Lagerbäck & Robertsson 1988). Dessa är tydliga i den norra och östra delen av projektområdet. Under reträtten av den tidigaste isen fanns en längre period av stagnation och en stillastående isfront. Detta ledde till avsättning av stagnant is och vattendeponerade sediment över stora delar av norra Sverige (Lagerbäck 1988a). Sammanfattningsvis kallas dessa avlagringar Veikimorän och återfinns strax nordväst om projektområdet. Efter den isfria perioden finns stratigrafiska indikationer på minst två efterföljande perioder av isframstötter i Norrbotten (Lagerbäck 1988a; Lagerbäck 1988b; Lagerbäck & Robertsson 1988; Helmens m.fl. 2007). Stora delar av södra och centrala Norrbotten har emellertid få geomorfologiska bevis på de mittersta och senaste Weichsel-isarnas framstötter. Detta beror till stor del omfattande bottenfrusna isar och icke-erosiva förhållanden. Denna brist på glacial omvandling leder ofta till att landformer från mittersta och senaste Weichsel inte kan skiljas från varandra (Nordkalottprojektet 1986). Isrörelserna från dessa perioder har riktning från väst och sydväst och är tydligast i den sydvästra delen av projektområdet. Bottenfrusna isförhållanden fanns sannolikt inte endast under Weichsel-epoken. Det har antagits att ett landskap i nordligaste Norrbotten inte har glacialt ursprung utan härrör från tiden före den kvartära perioden (Hättestrand & Stroeven 2002). Utbredd förekomst av saproliter stöder denna hypotes. Efterföljande arbeten har visat att detta inte är ett isolerat förhållande: landskap, som tolkas innehålla komponenter med åldrar av mer än en miljon år, finns kvar i nordligaste Sverige (Hall m.fl. 2013). Glaciala stratigrafier ändras ofta dramatiskt bara några hundra meter i sidled. Detta lapptäckte av bottenfrusna och vattenbaserade förhållanden hos Weichsels istäcken i norra Sverige förvärrar denna företeelse. Därför bör beskrivningar av regional stratigrafi som baseras på relativt få punktobservationer ses med försiktighet. Med denna varning kan en idealiserad stratigrafi i ett grävt dike i norra Sverige inkludera följande enheter nerifrån och upp: saprolit, morän från Saale, moräner från tidig Weichsel, mittersta Weichsel och senaste Weichsel. De olika moränenheterna är ofta, men inte alltid, separerade från varandra med antingen organiska eller klastiska vattendeponerade sediment. Efter reträtten av den senaste Weichselisen var största delen av projektområdet täckt av vatten på grund av den depression av jordskorpan som orsakades av inlandsisens massa. Tjocka avlagringar av lera och silt deponerades över de nedsänkta områdena. När ismassans tryck hade upphört steg landytan. Detta ledde till en regional återhämtning av jordskorpan. Dessa stora vertikala förskjutningar av jordskorpan bidrog också till reaktivering av befintliga förkastningar som omedelbart hade följt deglaciationen. En sådan kallas Lansjärvförkastningen och återfinns i den nordvästra delen av projektområdet (Lagerbäck & Sundh 2008).

GEOKEMI I OMRÅDET – ELEMENTENS FÖREKOMST OCH ASSOCIATIONER I MORÄN

Den markgeokemiska karteringen i södra Norrbotten utfördes under två fältsäsonger med provtagning 2009 och 2011. I undersökningsområdet (ca 10 000 km²) har man samlat in prov från 1 360 moränlokaler. Moränens geokemi är påverkad av berggrunden, mineraliseringarna, karaktären hos isen som avsatt moränen och av skeenden och effekter under inlandsisens avsmältning.

Effekter av den kvartära historien indikeras i elementens spridningsmönster i största delen av undersökningsområdet. Ett flertal element har låga halter som inte direkt kan kopplas till berggrunden (Ag, Al, Be, Ce, Fe, La, Mg, P, Th, Ti, U, Y). De finns huvudsakligen i området under högsta kustlinjen (HK). När landet höjdes ur havet utsattes områdena för intensiv vattenpåverkan (t.ex. issmältningsvatten, havsvågornas svallning). Denna process sköljde ur och omlagrade jordlagren och kan ha gett moränerna ett inslag av sorterade jordarter. Rinnande vatten har också urlakat moränen från rörliga element som i löst form transporterades vidare. Utvecklingen under hela processen bidrog till lågt pH (50 % av prov har pH lägre än ca 5; median = 5,4). pH har högre värde i norra delen av området (över HK) och på högre höjder samt i morän lokalt innehållande kalksten, dolomit och marmor (upp till 7,9). Enstaka element som bor anrikas i områden under högsta kustlinjen och kan tyda på förekomster av kvartära finkorniga sediment (postglaciala leror).

Generellt förekommer högre elementhalter i norra delen av undersökningsområdet, särskilt om det ligger över högsta kustlinjen. Utsträckningen av elementens anomalier följer i stort sett isrörelse-riktningen från nordväst till sydost och förekomsterna av glaciala former som drumliner och åsar. Kalixälvens stora dalsystem spelar också roll i elementmönstrens utformning.

Huvuddragen i moränens geokemi styrs emellertid av berggrundsgeologin. Till detta kommer variationer som beror på rörelseriktning och karaktär hos isen som avsatt moränen. Det karaktäristiska för moränens geokemiska egenskaper i området stämmer överens med beskrivningen av berggrunden. Här finns kiselrika magmatiska bergarter (generellt graniter och pegmatiter), mafiska kiselfattiga magmatiska bergarter (gabbro, diorit, lagrade intrusioner), vulkaniter och metasedimentära bergarter omvandlade under låg (i väst) och hög metamorfism (i öst). Mafiska, ultramafiska och kiselfattiga bergarter är källa till förhöjda halter av Mg, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Ti och V. Däremot är undersökningsområdets signatur från dessa bergarter svag på grund av urlakningsprocesser under HK och generellt av den mindre storleken av håll med den typen av bergarter. Granitoider och pegmatiter speglas i moränens geokemi genom höga halter av t.ex. Al, Ba, Be, Ce, K, La, Na, Rb, U, Th och Zr.

En stor del höga halter av olika element i morän förekommer i nordöstra delen av undersökningsområdet. De har sitt ursprung i metasedimentära och metavulkaniska bergarter, ofta högmetamorfa. Särskilt kan grafitförande skiffer vara en källa till några lokala geokemiska anomalier för t.ex. B, Co, Pb eller V.

Flera mindre mineraliseringar finns i området. Däremot finns inga aktiva gruvor. För ett flertal metaller som Ag, Co, Cu, Ni och Zn stämmer kartbilden och kända mineraliseringar överens relativt bra. I morän finns anomalier av silver, zink och bly i anslutning till vulkaniter och associerade järn- och sulfidmineraliseringar. Den kända Notträsk Ni-Cu-Co-mineraliseringen i lagrad intrusion syns intressant nog inte på de flesta geokemiska kartor (t.ex. Cu, Cr, Co) vilket förklaras av läget under HK. Samtidigt visar ett anomalt prov i Tallbergtrakten mycket höga halter av många element som t.ex. Co (40,6 ppm), Cu (470 ppm), Fe, P, La, K, Mg, Se, Ti, V, W och Zr, något som inte kan förklaras av känd mineralisering.

Sammanfattningsvis ges en kort förklaring av geokemisk signatur i morän för utvalda element (för mer information om element se bilaga 2 och Andersson m.fl. 2014):

- Ag (silver):** förhöjda halter vid sulfidmineraliseringar i kvartsgångar och vulkaniska bergarter (t.ex. Gruvberget) och i närheten av mineraliseringar med guld och silver (t.ex. vid Norra Lillån).
- Al (aluminium):** högre halter i områden över HK och i den östra delen med dominerande metasedimentära bergarter (t.ex. metagråvacka, glimmerskiffer).
- As (arsenik):** generellt låga halter i morän (median = 1,2 ppm). Endast i sydväst (väster om Boden) kan förhöjda halter kopplas till underliggande metavulkaniter och metasedimentära bergarter och associerade sulfidmineraliseringar.
- Au (guld):** låga halter med enstaka anomalier som förekommer i områden med vulkaniska bergarter och i närheten av lagrad intrusion norr om Haparanda.
- B (bor):** bor har högre halter i områden med metasedimentära (och delvis vulkaniska) bergarter, speciellt de grafitförande t.ex. i den nordöstra delen och i områden under HK.
- Bi (vismut):** låga halter i området. Enstaka förhöjningar kan kopplas till sulfidmineraliseringar t.ex. i bornit i kvartsgångar.
- Ca (kalcium):** förhöjda halter i område med mafiska bergarter t.ex. basalt och gabbro.
- Cd (kadmium):** låga halter i området.
- Ce (cerium):** spridningsmönster är påverkat av högsta kustlinje, huvudkälla av cerium i morän: granitoider och pegmatiter.
- Co (kobolt):** högre halter i nordöstra delen som kan knytas till förekomster av metasedimentära bergarter inklusive fuchsitförande kvartsit och grafitförande skiffer. Enstaka anomalier och förhöjda halter finns i område med mafiska vulkaniter (som basalter) och i anslutning till sulfidmineraliseringar med Cu, Ag, Au t.ex. Norra Lillån. Den högsta halten är 40,6 ppm i Tallbergtrakten och förekommer i område utan kända mineraliseringar.

- Cr (krom):** högre halter i de östra och nordöstra delarna med metasedimentära och vulkaniska bergarter. Enstaka anomalier och förhöjda halter i områden med mafiska vulkaniter (som basalter) och intrusiva bergarter som gabbro.
- Cu (koppar):** ganska låga halter, lätt förhöjda metallhalter förekommer i den nordöstra delen och lokalt i anslutning till mineraliseringar med koppar, t.ex. Norra Lillån, Gruvberget, Kukasjärvi.
- Fe (järn):** huvudkälla till järn i morän är mafiska och ultramafiska vulkaniska och intrusiva bergarter. De högsta halterna finns i den nordöstra delen där suprakrustala komplex med bl.a. basalt, gabbro och sulfidförande skiffer förekommer. Under HK är järnhalterna låga och möjligtvis urlakade av vattenströmning.
- K (kalium):** förhöjda halter i områden med förekomster av granitoider, alkalina intrusiva bergarter (t.ex. syenit) och metasedimentära kalifältspat- och biotitrika bergarter (t.ex. gnejs, metagråvacka, metaarkos). Detta syns tydligt i den östra delen av området.
- Mg (magnesium):** låga halter under HK orsakat genom urlakning under relativt låga pH-förhållanden och att mafiska bergarter (t.ex. gabbro) inte speglas i morängeokemin. Högsta koncentrationer förekommer i den nordöstra delen med berggrund som består av suprakrustala bergarter (sedimentära och vulkaniska).
- Mn (mangan):** Förhöjda halter i områden med mafiska vulkaniter och metasedimentära bergarter i de norra och västra delarna av undersökningsområde.
- Mo (molybden):** låga halter med enstaka anomalier upp till 10 ppm.
- Na (natrium):** medelhöga halter orsakade av förekomster av granitoider och metasedimentära bergarter.
- Ni (nickel):** låga halter med undantag av den nordöstra delen, där det förekommer mafiska vulkaniter (t.ex. basalt) och intrusiva bergarter (t.ex. gabbro) samt metasedimentära bergarter, lokalt med fuchsit (Ni-rik glimmer). Enstaka förhöjda nickelhalter kan knytas till mindre platinagrupp- och sulfidmineraliseringar i mafiska och ultramafiska bergarter.
- P (fosfor):** höga halter i nordöst och sydväst, i områden med metasedimentära bergarter och metavulkaniter, lokalt med anknytning till sulfid- och järnförekomster.
- Pb (bly):** låga halter med undantag av enstaka anomalier i öster (öster om Överkalix) och norr om Boden, möjligen med koppling till grafitförande skiffer.
- Rb (rubidium):** förhöjda halter i den nordöstra delen med metasedimentära bergarter. Rubidium-anomalin runt mineralisering med koppar, molybden och guld i Norra Lillån kan tyda på hydrotermala omvandlingar i metavulkaniter.
- REE (Rare Earth Elements, sällsynta jordartsmetaller, lantanoider från La till Lu):** alla REE-element, både lätta LREE och tunga HREE, har samma mönster på kartan, med högre halter i de norra och sydvästra delarna och generellt i områden med underliggande sviter granit-pegmatit. Enstaka förhöjda halter t.ex. av lantan (La) förekommer i närheten av Cu- och Au mineraliseringar i pegmatiter. En tydlig anomali finns i Tallbergtrakten med ett prov som har höga halter av REE och andra metaller (Co, Cu, Fe, P) och där LREE är större än HREE. Den större anomalin nordväst om Överkalix pekar på berggrund som domineras av granit samt av gnejs med pegmatitgångar.
- Sb (antimon):** höga halter i sydväst (nära Boden) och låga halter i den nordöstra delen av området. Spridningsmönstret följer generellt de tektoniska gränserna i berggrunden.
- Sc (scandium):** förhöjda halter i den nordöstra delen och mönsterlikhet med rubidium. Områden med mafiska and ultramafiska bergarter har högre halter än områden med granitoider.
- Sn (tenn):** förhöjda halter i den nordöstra delen, i områden med metasedimentära bergarter och migmatiter.
- Sr (strontium):** förhöjda halter i områden med vulkaniter.
- Ta (tantal):** fläckvis höga halter i undersökningsområdet, t.ex. öster om Överkalix, mellan Svartbyn och Tallberg, norr om Niemisel, nära Boden, i den nordvästra delen, möjligtvis med anknytning till förekomster av granitoider och pegmatit i berggrunden.

- Th** (**torium**): förhöjda halter i den nordöstra delen, i områden med granitoider och högmetamorfa migmatiter (metasediment?). Låga halter syns främst under högsta kustlinjen.
- Ti** (**titan**): de högsta halterna förekommer i den nordöstra delen av området. I den västra delen finns enstaka förhöjda halter. Huvudsaklig källa till anomalier är mafiska vulkaniter, mafiska och ultra mafiska intrusiva bergarter som gabbro, diorit och peridotit. Förhöjda halter syns över höga kustlinjen vilket förklaras av att titan är mobilt under lågt pH i vattenmiljö.
- Tl** (**tallium**): anrikning i morän från den nordöstra delen, som överlagrar mafiska och ultramafiska bergarter och suprakrustala sekvenser, sannolikt med anknytning till lokala sulfidförekomster.
- U** (**uran**): generellt låga halter med undantag av några anomalier runt 10 ppm som förekommer i norra delen av området och kan förklaras av förekomster av intrusiva bergarter som granit och pegmatit.
- V** (**vanadin**): medelhöga halter i nordöstra delen, i områden med mafiska vulkaniska och intrusiva bergarter och suprakrustala sekvenser med metasedimentära bergarter som t.ex. grafitförande metagråvacka.
- W** (**wolfram**): generellt låga halter, förhöjda halter i den sydvästra delen, i anknytning till Au, Mo, Cu, W mineraliseringar i pegmatit och skarn.
- Y** (**yttrium**): förhöjda halter i den västra delen som kan förklaras av förekomster av granitoid och syenitoid samt pegmatit.
- Zn** (**zink**): enstaka förhöjda halter i området har anknytning till vulkaniska bergarter och mindre sulfidmineraliseringar.
- Zr** (**zirkonium**): låga halter under högsta kustlinjen, högre halter i den norra delen som kan förklaras av förekomster av felsiska kiselrika intrusiva bergarter t.ex. granit och pegmatit.

SUMMARY

For more than 30 years of geochemical mapping at SGU, consistently sampled and routinely analysed geochemical data has been provided to the society. The national geochemical mapping programme was initiated in 1982 and it has been based on the silt and clay fraction (<0.063 mm) of till. The objective of the programme is to quantify regional geochemical variations in glacially drifted overburden in order to provide data for mineral exploration, mining industry, spatial planning, agriculture, forestry, environmental monitoring and medicine, veterinary, epidemiology and for research.

In the current study, a total of 1 360 samples of till were collected in southern Norrbotten (ca 10 000 km²) with sample density of 1 sample per 7 km². The samples were recovered from hand-dug pits, usually at 0.6–1.2 m depth in order to reach the C-horizon. After vacuum-drying, the samples were sieved stepwise to <0.063 mm and analysed for major, minor and trace elements at SGU laboratory. Two complementary digestion methods i.e. in Aqua Regia (a mixture of HCl and HNO₃) and in nitric acid (7M HNO₃) combined with ICP-MS analysis have been used. Acidity (pH) was determined in a suspended solution composed of a four gram sample (<0.063 mm) and 20 ml distilled water. A rigorous quality control programme was used to monitor the analytical and sampling variance and to ensure good quality of the results. Additional details regarding the geochemical mapping programmes at SGU are available from Lax & Selinus (2005).

The geology in the surveyed region is very complex and the bedrock is mainly composed of Palaeoproterozoic basement rocks (younger than 2.4 Ga) of the Fennoscandian Shield, with small occurrences of Archaean rocks (older than 2.6 Ga gneisses and migmatites) in the southern part near Boden. In the south-eastern part of the area, Early Palaeoproterozoic rocks occur, including mafic and ultramafic intrusive rocks and layered intrusions with chromite and magnetite mineralisation. Supracrustal rocks of mainly mid-Palaeoproterozoic age occur as metamorphosed sediments e.g. quartzites, schists, paragneisses and locally marbles. Basaltic dykes and lavas, often metamorphosed into amphibolite are common. Svecofennian rocks dominate in the studied region and are represented by most common intrusive types e.g. gabbro, diorite, granitoid and to minor extent by metavolcanic

rocks of wide range of compositions (basalt to rhyolite). Metasedimentary rocks are present as slate, metagreywacke, schist and paragneiss. The youngest rocks (ca 1.0 Ga lamprophyre and carbonatite dykes) occur in the coastal region. The largest tectonic feature is the Pajala shear zone, stretching ca north–south through the studied region.

The Quaternary geology of Norrbotten has had a huge impact on the geochemical pattern in till. Glacial drift of different ages covers most of the area. Although tills from the previous glacial cycle, the Saalian, are sometimes encountered in excavations, most of the glacial landforms date to the most recent glacial cycle, the Weichselian. Commonly, the till units are separated from each other by either organic or clastic water-lain sediments. Large portions of southern and central Norrbotten, however, contain little geomorphic evidence of middle and late Weichselian ice advance because of largely non-erosive frozen-bed conditions at the base of the ice. This lack of glacial reworking often leads to middle and late Weichselian landforms being undifferentiated from each other. Ice flow during these periods was from the west and southwest and is most apparent in the southwestern part of the study area. Ice directions from older glacial events were mainly from northwest. The ice transport distances are interpreted to be rather short, around 5–10 km. The studied region, with the exception of the northern part, is located under the highest coastline. Following the retreat of the late Weichselian ice, water from the Gulf of Bothnia covered much of the study area and thick deposits of clay and silt were deposited over that submerged land. This resulted in intense reworking of surface deposits by the marine and glacier waters.

There are a number of small ore deposits and mineralisations in the studied area, no active mine at the recent time though. Sulphide mineralisations dominate, mainly Cu in association with Co and Ni and with Ag, Au and Mo. Few layered intrusions have been a subject of mineral exploration for Co, Cr, Ni and platinum group elements (Pt, Pd, Rh). Minor iron oxide mineralisations in volcanic rocks and skarn occur in southern part of the area. Few types of industrial mineral and stone have been quarried e.g. mica, feldspar, andalusite, graphite, marble and quartzite.

The geochemical pattern in the till cover is dominated by the combination of several factors: bedrock geology and mineralisations, Quaternary history of glaciations and deglaciations and related isostatic rebound. Additional role is played by the climate and topography.

The main geochemical signature originate from underlying bedrock and the contrast between distribution of silica-rich (e.g. granitoids, pegmatites, rhyolites) and silica-poor rocks (gabbro, basalt, peridotite) is reflected in till geochemistry. Silica-rich intrusive rocks are usually a source of elevated concentrations of Al, Ba, Be, Ce, K, La, Na, Rb, U, Th and Zr in till, and silica-poor (mainly mafic) rocks are source of Mg, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Ti and V in till. Till overlying metasedimentary rocks is common in the eastern part of the mapped area and to large extent has similar chemical signature as till overlying granitic rocks. Occurrences of graphite-bearing metasedimentary rocks are reflected in till geochemistry by local anomalies of B, Co, Pb and V.

For metals such as Ag, Co, Cu, Ni and Zn, their spatial distribution can be explained by the occurrences of known mineralisations. However, due to water reworking of the till cover under the highest coastline, some of the ore deposits, even mined in the past do not show up on the geochemical maps e.g. layered mafic intrusion at Notträsk hosting Ni-Cu-Co deposit.

Topography together with a variety of glaciation and deglaciation related processes influence the distribution of many geochemical anomalies. In general, till collected in the area under the highest coastline and at low elevation is depleted in several elements, (e.g. Ag, Al, Be, Ce, Fe, La, Mg, P, Th, Ti, U, Y), including those, traditionally considered as immobile (e.g. Ti and Y). The intense water activity

after deglaciation and during the marine transgression is responsible for element leaching and their relocation. Additionally, development of the low pH (on average below 5) contributed to the removal of most metals. Higher pH in till (>7) occurs only locally above the highest coastline, at higher elevation in northern part of the studied area, and in till overlying minor limestone, dolomite and marble. The NW-SE orientation of some geochemical anomalies is consistent with predominant ice-directions and the shape of the glacial forms such as eskers and drumlins.

REFERENSER

- 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*, 208 s.
- Andersson, M., Johansson, P. & Lax, K., 1997: Markgeokemiska kartan i Östra Norrbottens inland, västra Småland och södra Halland, samt markkemiska variabler. *Sveriges geologiska undersökning Rapporter och meddelanden 94*, 91 s.
- Andersson, M. & Lax, K., 1996: Markgeokemiska kartan 20–22, I–L. *Sveriges geologiska undersökning Rapporter och meddelanden 85*, 35 s.
- Andersson, M. & Lax, K., 2000: Geokemiska kartan. Markgeokemi. Metaller i morän i delar av Västerbotten, Västergötland, Halland och Skåne. *Sveriges geologiska undersökning Gk 2*, 49 s.
- Andersson, M., Jelinek, C., Ohlsson, S.-Å. & Selinus, O., 2007: Geokemiska kartan. Markgeokemi. Metaller i morän och andra sediment i Östra Mälardalen med Stockholm. *Sveriges geologiska undersökning serie K 77*, 157 s.
- Arvanitidis, N., 1982: *The geochemistry and petrogenesis of the Nottråsk mafic intrusion, northern Sweden*. Doktorsavhandling, Stockholms universitet, Institutionen för geologi och geokemi 253, ISBN:91-7146-235-X, 180 s.
- Bergman, S., Gierup, J., Kübler, L., Lagerbäck, R. & Thunholm, B., 1998: Översiktsstudie av Norrbottens län (urbergsdelen). Geologiska förutsättningar. *SKB rapport R-98-40*, 58 s.
- Bergman S., Kübler, L. & Martinsson, O., 2001: Description of regional geological and geophysical maps of northern Norrbotten County (east of the Caledonian orogen). *Sveriges geologiska undersökning Ba 56*, 1–110.
- Bergman, S., Bergström, U., Bastani, M., Jönberger, J., Juhojuntti, N. & Johansson, P., 2014: Regionalkartering i kartområdet 25N Haparanda, tidigare arbeten och resultat från fältarbetet 2013. *Sveriges geologiska undersökning SGU-rapport 2014:07*, 1–29.
- Bergström, U., Bergman, S., Sadeghi, M., Persson, L. & Jönberger, J., 2015: Regionalkartering i kartområdet 26L Pålkem, tidigare arbeten och resultat från fältarbetet 2014. *SGU-rapport 2015:06*, 1–28.
- Bouchard, M.A. & Salonen, V.-P., 1990: Boulder transport in shield areas. In R. Kujansuu, M. Saarnisto & A.A. Balkema: *Glacial Indicator Tracing*. Rotterdam, 87–107.
- Carlsson, L., 1982: Guld i Norrbotten Del 2. *Sveriges geologiska undersökning BRAP 82040*, 133 s.
- Ek, A., Löfgren, S., Bergholm, J. & Qvarfort, U., 2001: Environmental effects of one thousand years of copper production at Falun, central Sweden. *Ambio 30*, 2, 96–103.
- Filén, B., Ekström, M & Lundmark, L.-G., 1989: Nottråsk 1989, diamantborrning. *SGAB rapport*, 78 s.
- Fredén, C. (red.), 1994: Sveriges Nationalatlas. *Berg och Jord*. Bokförlaget Bra Böcker, Höganäs, 208 s.
- Hall, A.M., Ebert, K., Hättestrand, C., 2013: Pre-glacial landform inheritance in a glaciated shield landscape. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 95, 33–49.
- Helmens, K.F., Johansson, P.W., Räsänen, M.E., Alexanderson, H. & Eskola, K.O., 2007: Ice-free intervals continuing into Marine Isotope Stage 3 at Sokli in the central area of the Fennoscandian glaciations. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 79, 17–39.
- Holmberg, J., 2006: Geokemiska kartan. Markgeokemi. Metaller i morän och andra sediment i Örebro län. *Sveriges geologiska undersökning K 41*, 75 s.

- Hättestrand, C. & Stroeven, A.P., 2002: A relict landscape in the centre of the Fennoscandian glaciation: Geomorphological evidence of minimal Quaternary glacial erosion. *Geomorphology*, 44, 127–143.
- Karppanen, H., 2002: *Epidemiological studies on the relationship between magnesium intake and cardiovascular diseases*. The Magnesium Web Site, <<http://www.mgwater.com/estudies.shtml>>.
- Kathol, B., Sadeghi, M., Triumpf, C.-A. & Larsson, D., 2012: Berggrundsgeologisk undersökning, Jäkkvik Boden. *SGU-rapport 2012:25*, 1–44.
- Kautsky, G., Bölviken, B., Bergström, J., Björklund, A., Kontio, M., Lehmuspelto, P., Lindholm, T., Magnusson, J., Ottesen, R.T., Steenfelt, A. & Volden, T., 1986: *Geochemical atlas of northern Fennoscandia. Nordkalottprojektet. Geological Surveys of Finland, Norway, and Sweden*, 19 s.
- Koljonen, T. (red.), 1992: *The Geochemical Atlas of Finland, Part 2: Till. Geological Survey of Finland*, Espoo, 218 s.
- Krüger, J., 1979: Structures and textures in till indicating subglacial deposition. *Boreas* 8, 323–340.
- Kurttio, P., Auvinen, A., Salonen, L., Saha, H., Pekkanen, J., Mäkeläinen, I., Väisänen, S.B., Penttilä, I.M. & Komulainen, H., 2002: Renal effects of uranium in drinking water. *Environmental Health Perspectives* 110, 4, 337–342.
- Ladenberger, A., Andersson, M., Gonzalez, J., Lax, K., Carlsson, M., Ohlsson, S.Å. & Jelinek, C., 2012: Markegeokemiska kartan. Morängeokemi i norra Norrbotten. *Sveriges geologiska undersökning K410, 112 s.*
- Lagerbäck, R., & Sundh, M., 2008: Early Holocene faulting and paleoseismicity in northern Sweden. *Sveriges geologiska undersökning, Research Paper C 836*, 84 s.
- Lagerbäck, R., 1988a: The Veiki moraines in northern Sweden – widespread evidence of an Early Weichselian deglaciation. *Boreas*, 17, 469–486.
- Lagerbäck, R., 1988b: Periglacial phenomena in the wooded areas of Northern Sweden – relicts from the Tärenö Interstadial. *Boreas*, 17, 487–499.
- Lagerbäck, R. & Robertson, A.-M., 1988: Kettle holes – stratigraphical archives for Weichselian geology and paleoenvironment in northernmost Sweden. *Boreas* 17, 439–468.
- Lax, K. & Selinus, O., 2005: Geochemical mapping at the Geological Survey of Sweden. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 5, 337–346.
- Naturvårdsverket, 2008: *Tabell över generella riktvärden för förorenad mark*. Ersätter tidigare utgivna. <<http://www.naturvardsverket.se>> Publicerat 24 oktober 2008.
- Nordkalott project, 1986: Map of quaternary geology, sheet 2: Glacial geomorphology and paleohydrology, northern Fennoscandia, 1:1 mill. *Geological Surveys of Finland, Norway, and Sweden*.
- Nordkalott project, 1986: Map of quaternary geology, sheet 3: Ice flow indicators, northern Fennoscandia, 1:1 mill. *Geological Surveys of Finland, Norway, and Sweden*.
- Nordkalott project, 1986: Map of quaternary geology, sheet 4: Quaternary stratigraphy, northern Fennoscandia, 1:1 mill. *Geological Surveys of Finland, Norway, and Sweden*.
- Nordkalott project, 1986: Map of quaternary geology, sheet 5: Ice flow directions, northern Fennoscandia, 1:1 mill. *Geological Surveys of Finland, Norway, and Sweden*.
- Perttunen, M., 1991: The transport of till in southern Finland. *Geological Survey of Finland Special Papers* 9, 79–86.
- Rosborg, I. (red.), 2014: Drinking water minerals and mineral balance. *Springer International Publishing AG*, ISBN 9783319095929, 140 s.
- Sarala, P., 2006: Ribbed moraine stratigraphy and formation in southern Finnish Lapland. *Journal of Quaternary Science* 21, 387–398.
- Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J.A., Finkelman, R.B., Fuge, R., Lindh, U. & Smedley, P. (red.), 2005: *Essentials of medical geology. Impacts of the natural environment on public health*. Elsevier Academic Press, 812 s.
- Sohlenius, G., Lax, K. & Ladenberger, A., 2009: Kan SGUs data användas för att uppskatta moränens transportlängd? *Sveriges geologiska undersökning SGU-rapport 2009:26*, 25 s.

- Tauber, C., 1988: *Spruenelemente in Flugaschen*. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, Germany, 469 s.
- Wikström, A., 1993: Berggrundskartan Kalix SV. *Sveriges geologiska undersökning Ai 81*.
- Wikström, A., 1995: Berggrundskartan Kalix NV. *Sveriges geologiska undersökning Ai 79*.
- Wikström, A., 1996: Berggrundskartan Kalix NO. *Sveriges geologiska undersökning Ai 80*.
- Åhman, E., Wikström, A. & Henkel, H., 1990: Berggrundskartan 25M Kalix SO. *Sveriges geologiska undersökning Ai 45*.
- Åkerman, C. & Kero, L., 2012: Beskrivning till berggrundskartorna 26 M Överkalix NV, NO, SV, SO och 26 N Karungi NV, SV. *Sveriges geologiska undersökning K 395–399*, 26 s.
- Ödman, O.H., 1957: Beskrivning till berggrundskarta över urberget i Norrbottens län. *Sveriges geologiska undersökning Ca 41*, 151 s.
- Öhlander, B., 1984: Geochemical analyses of rocks of the Haparanda suite, northern Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 106*, 167–169.

BILAGA 1

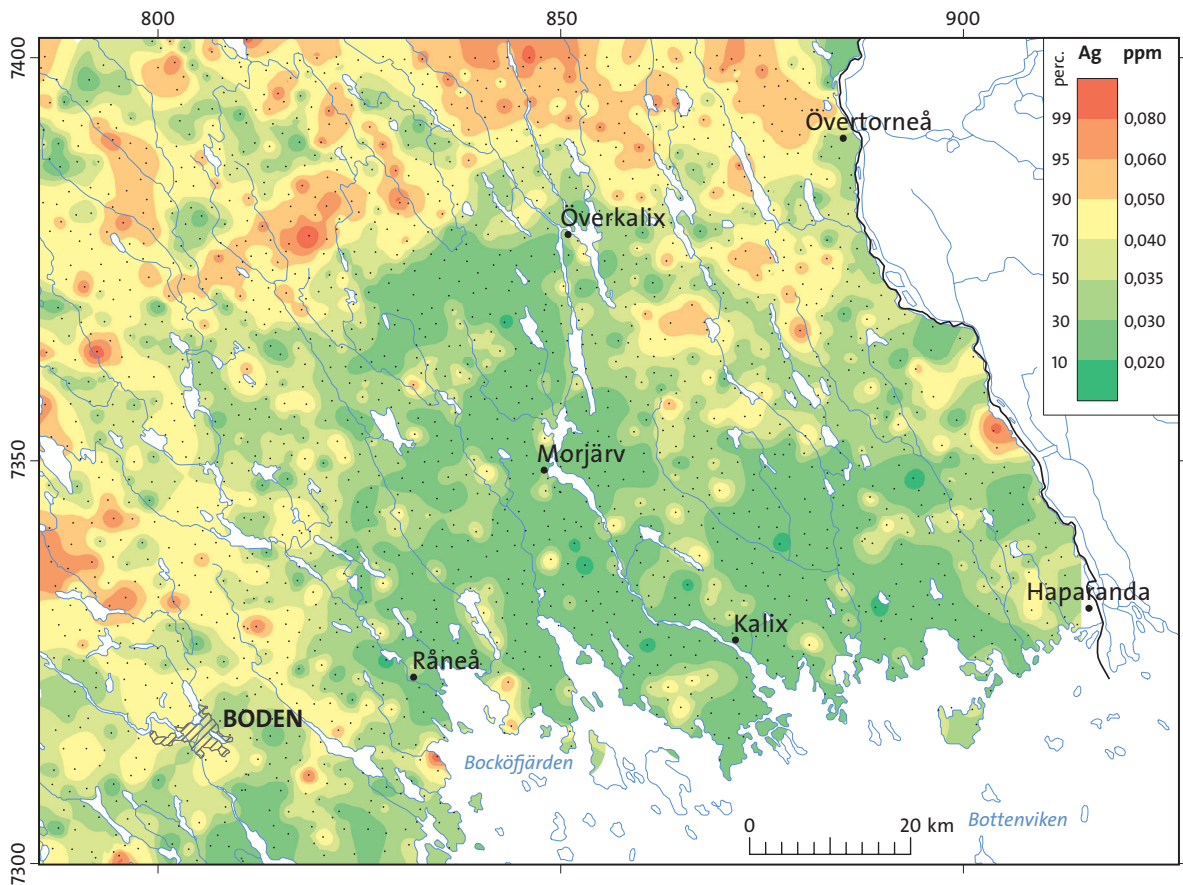
Regionala markgeokemiska kartor *Regional geochemical maps*

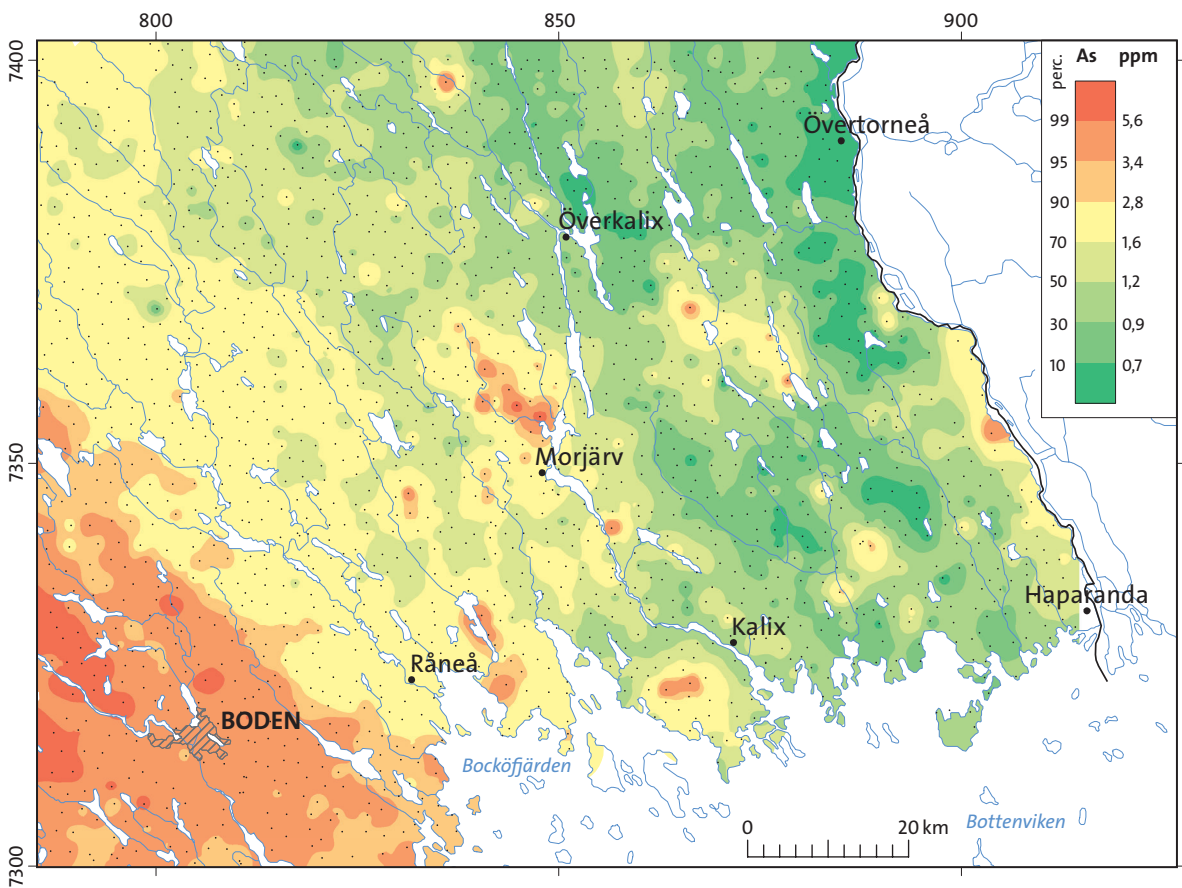
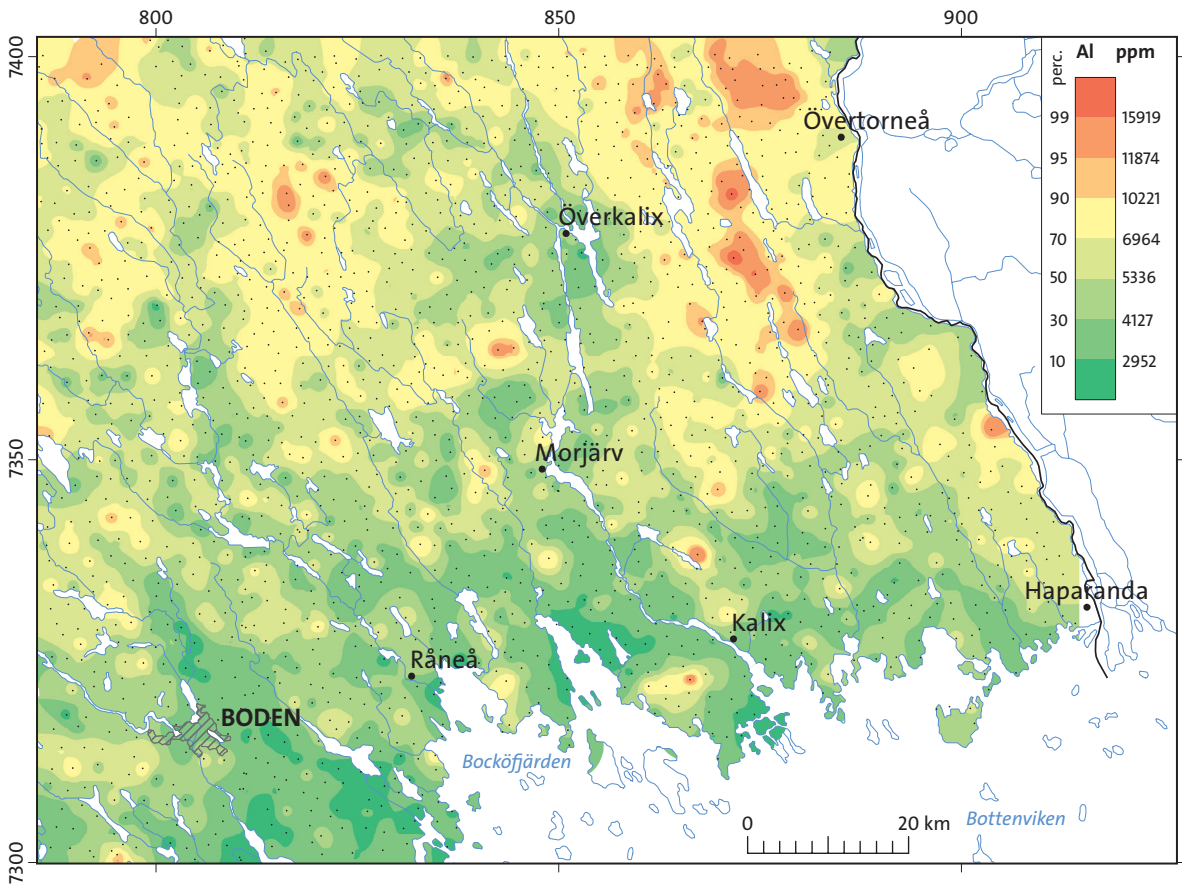
Bilagan omfattar kartor över förekomst av huvud- och spårelement samt pH i morän provtagna enligt SGUs regionala markgeokemiska metod.

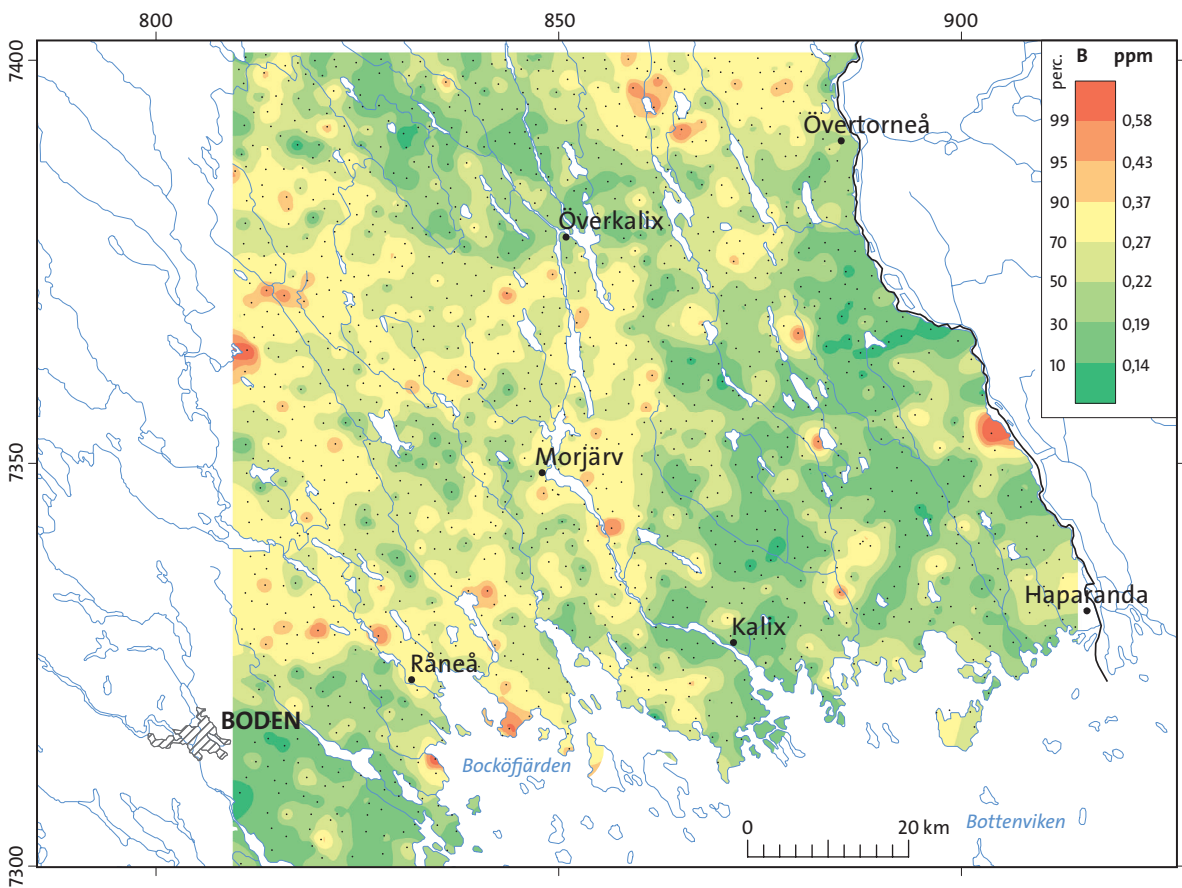
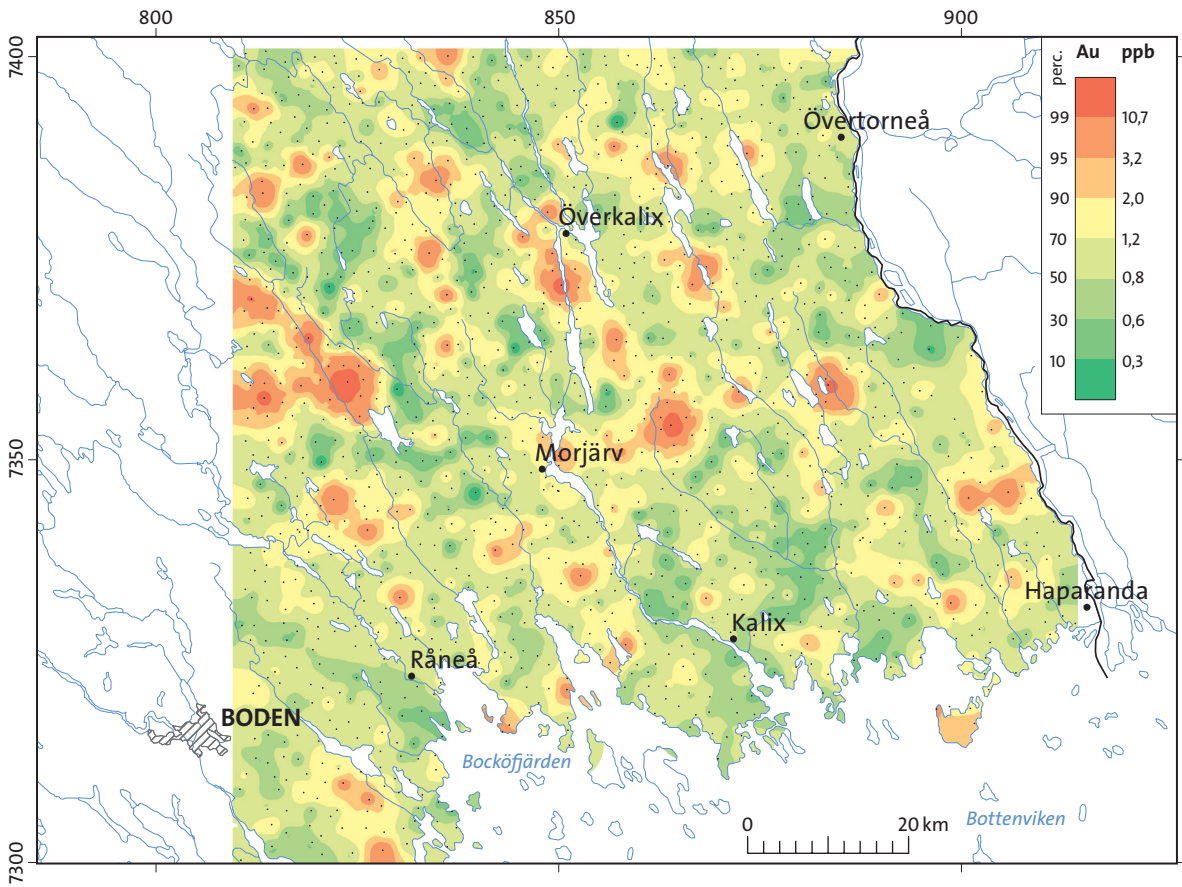
Metod:

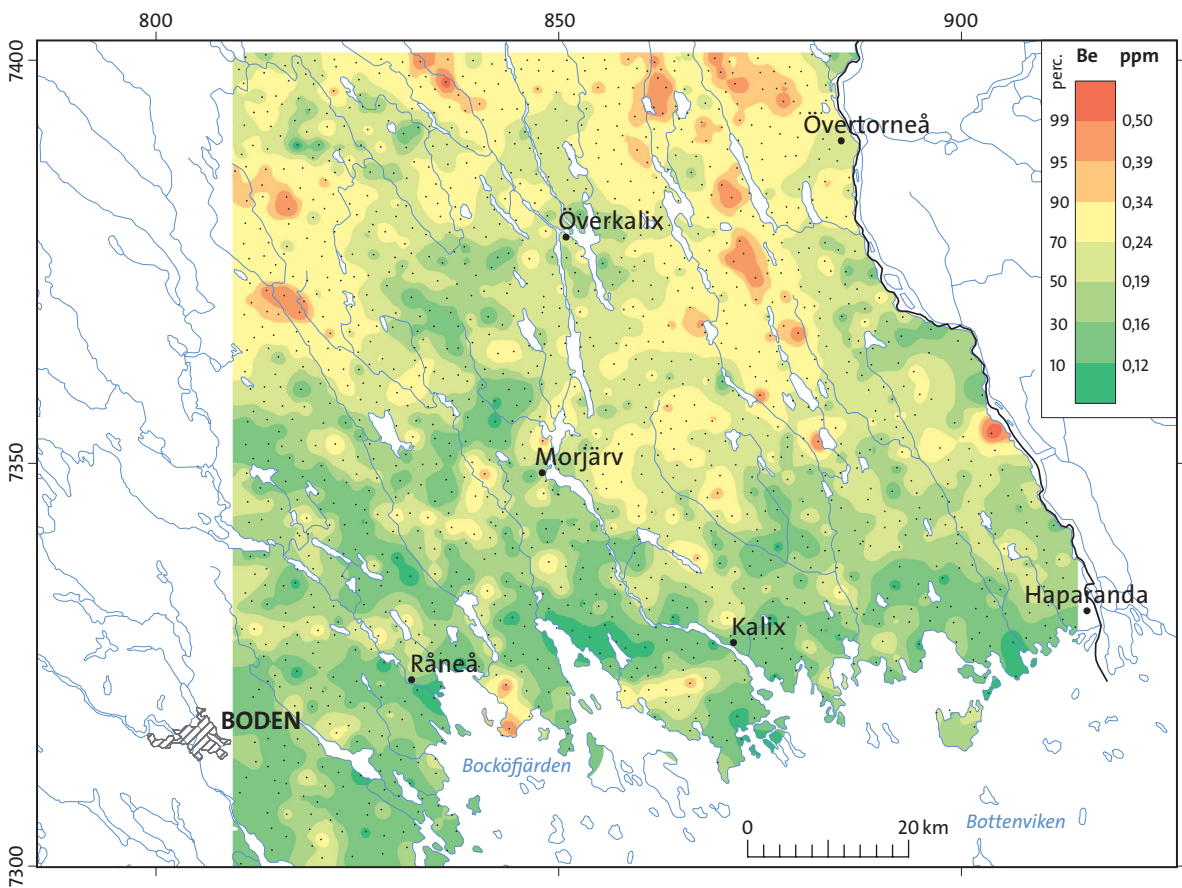
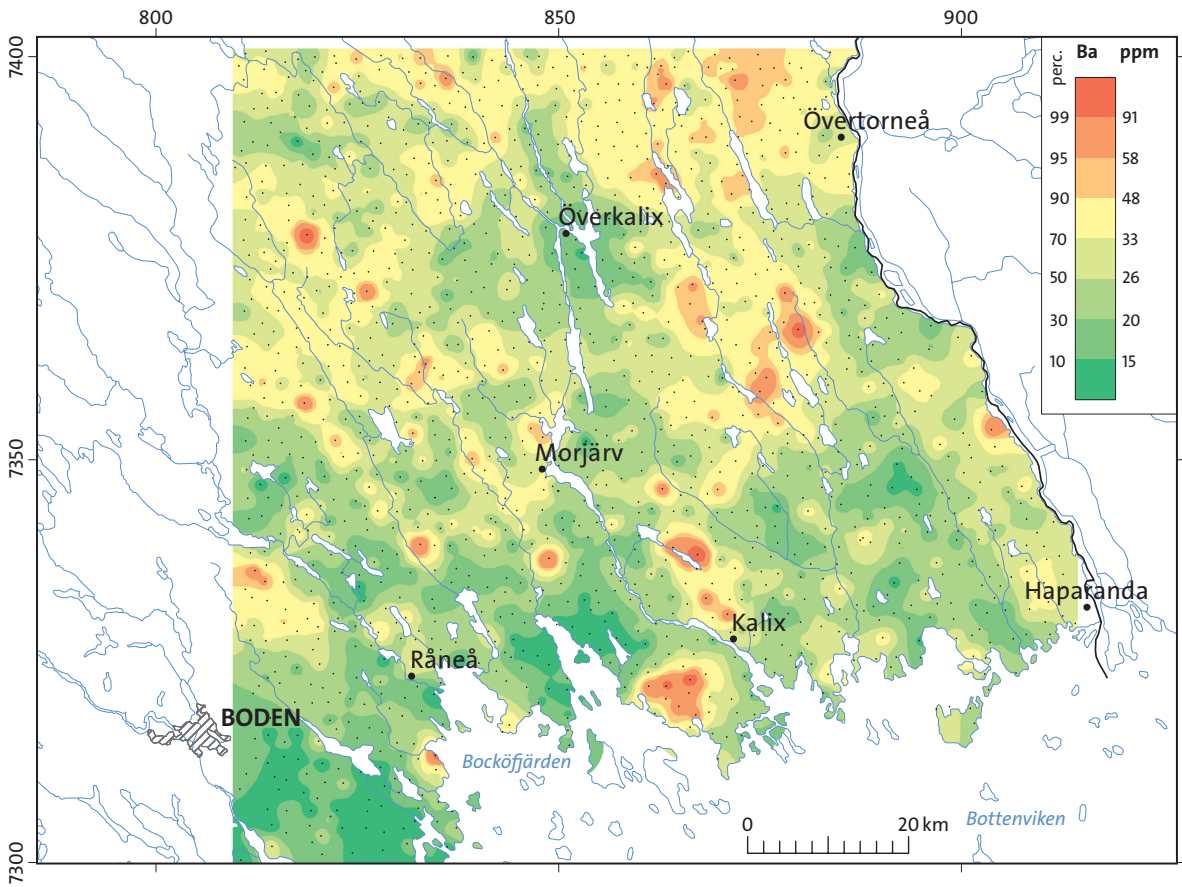
7M salpetersyralakning med ICP MS: Ag, Al, As, Ba, B, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Gd, Ge, Ho, K, La, Li, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nd, Ni, P, Pb, Pr, Rb, Sc, Se, Sm, Sn, Sr, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn och Zr.

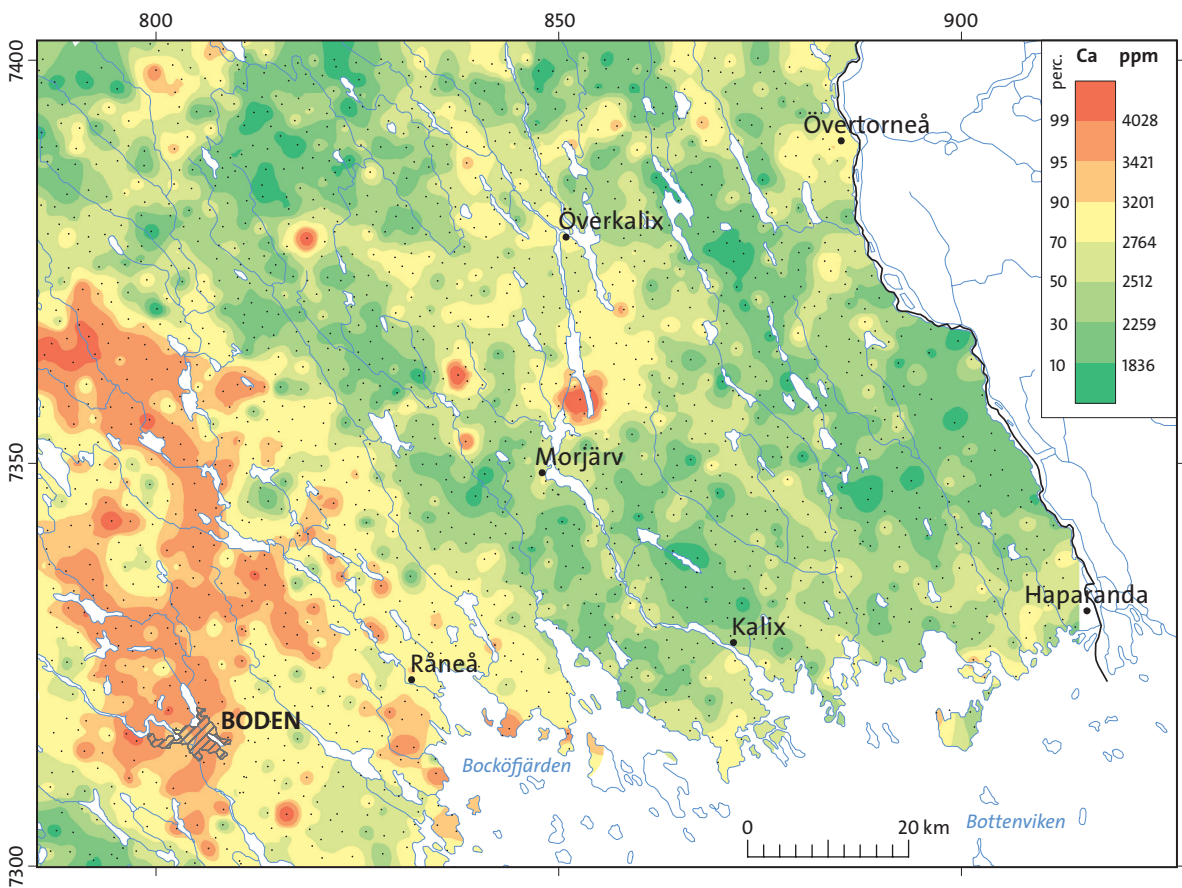
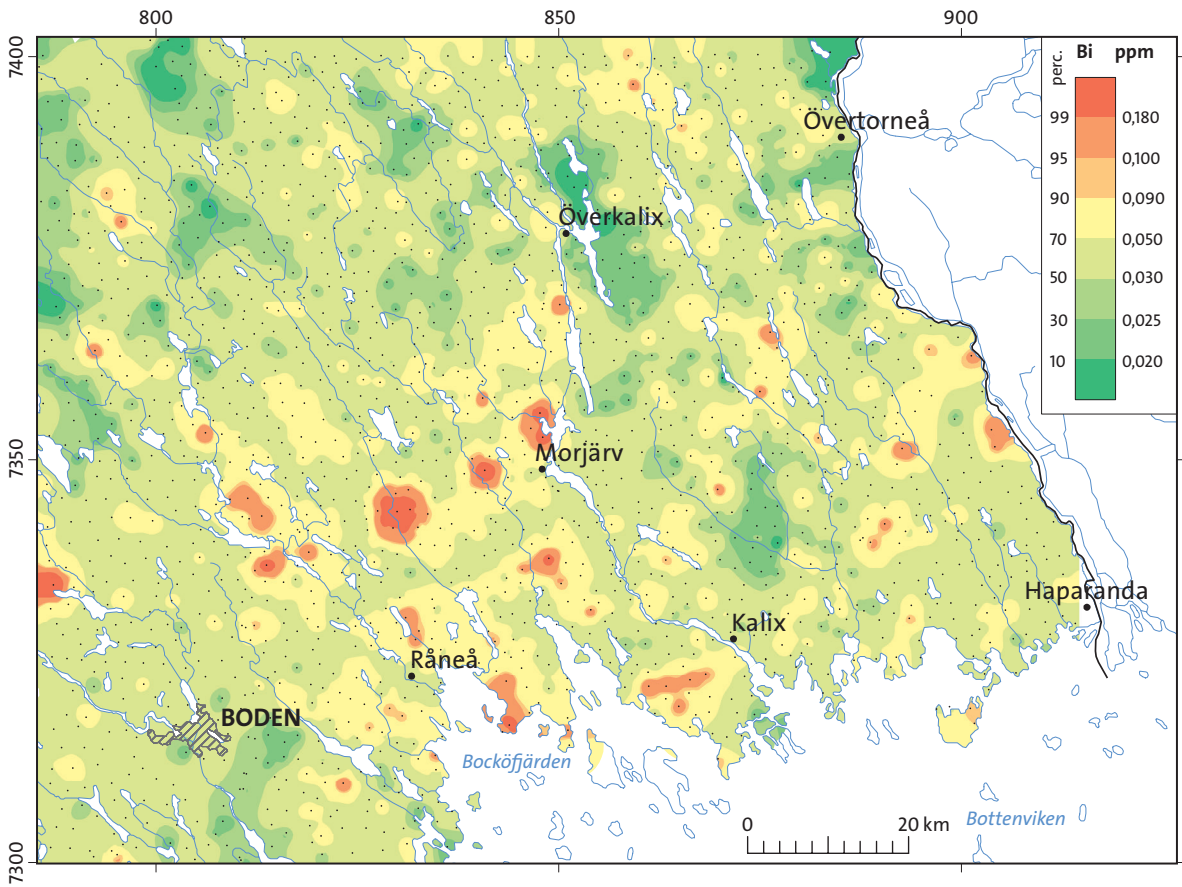
Kungsvattenlakning med ICP MS: Au, Sb, Ta och Te.

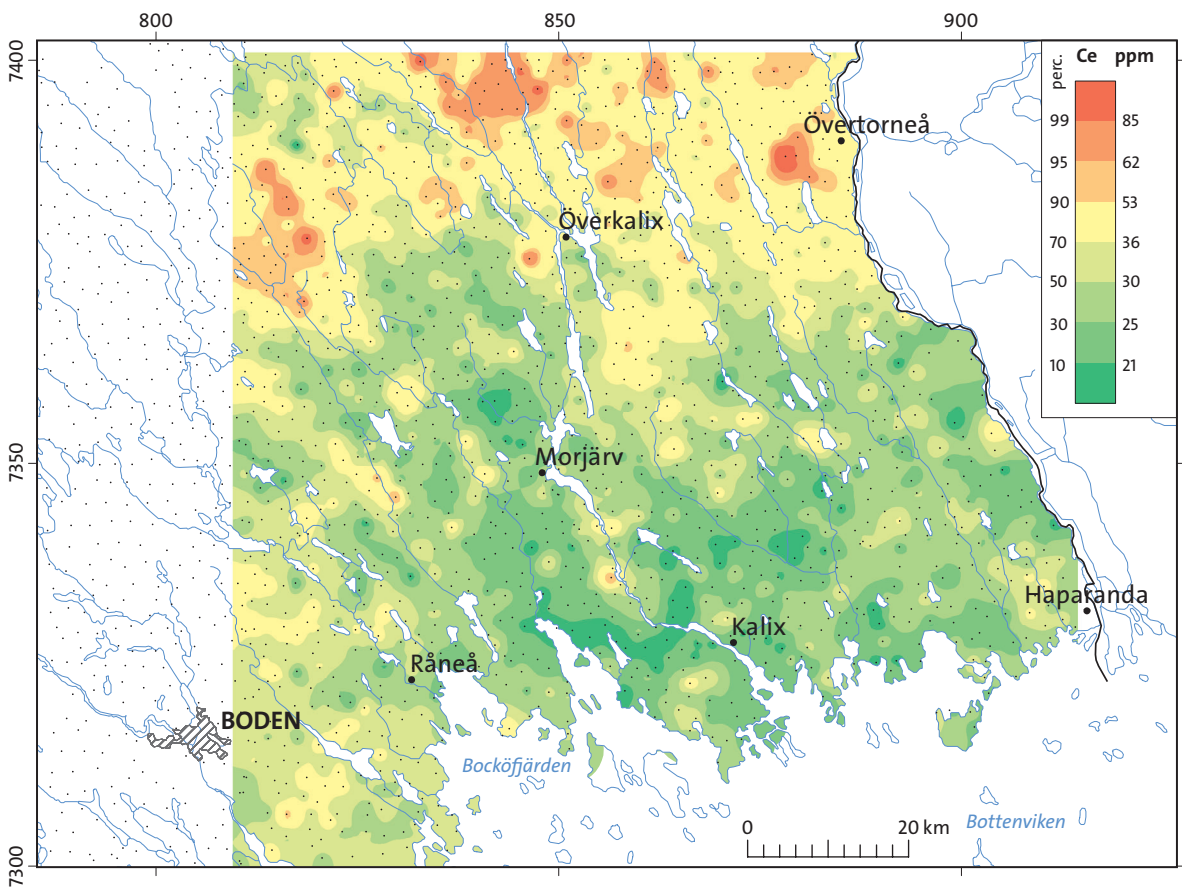
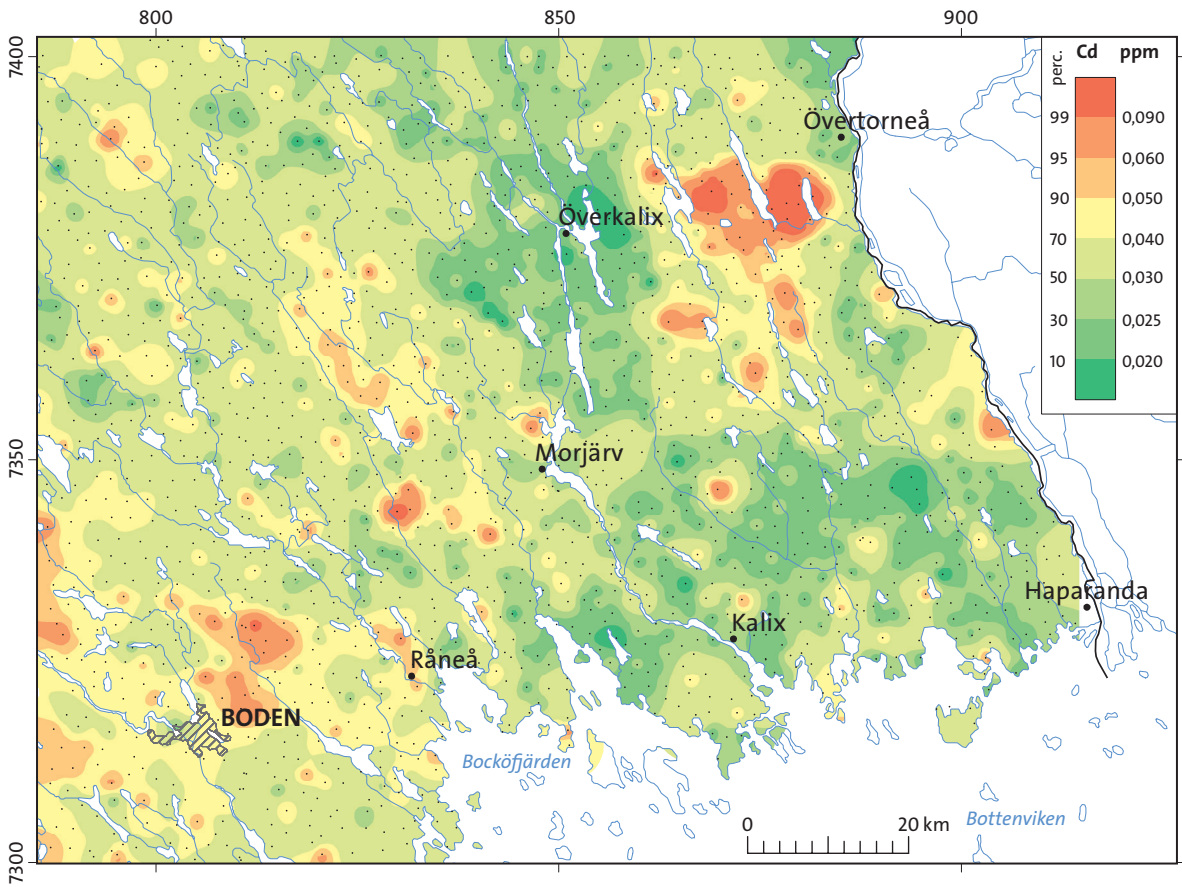


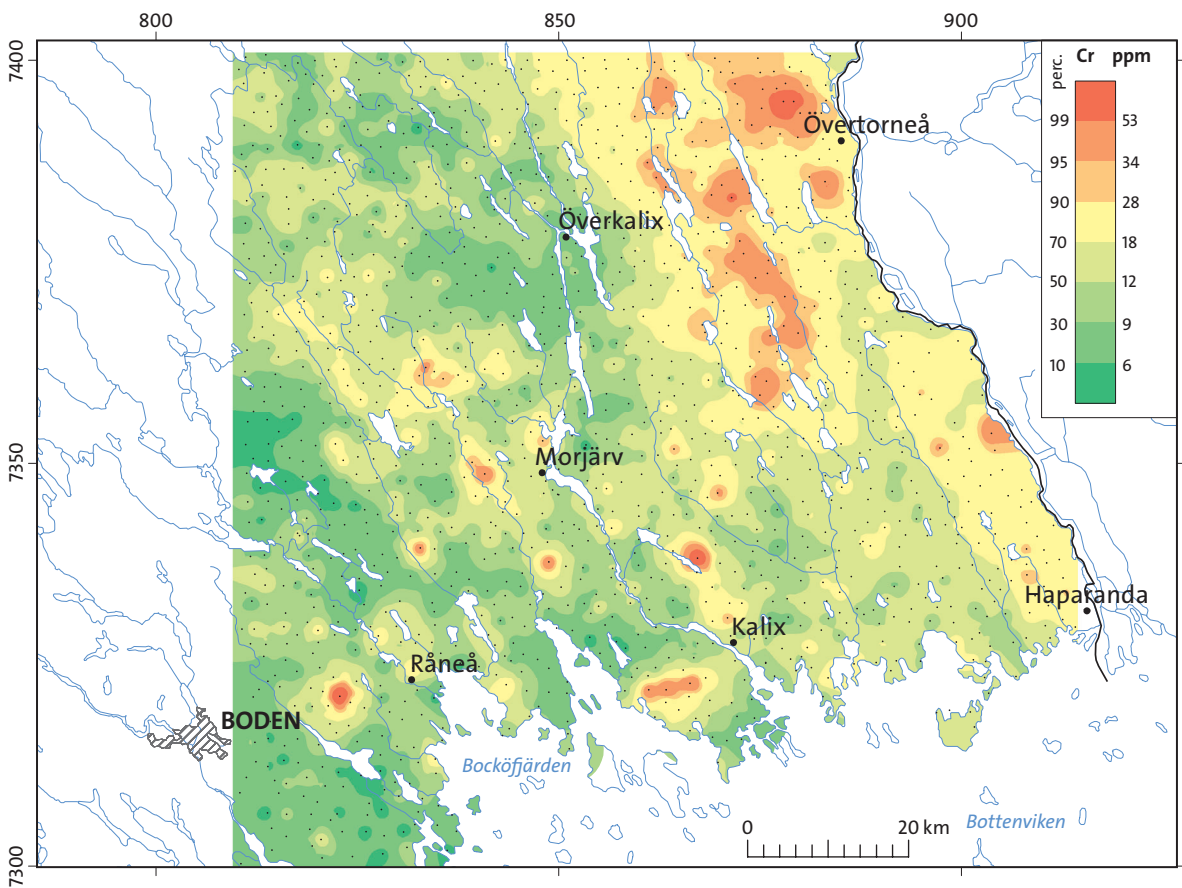
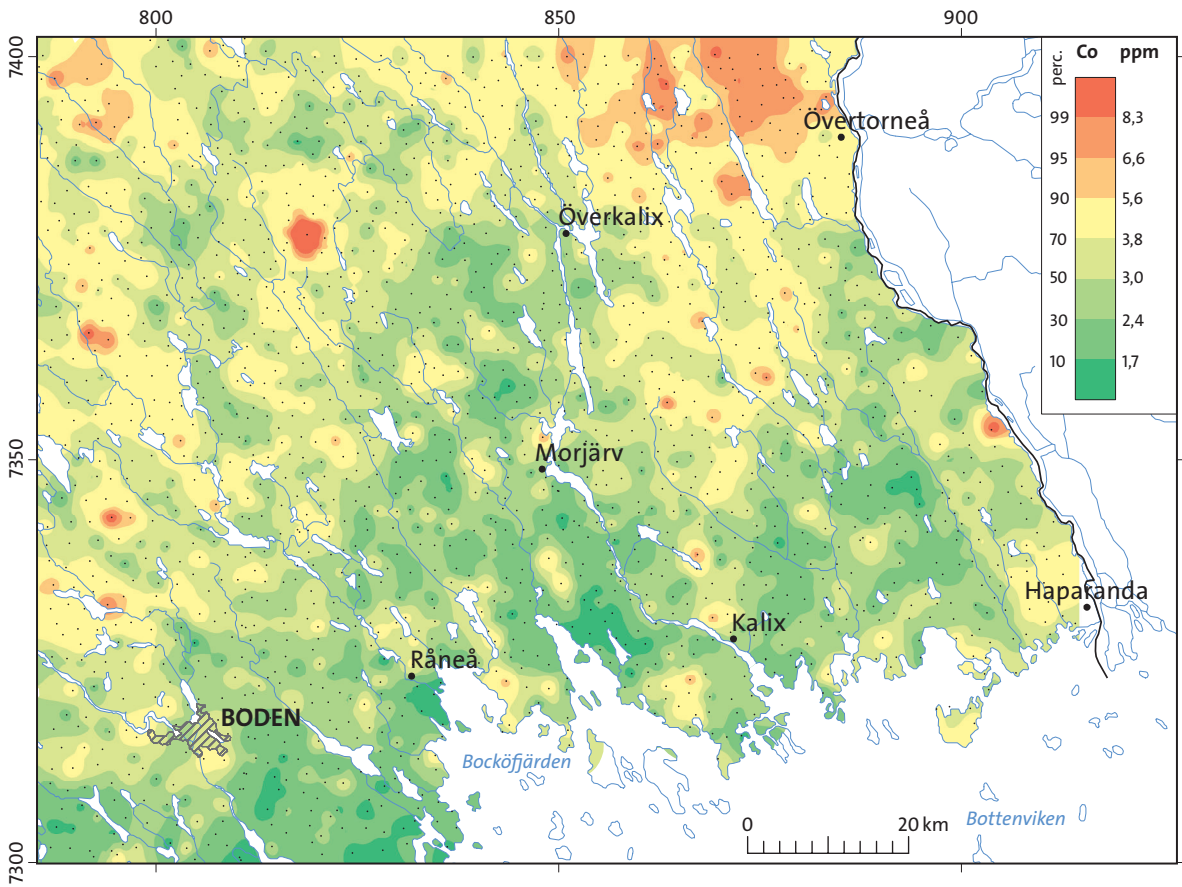


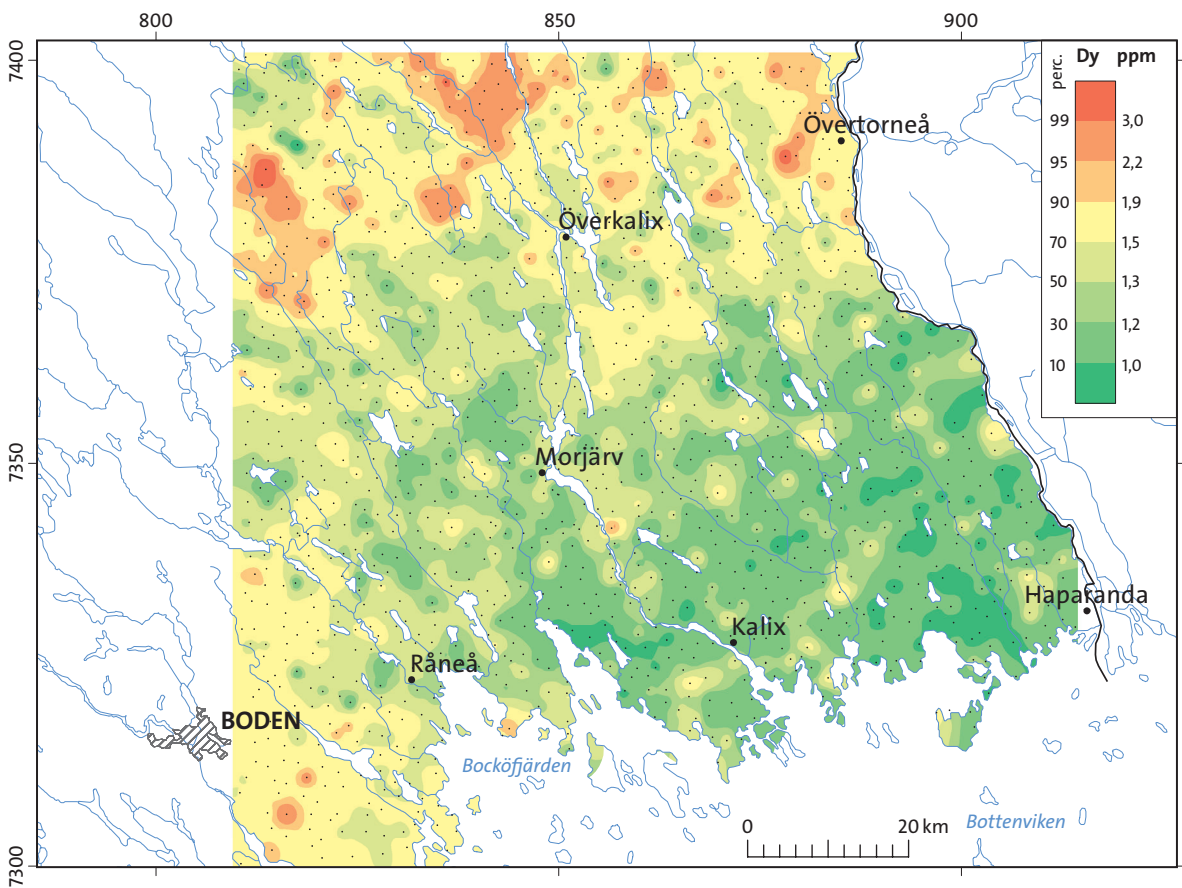
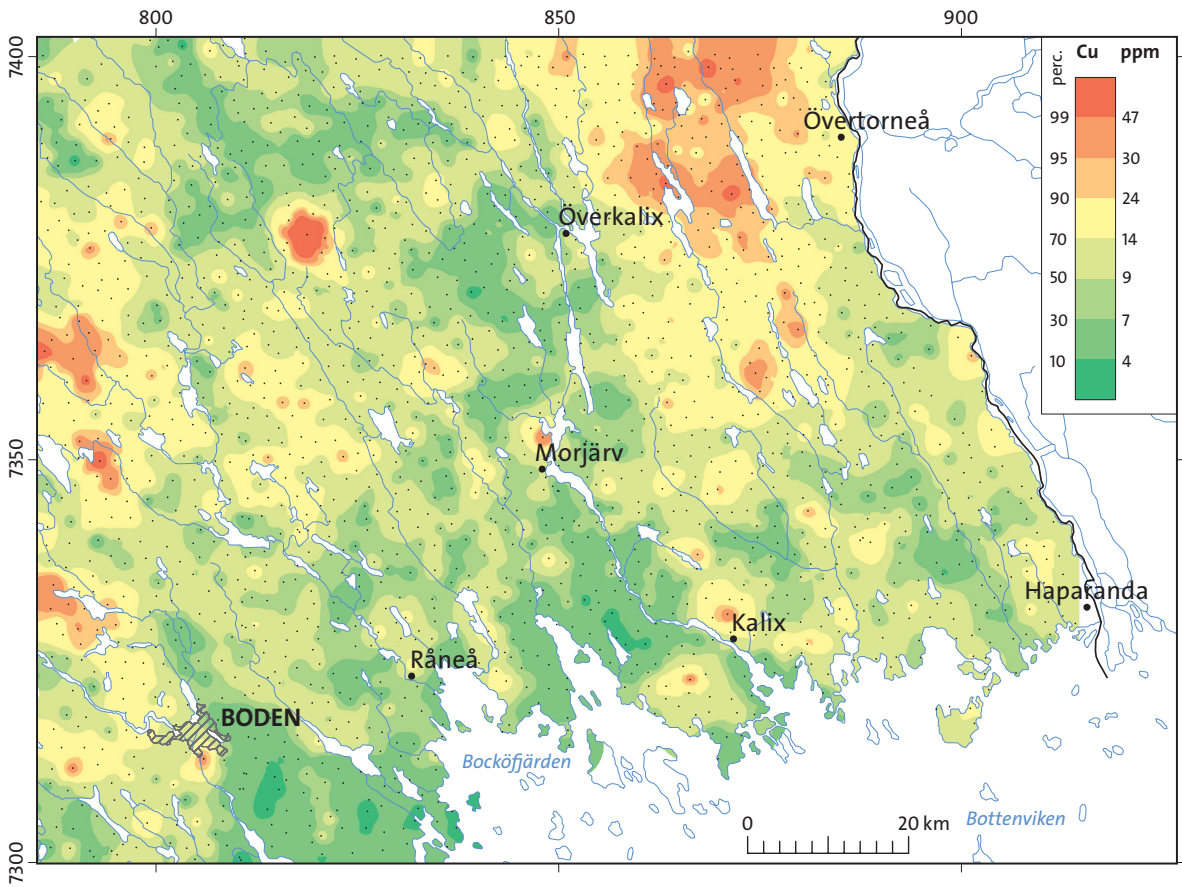


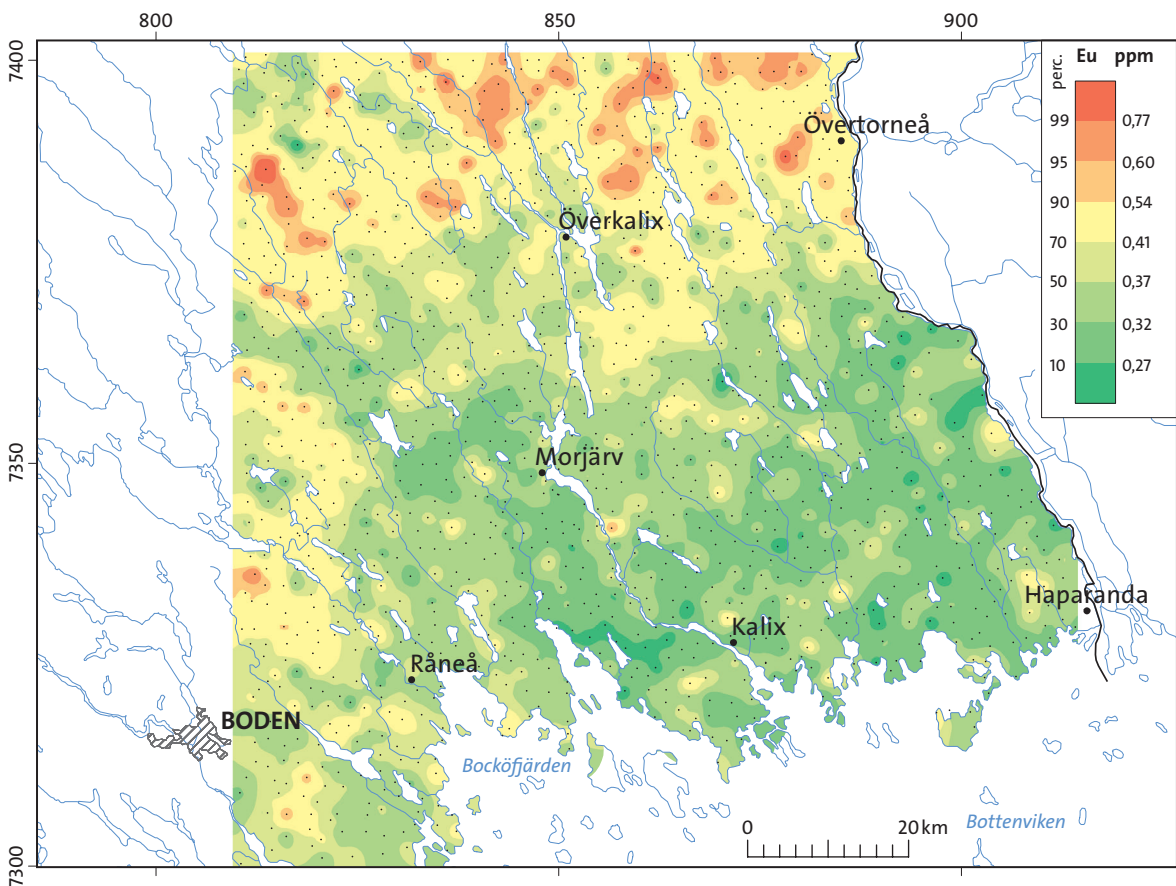
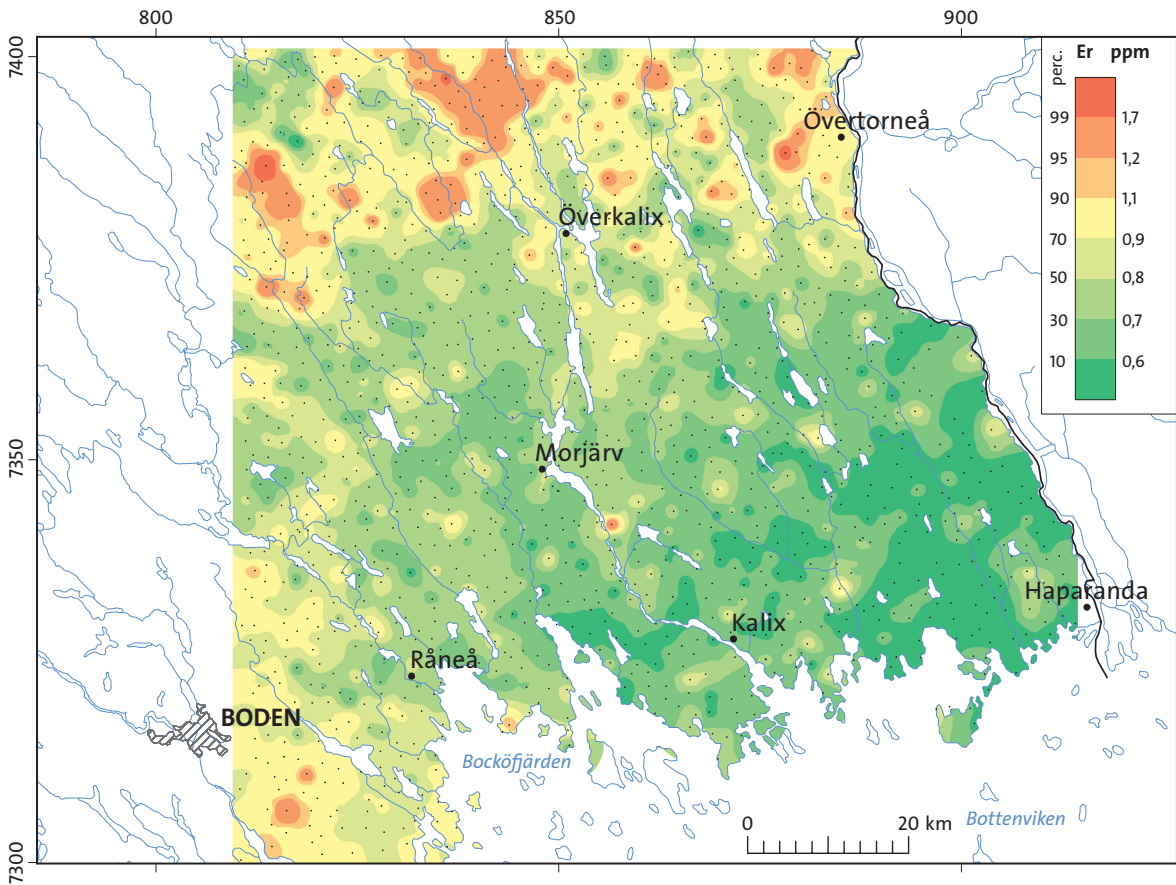


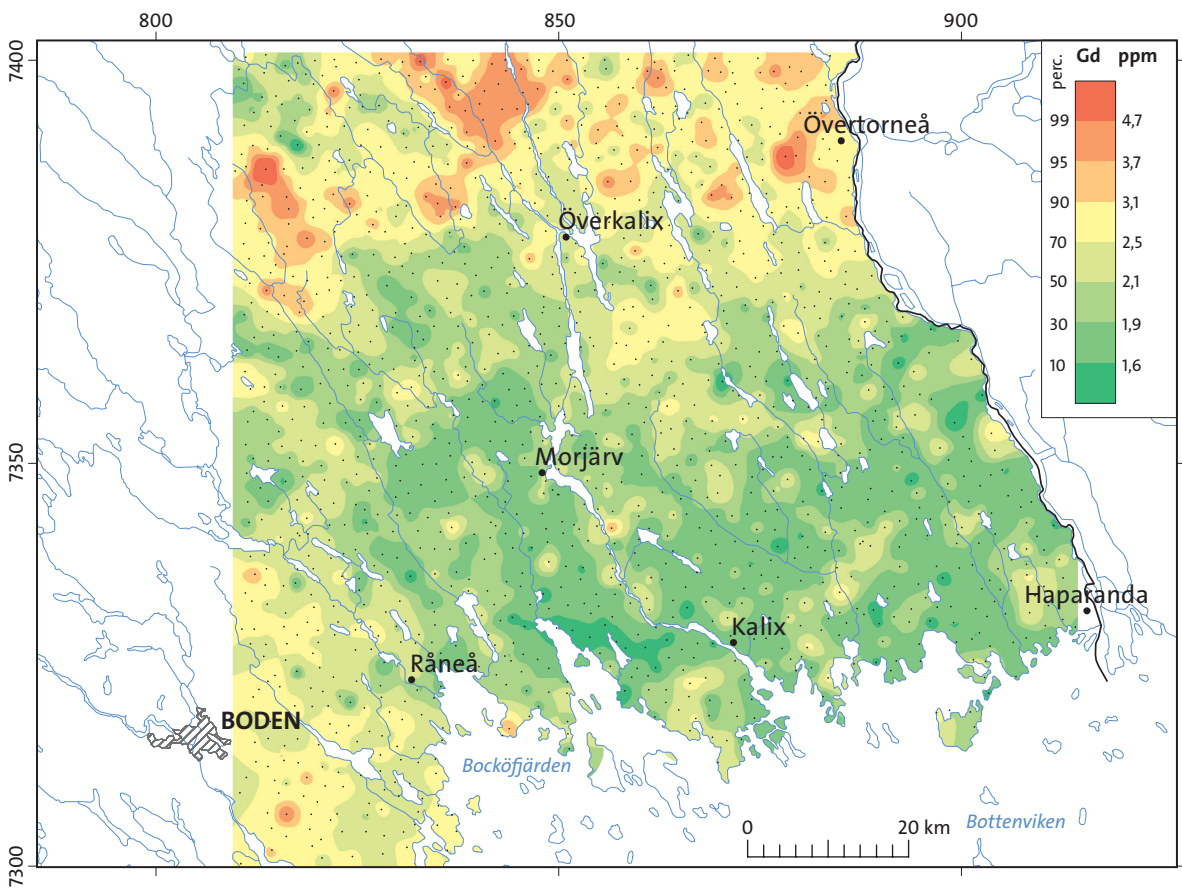
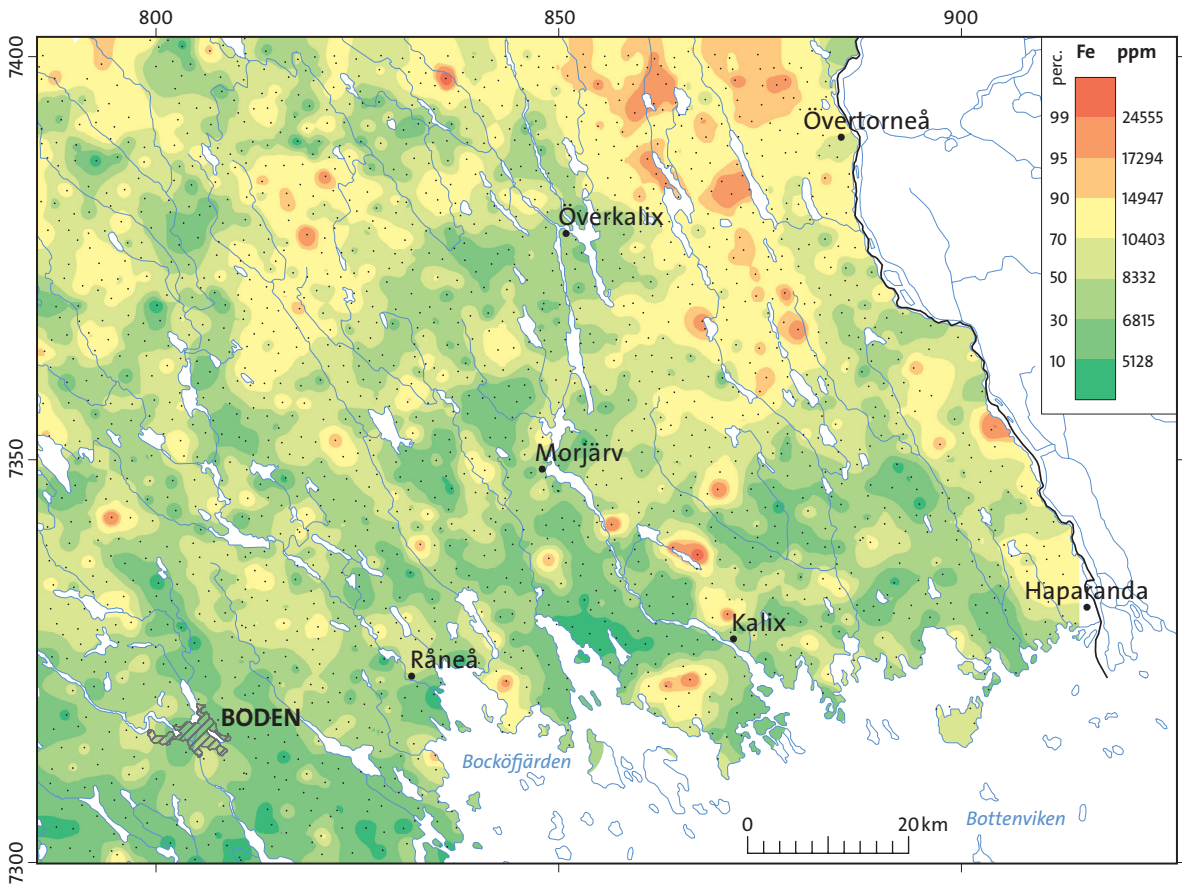


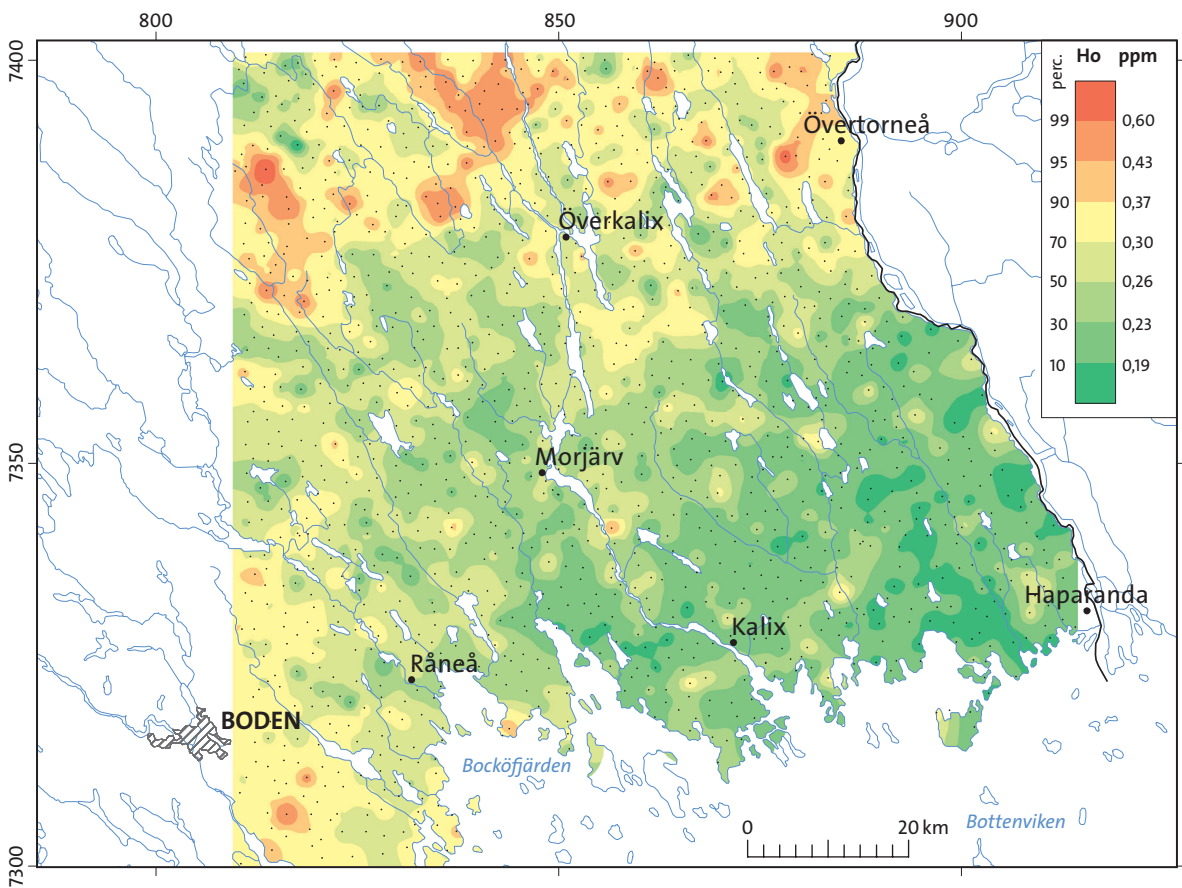
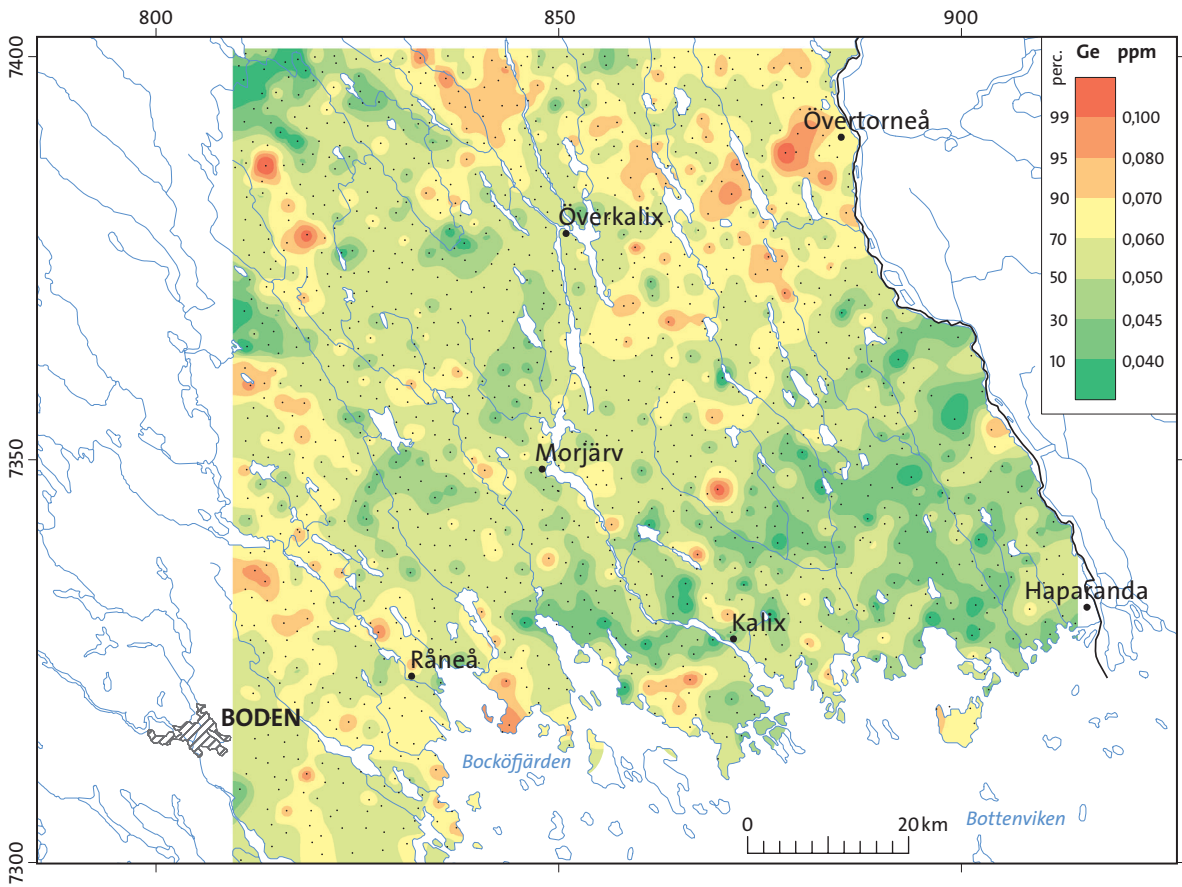


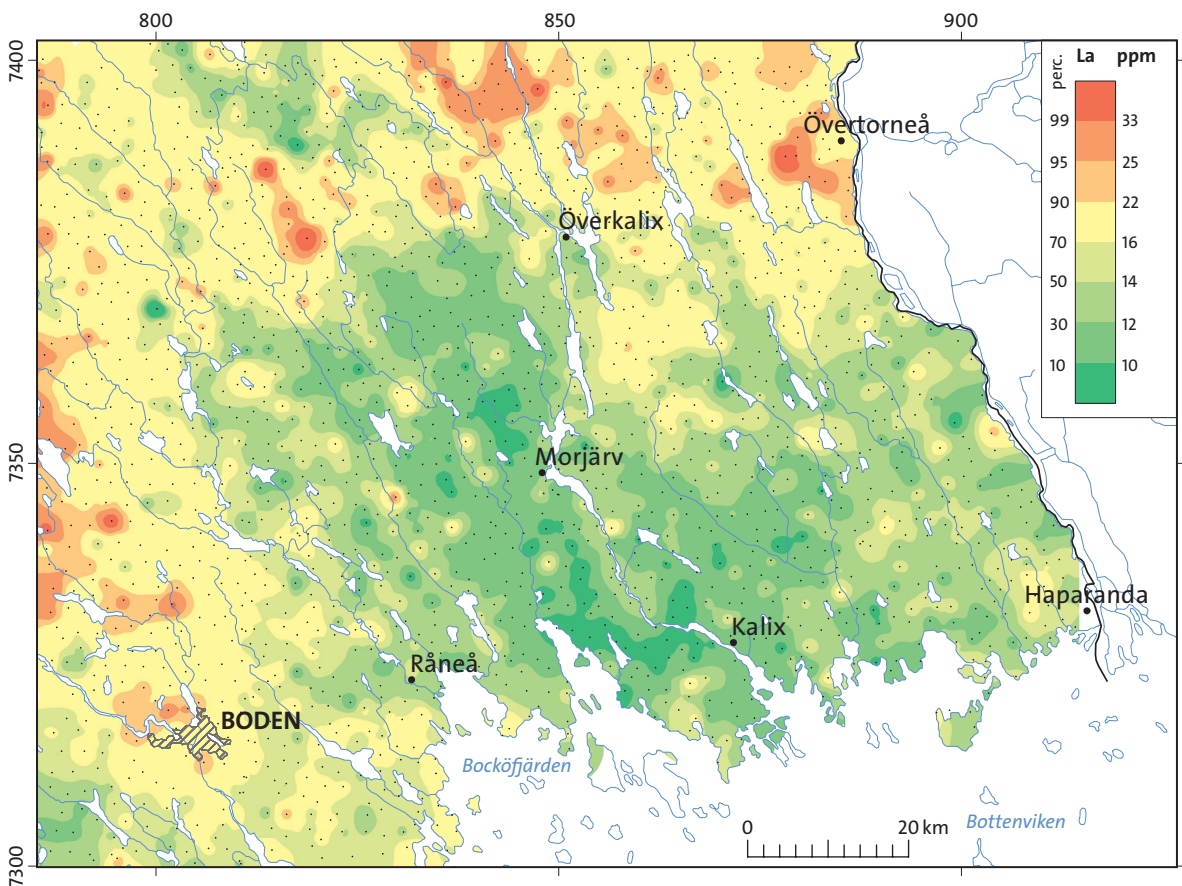
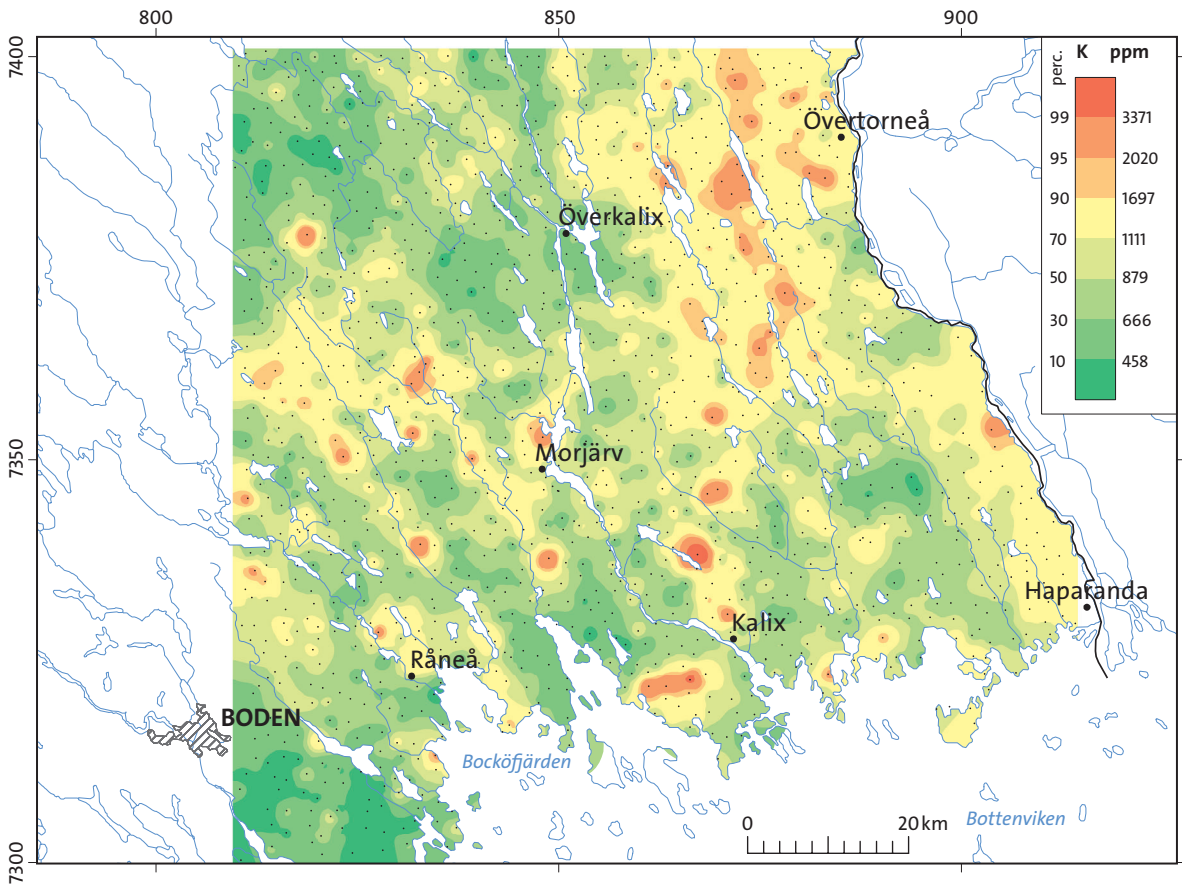


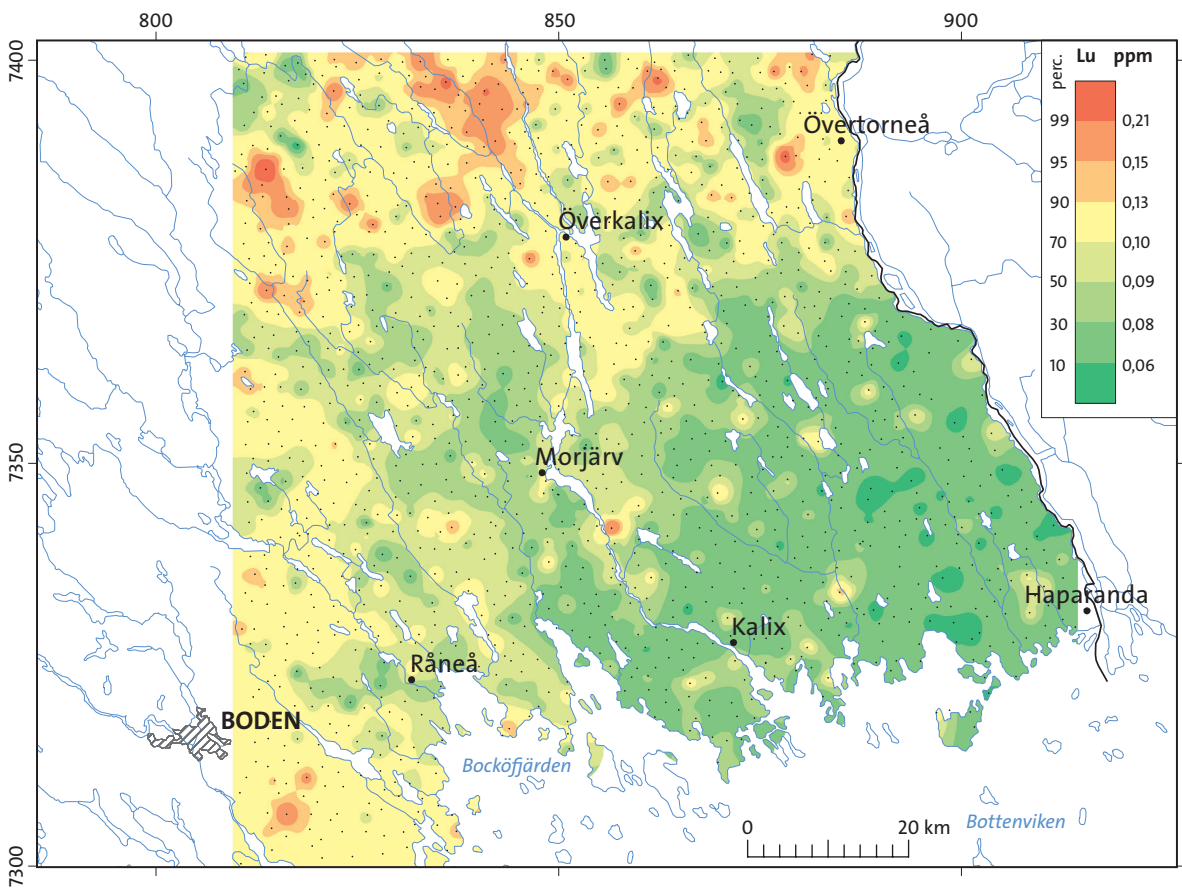
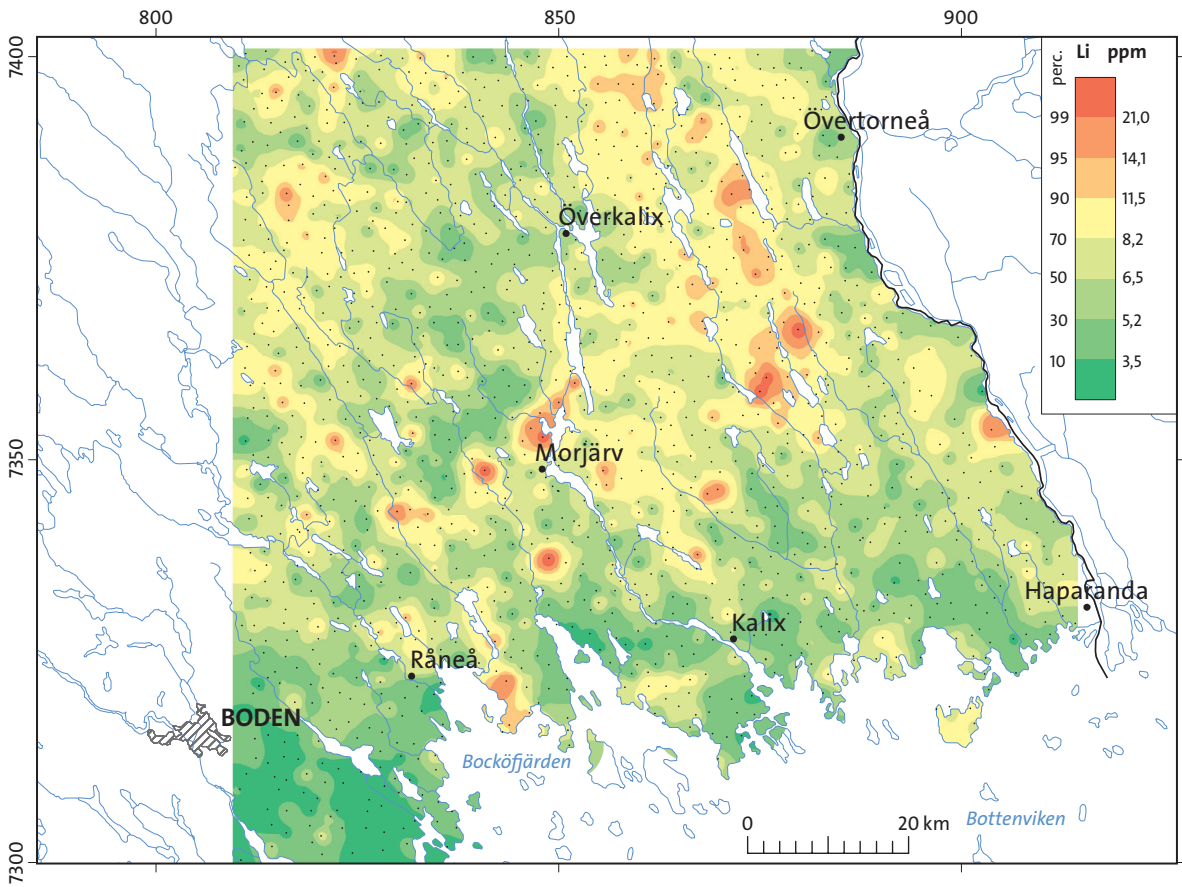


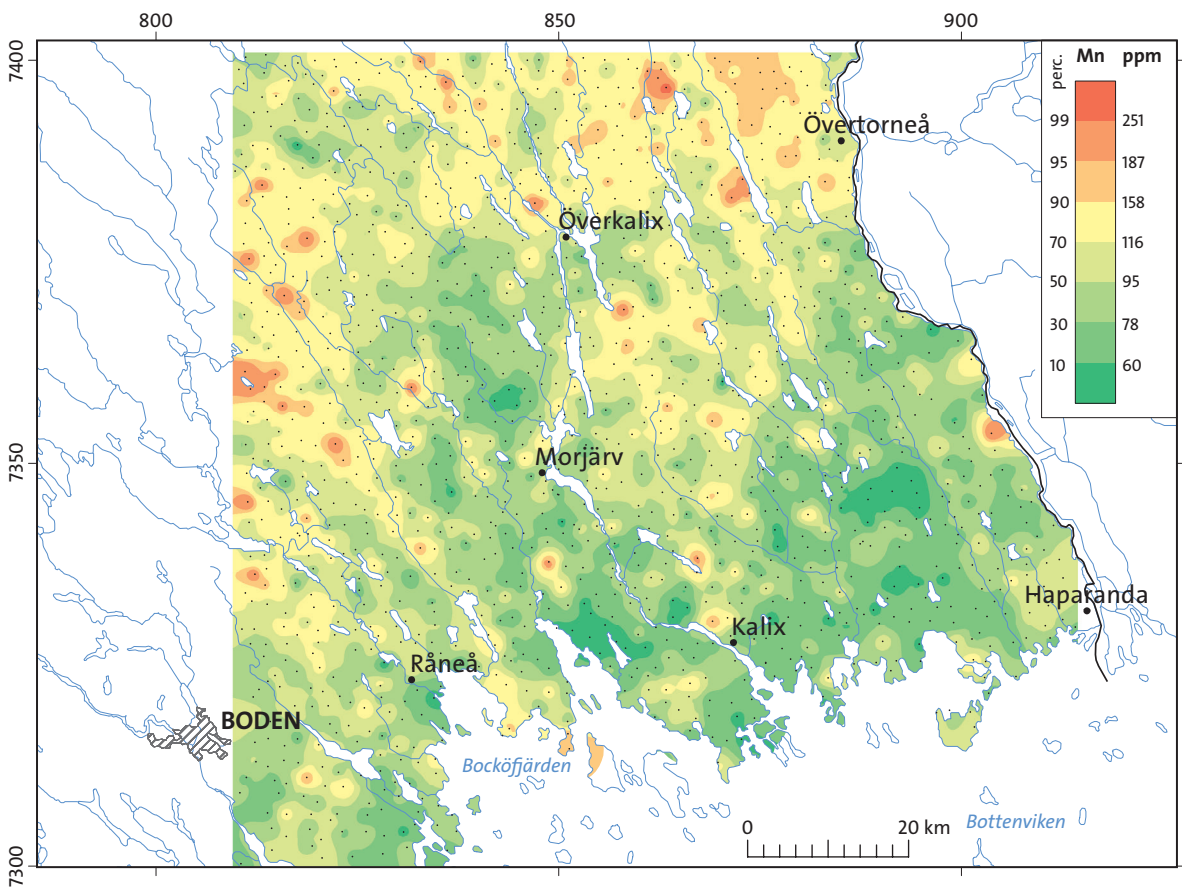
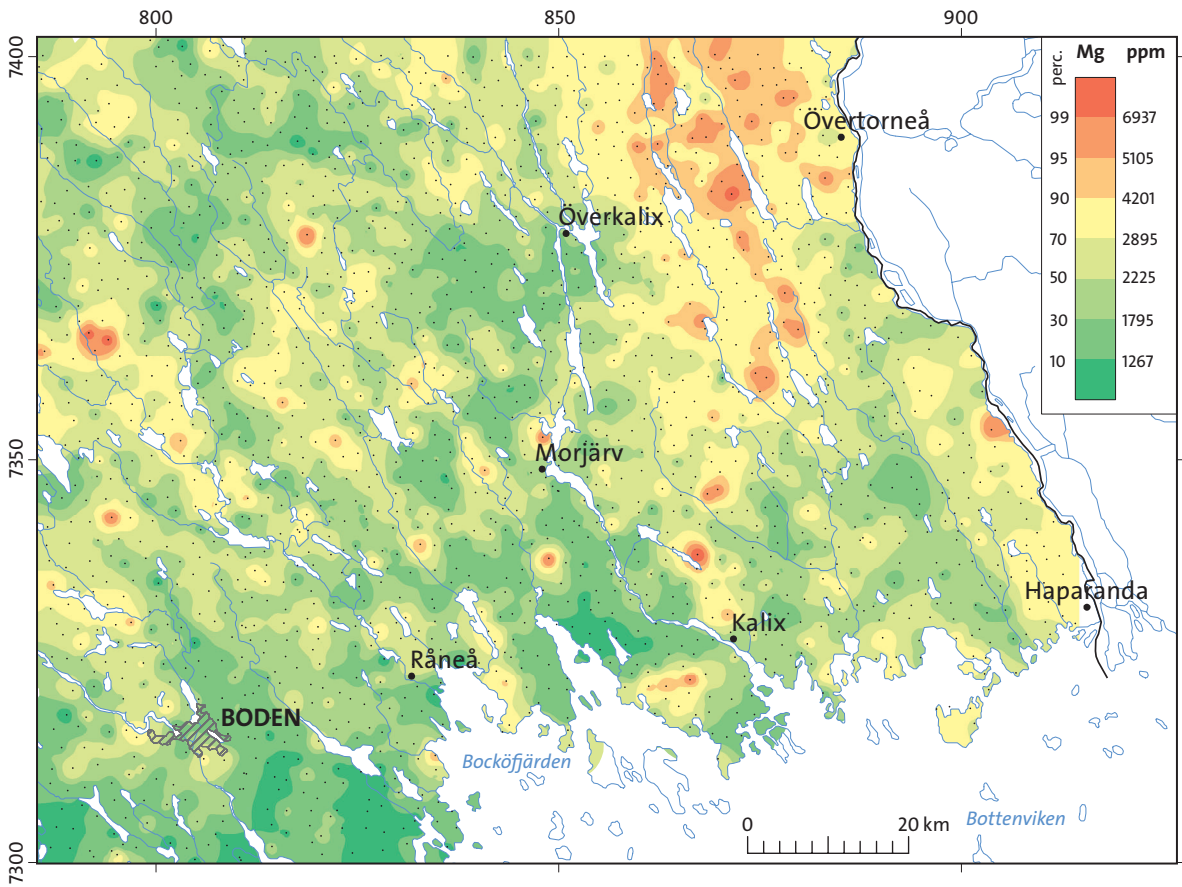


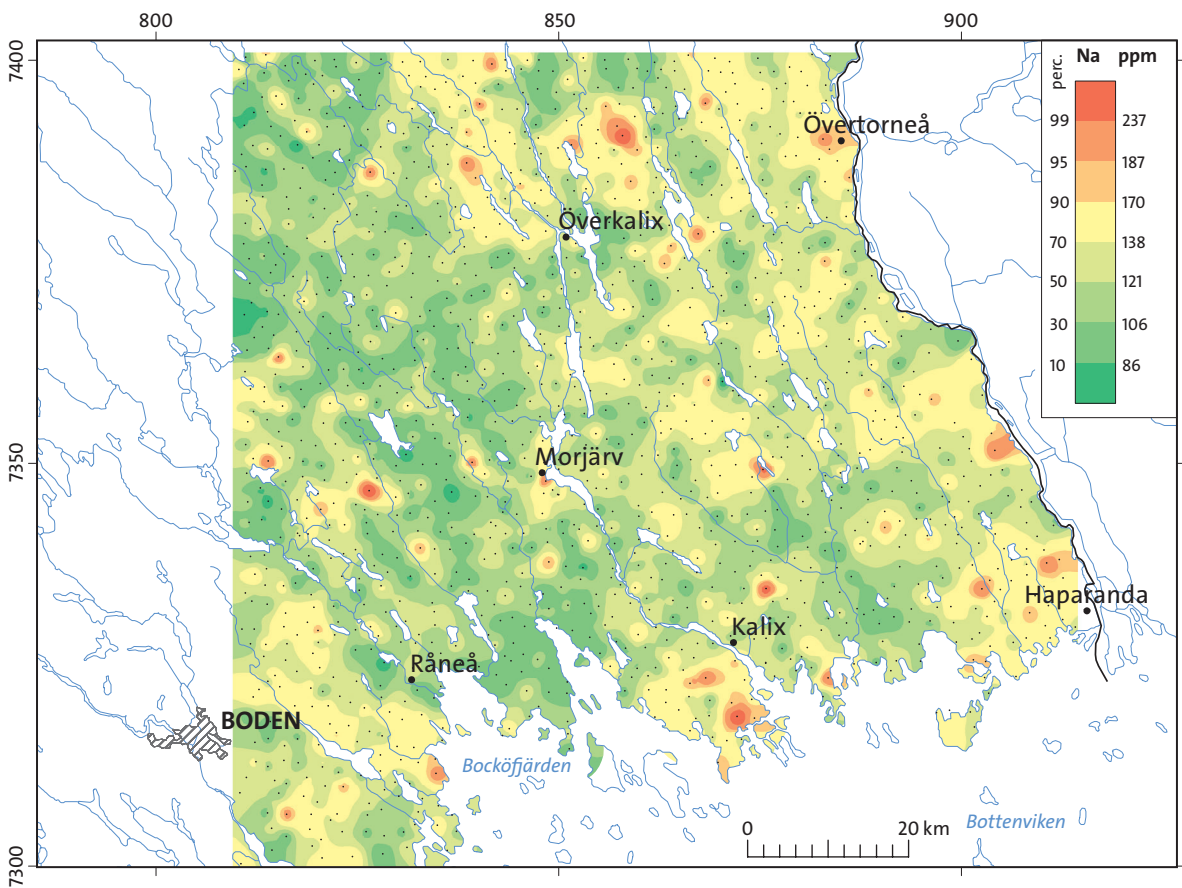
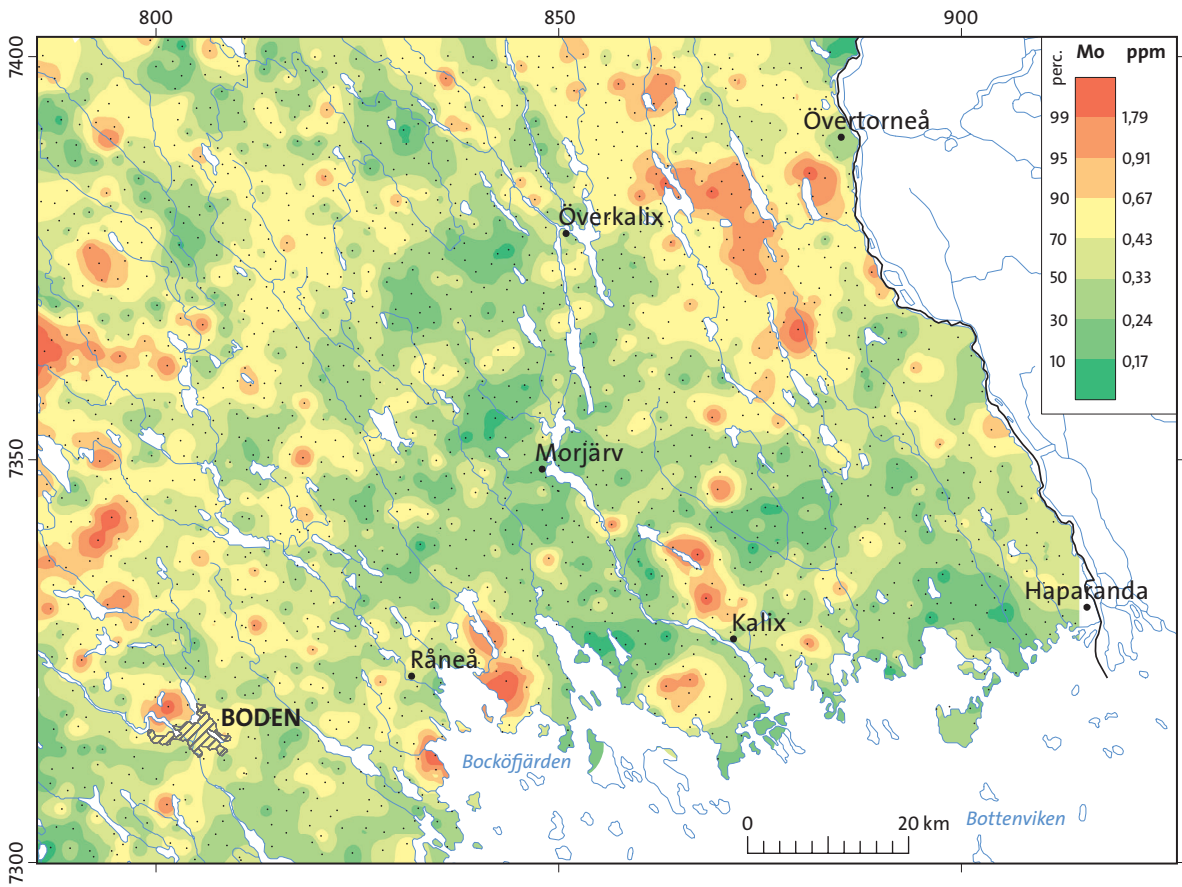


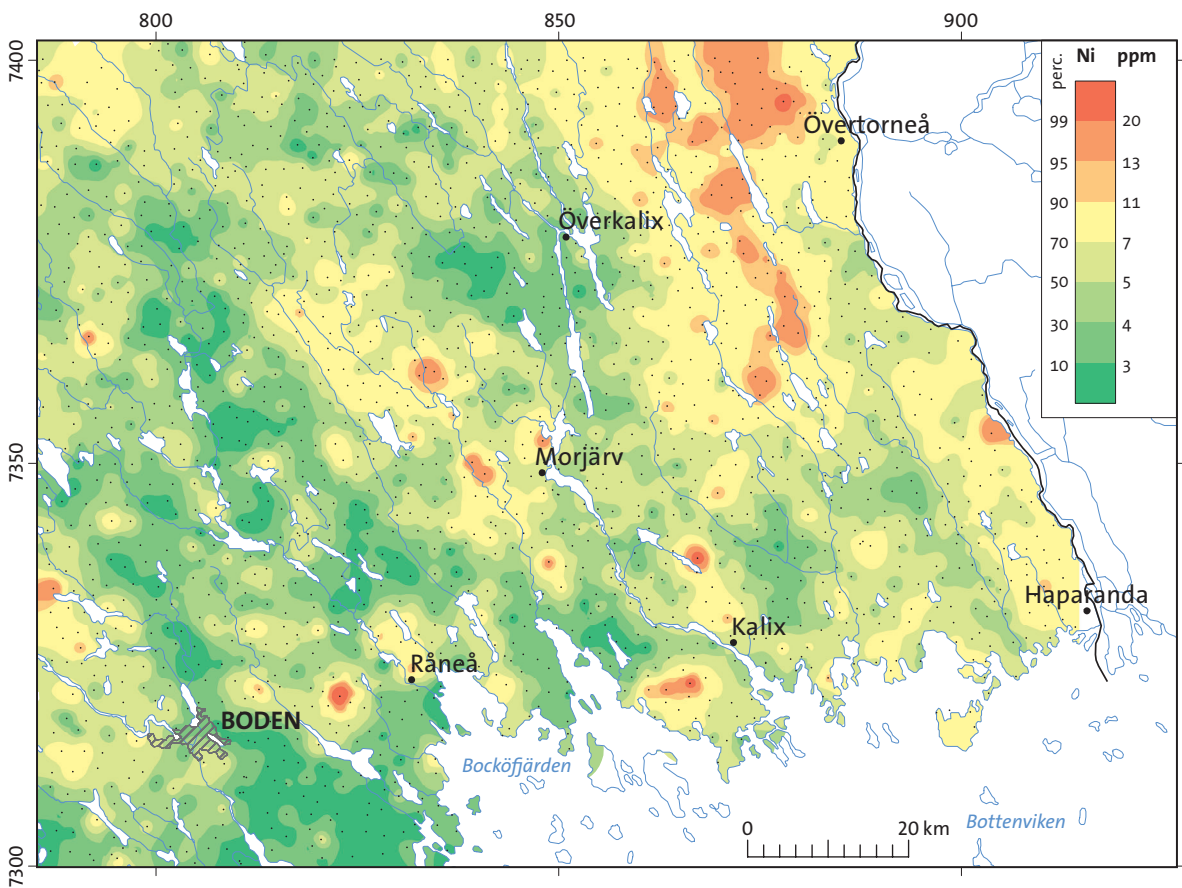
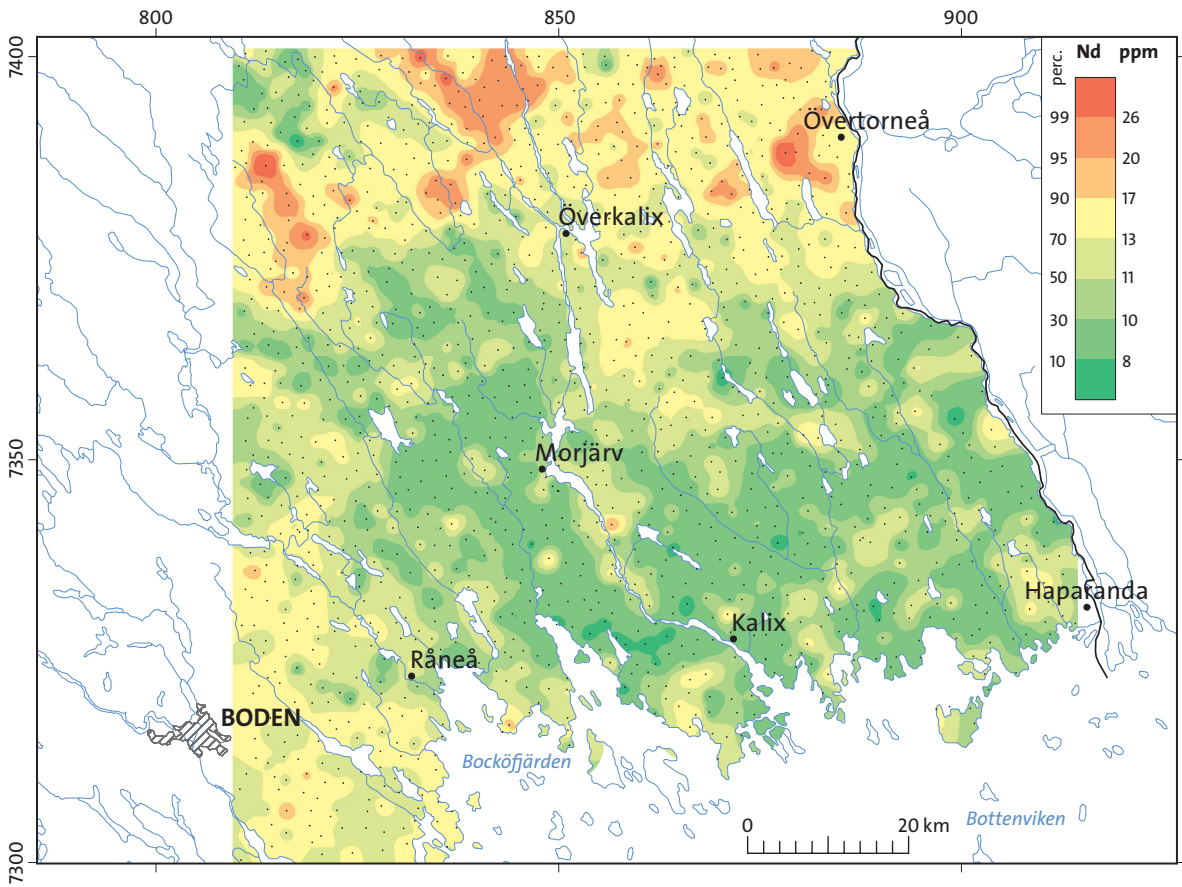


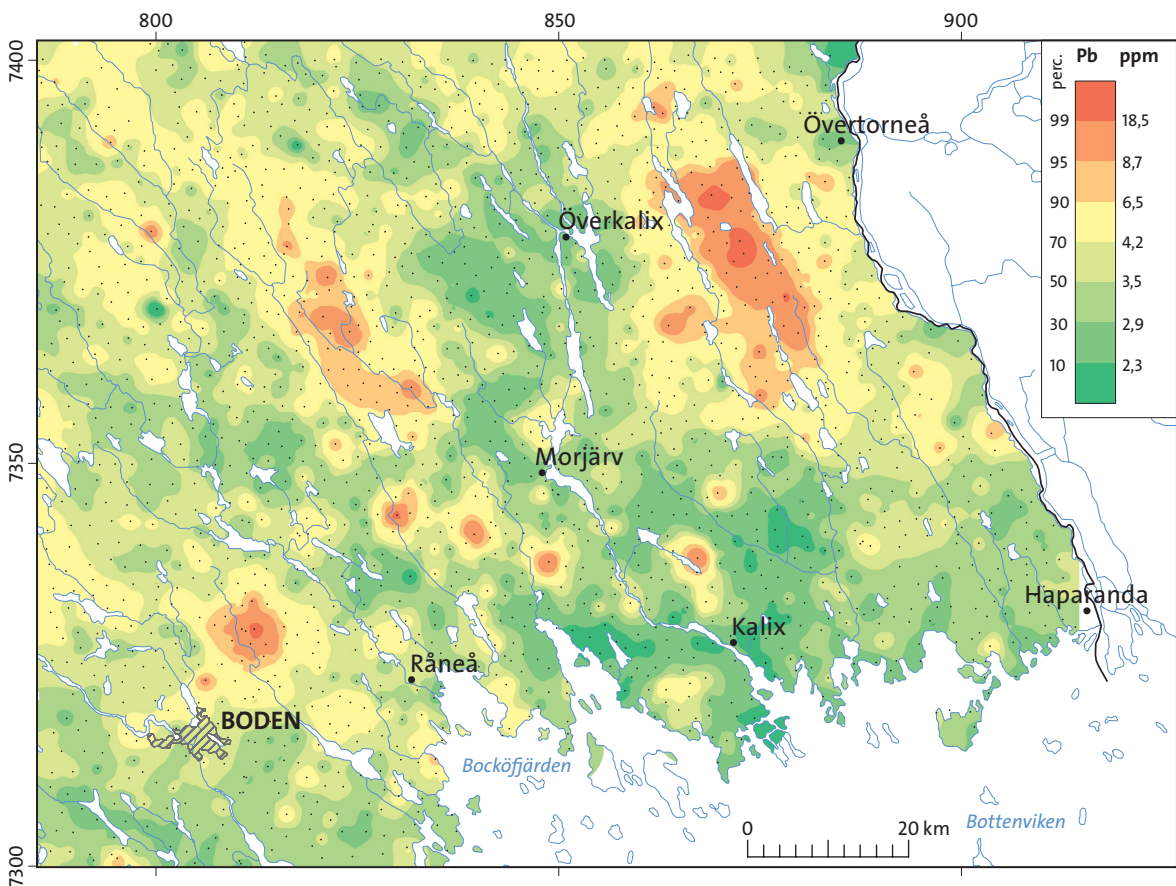
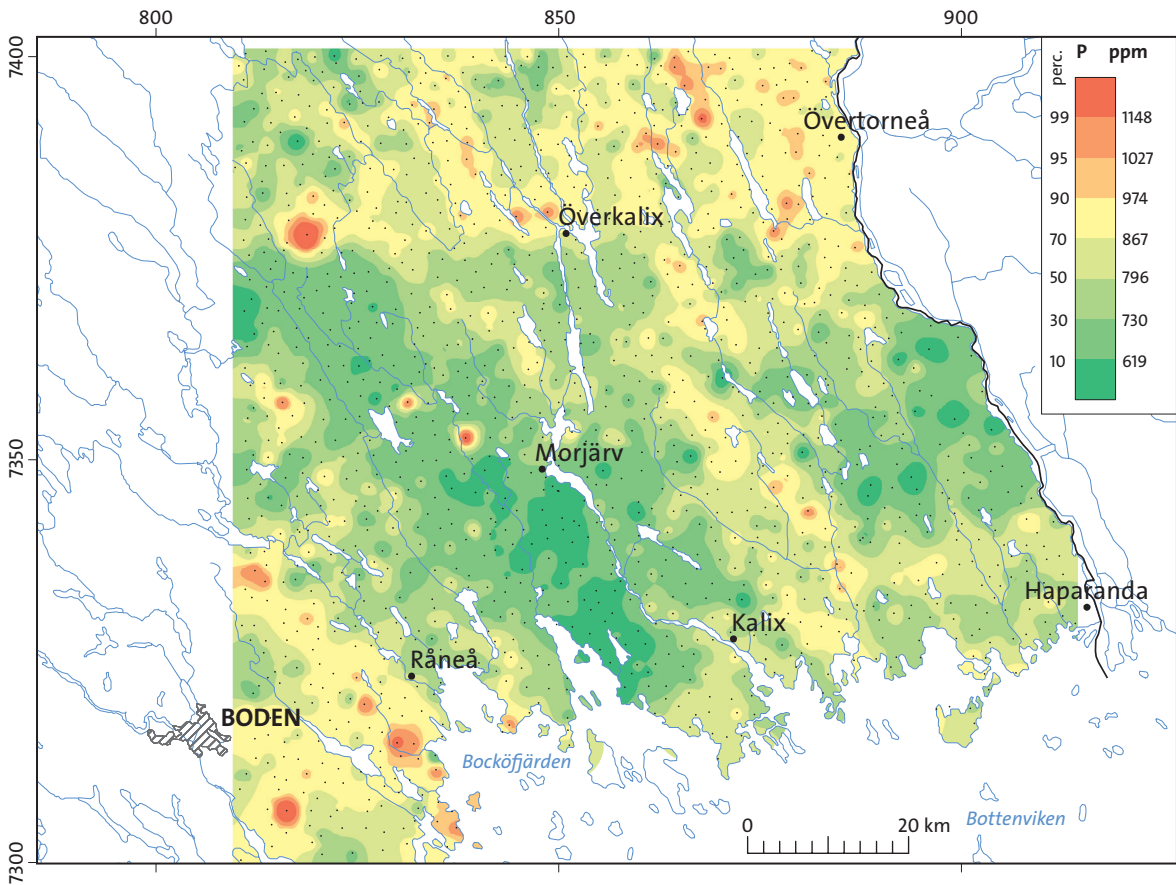


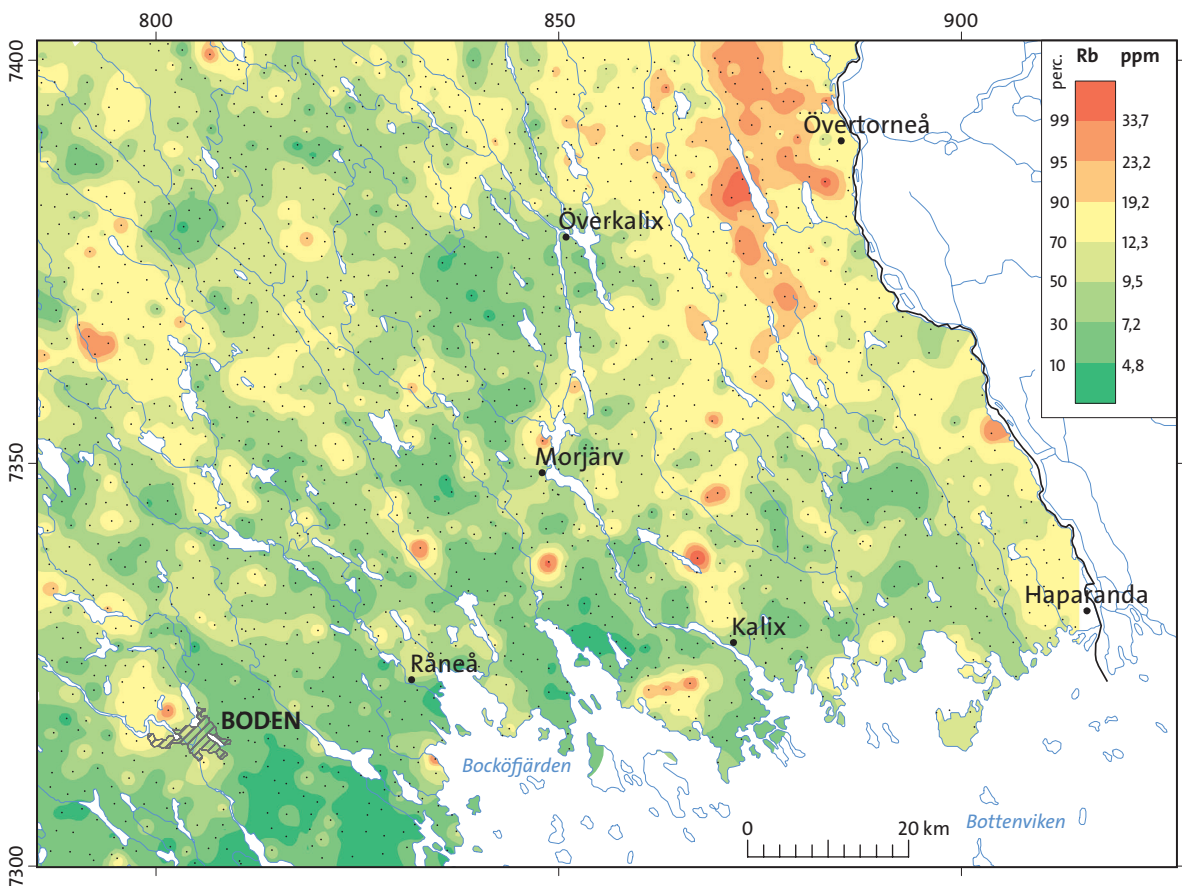
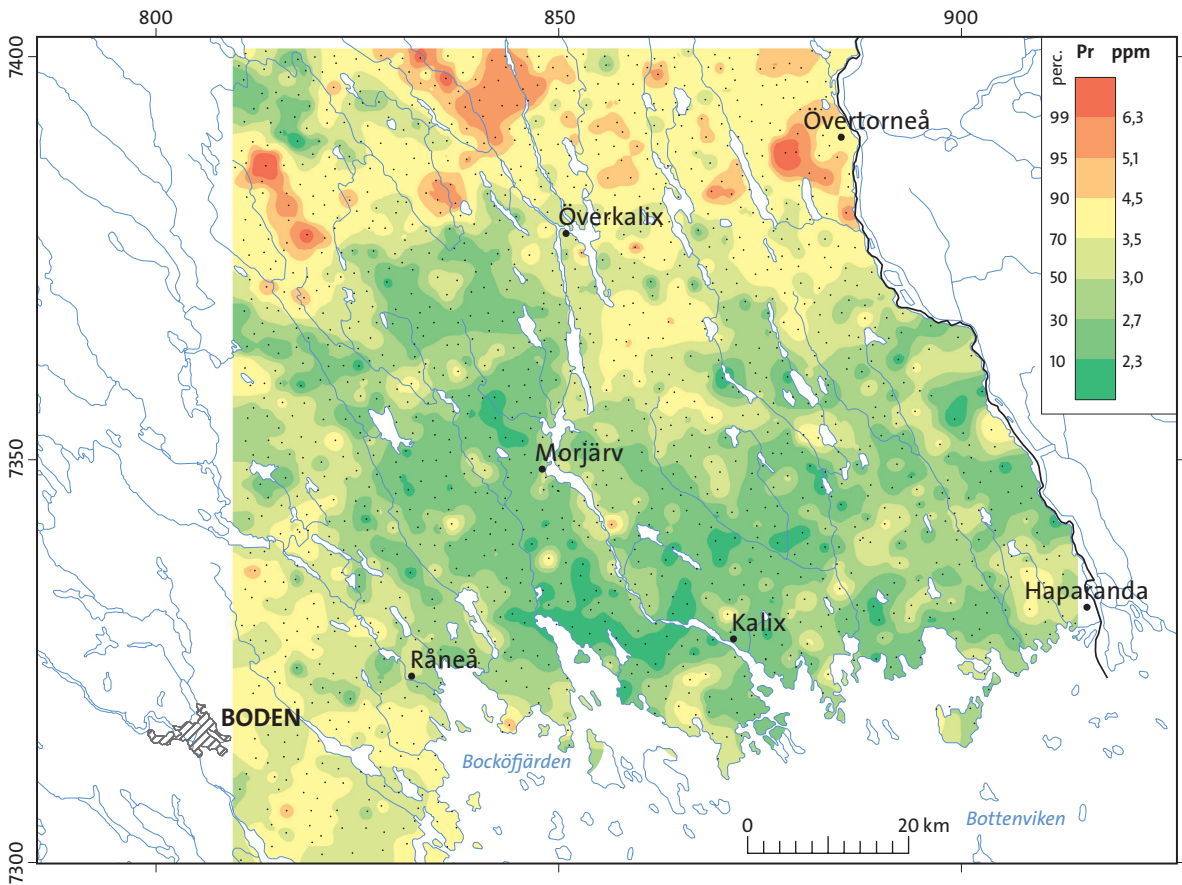


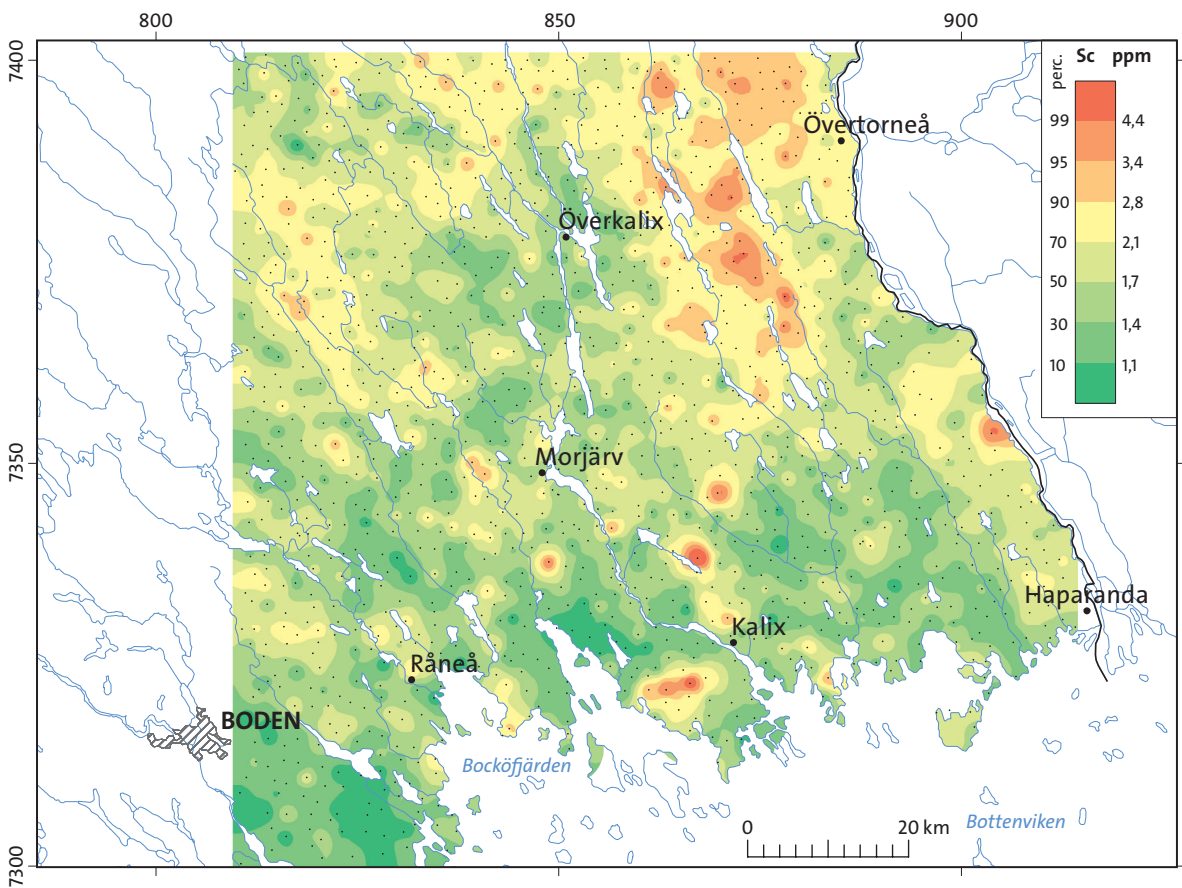
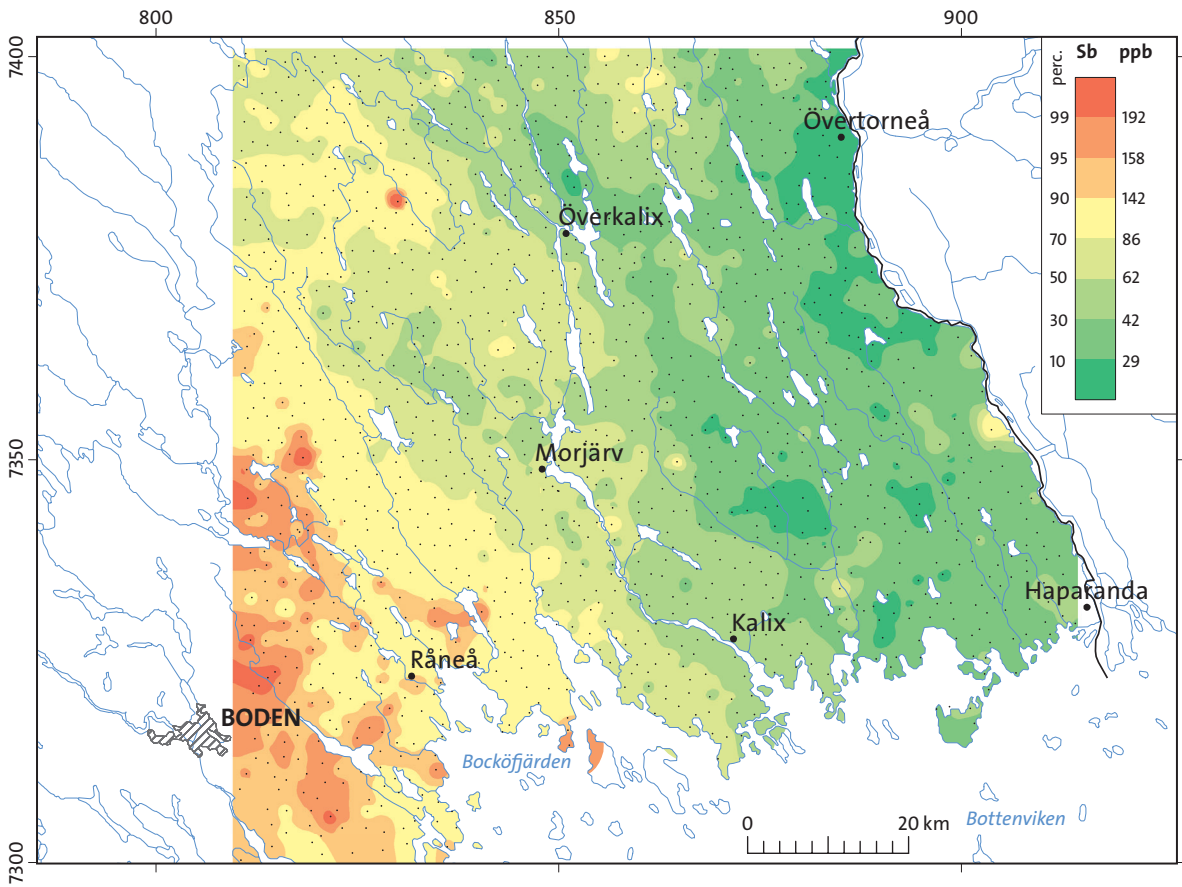


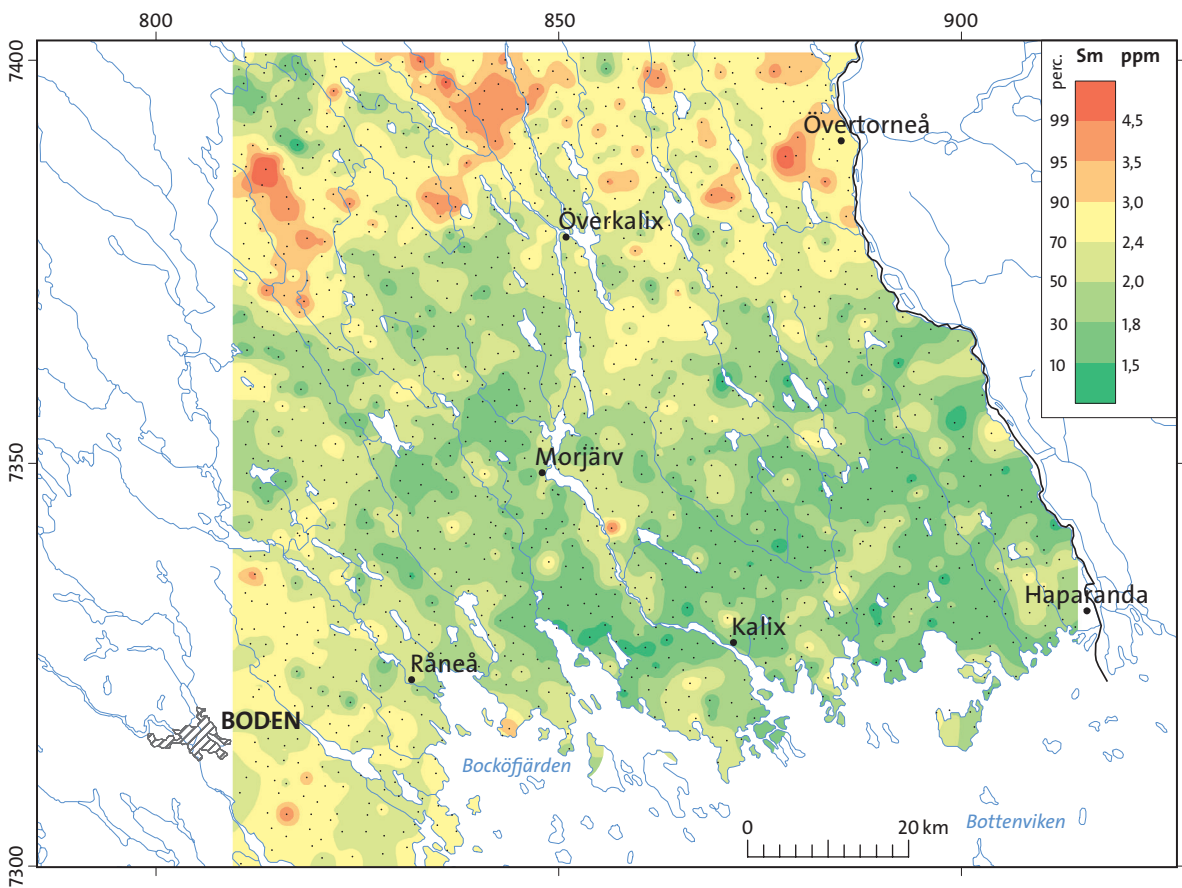
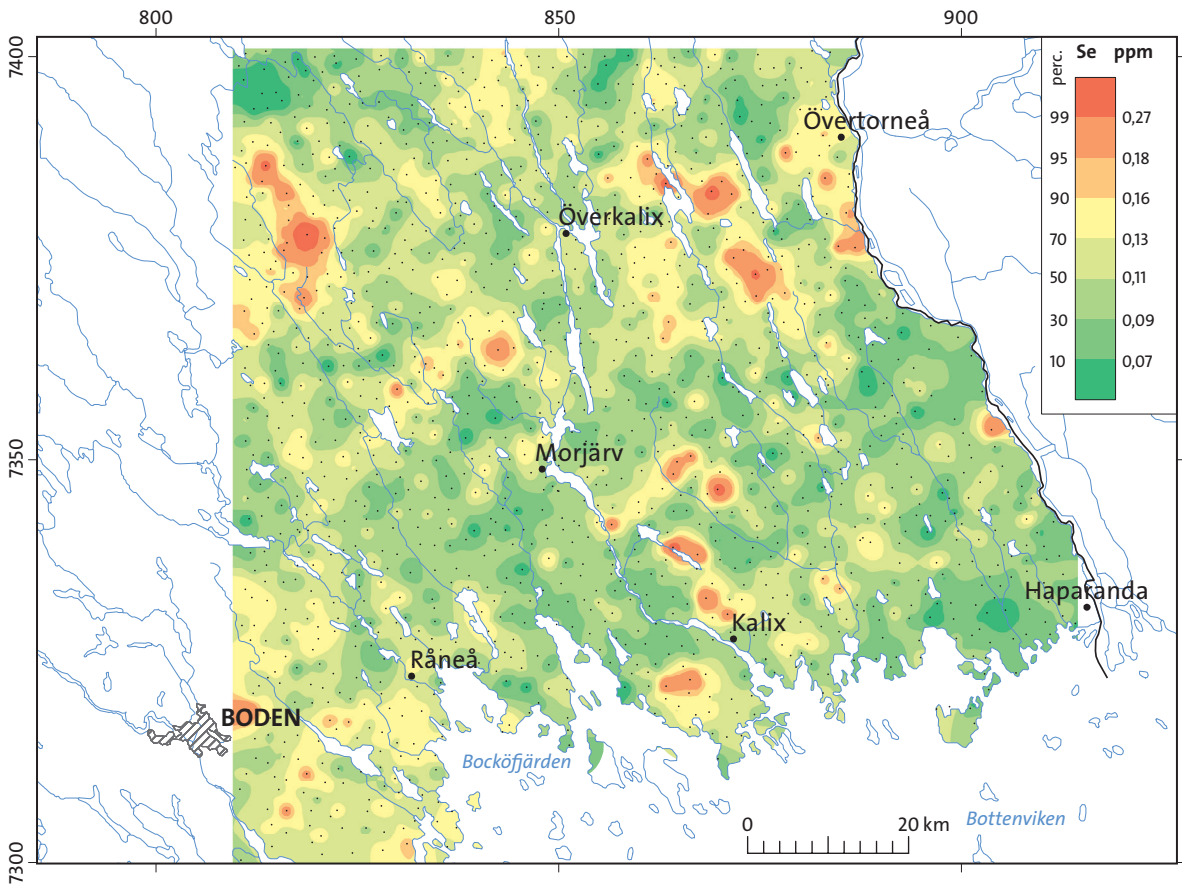


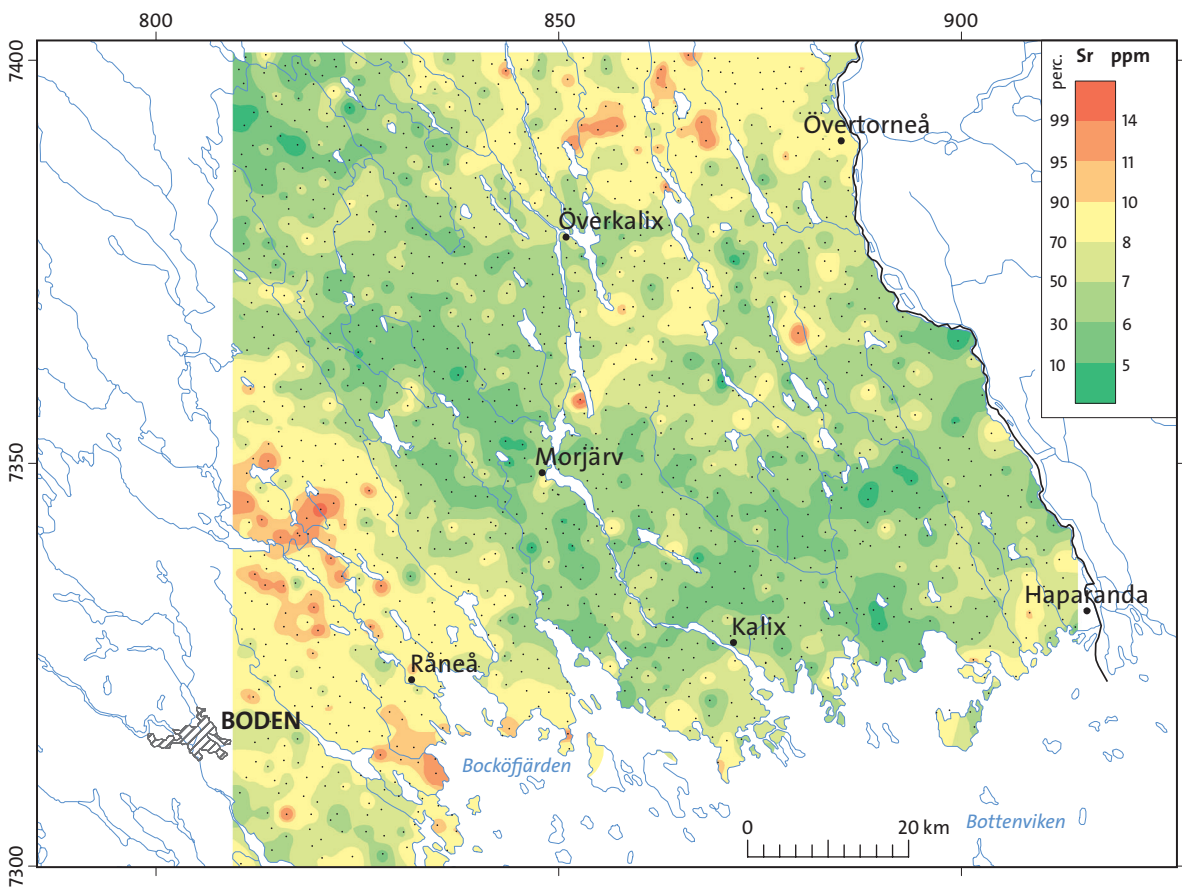
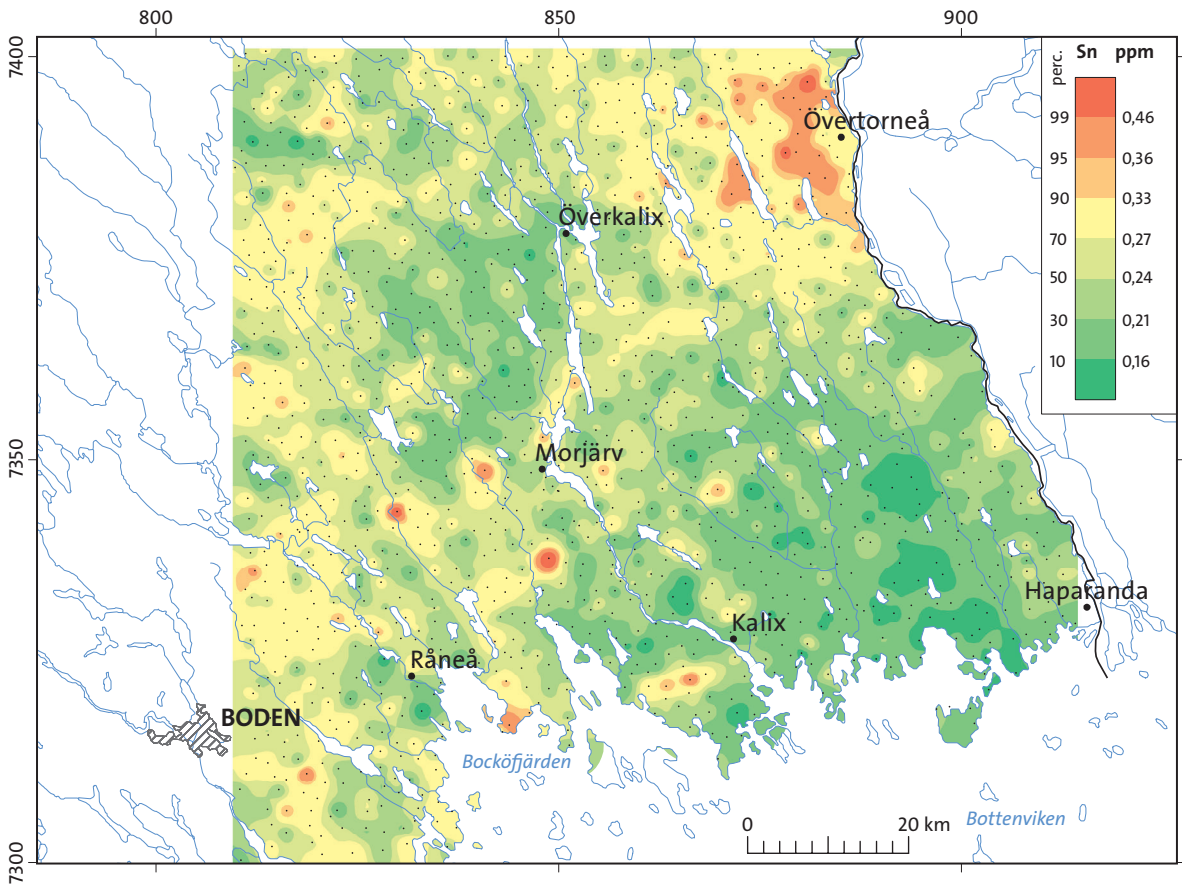


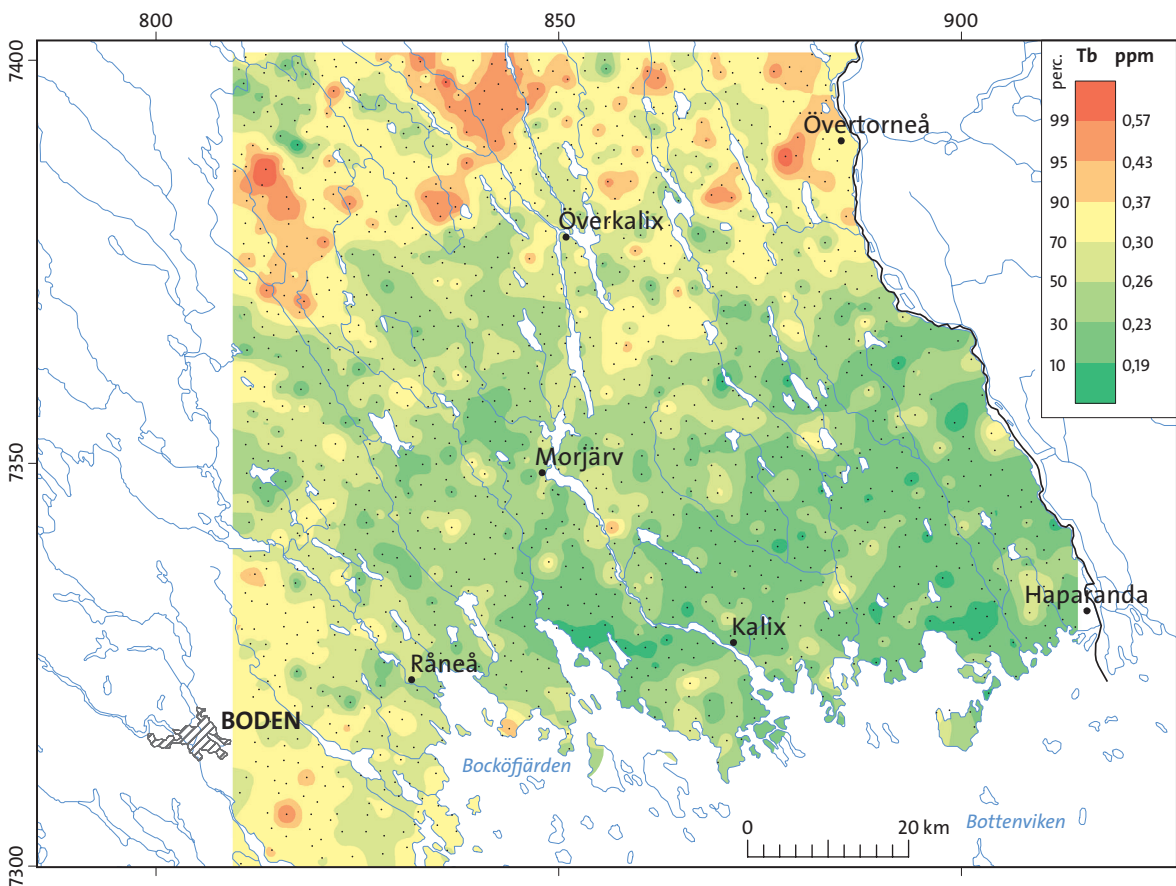
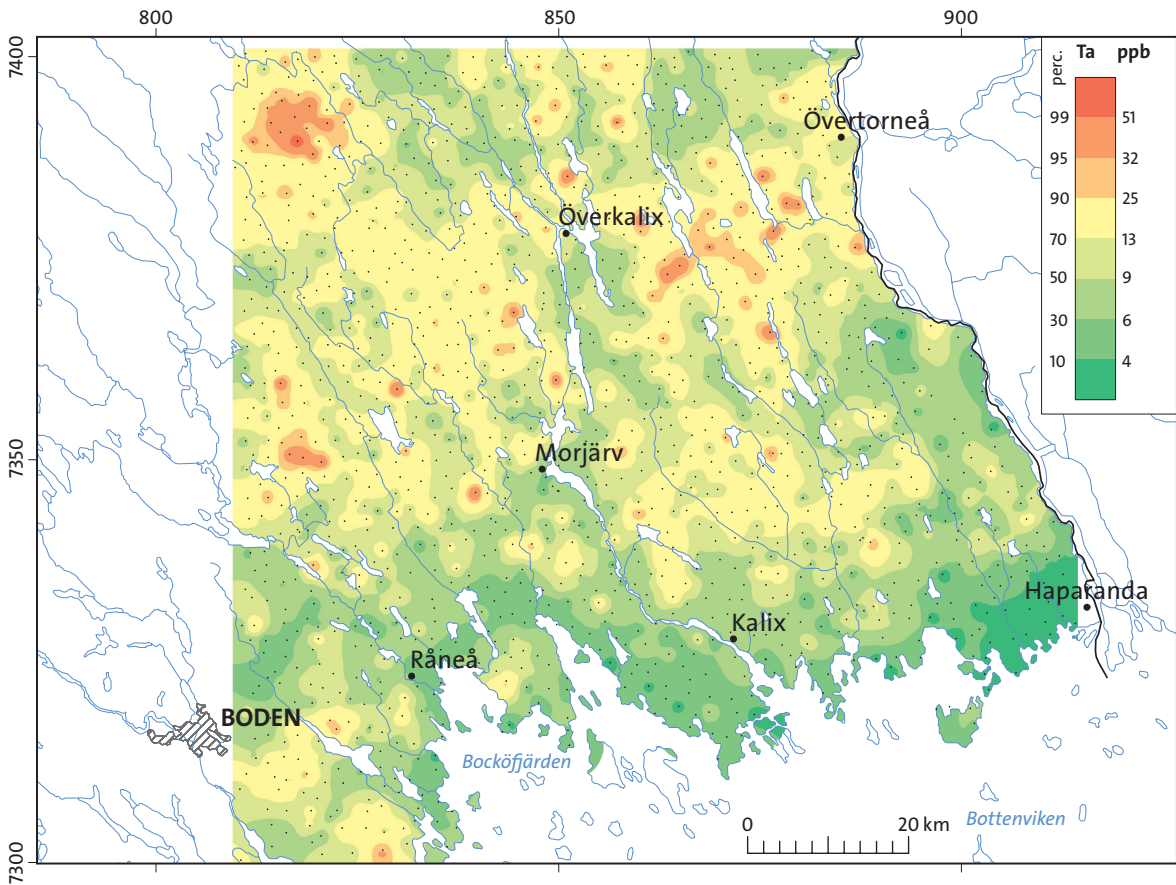


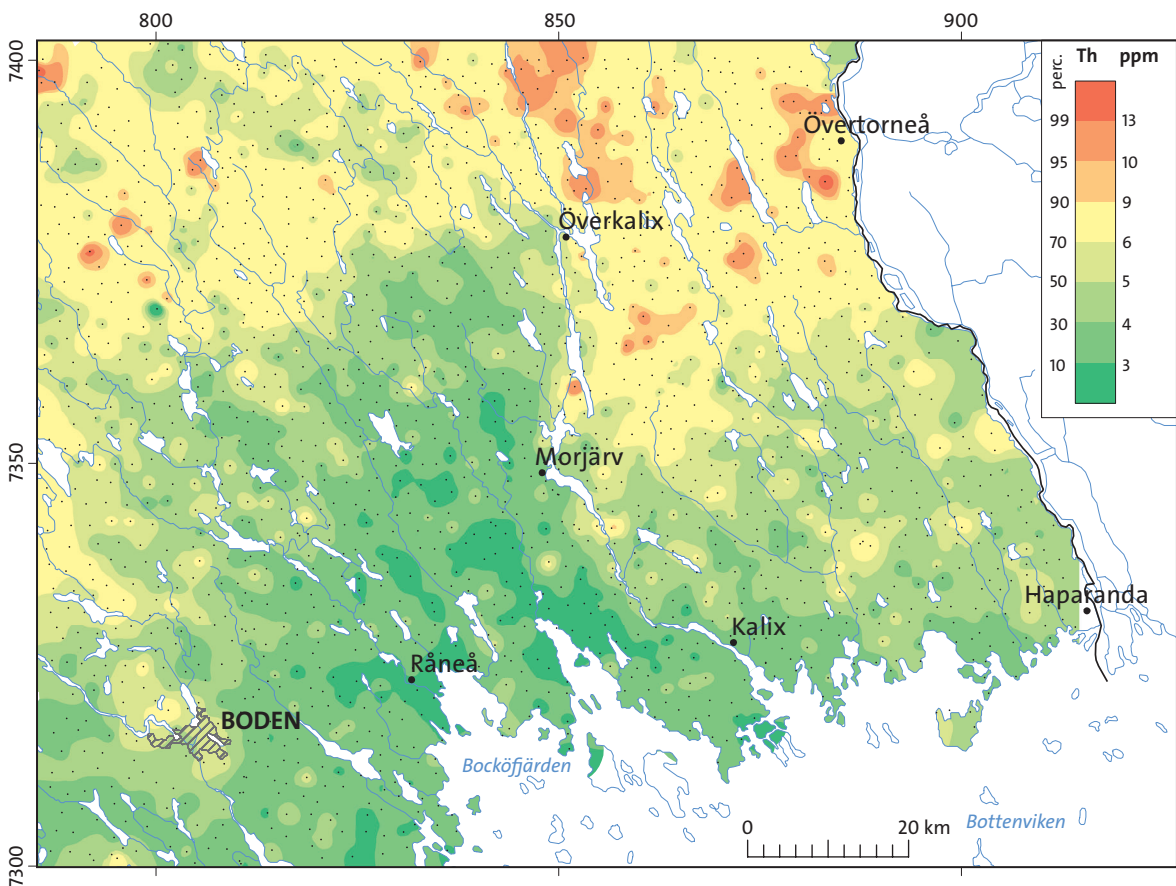
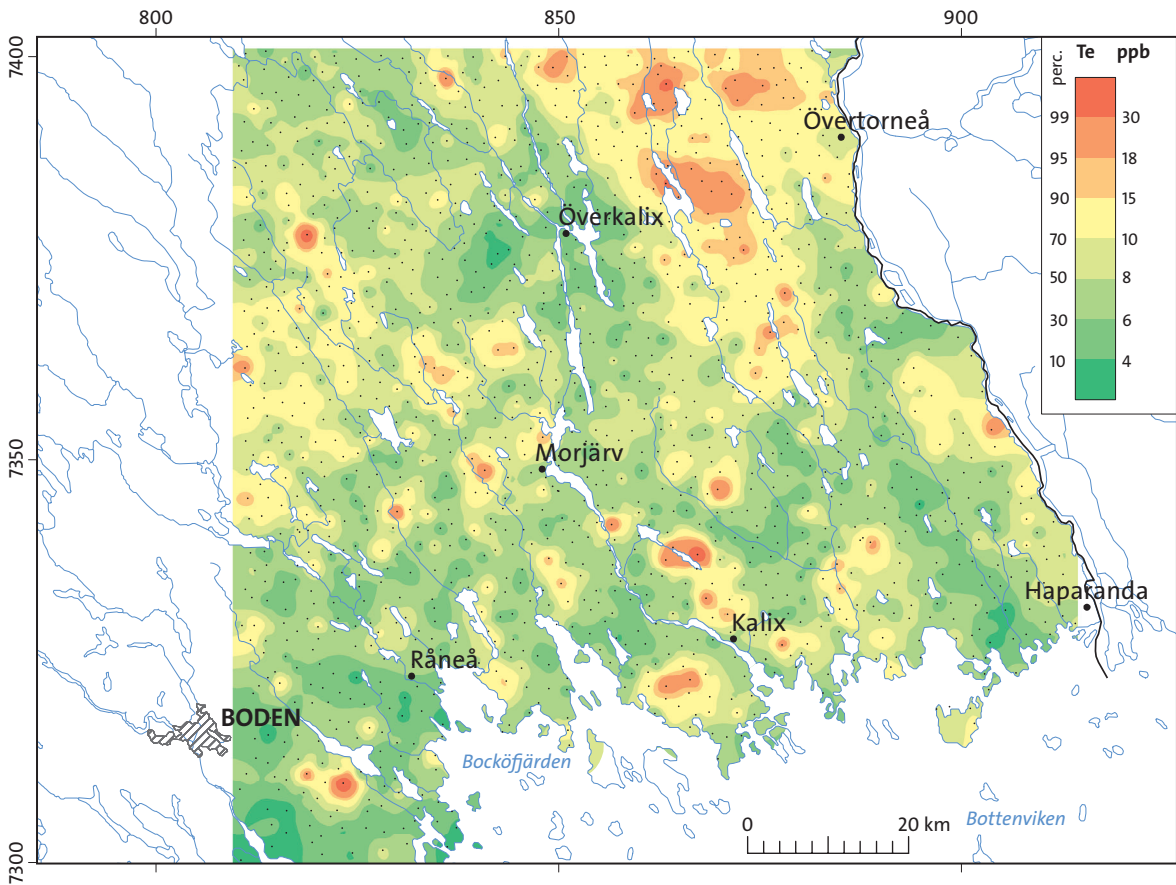


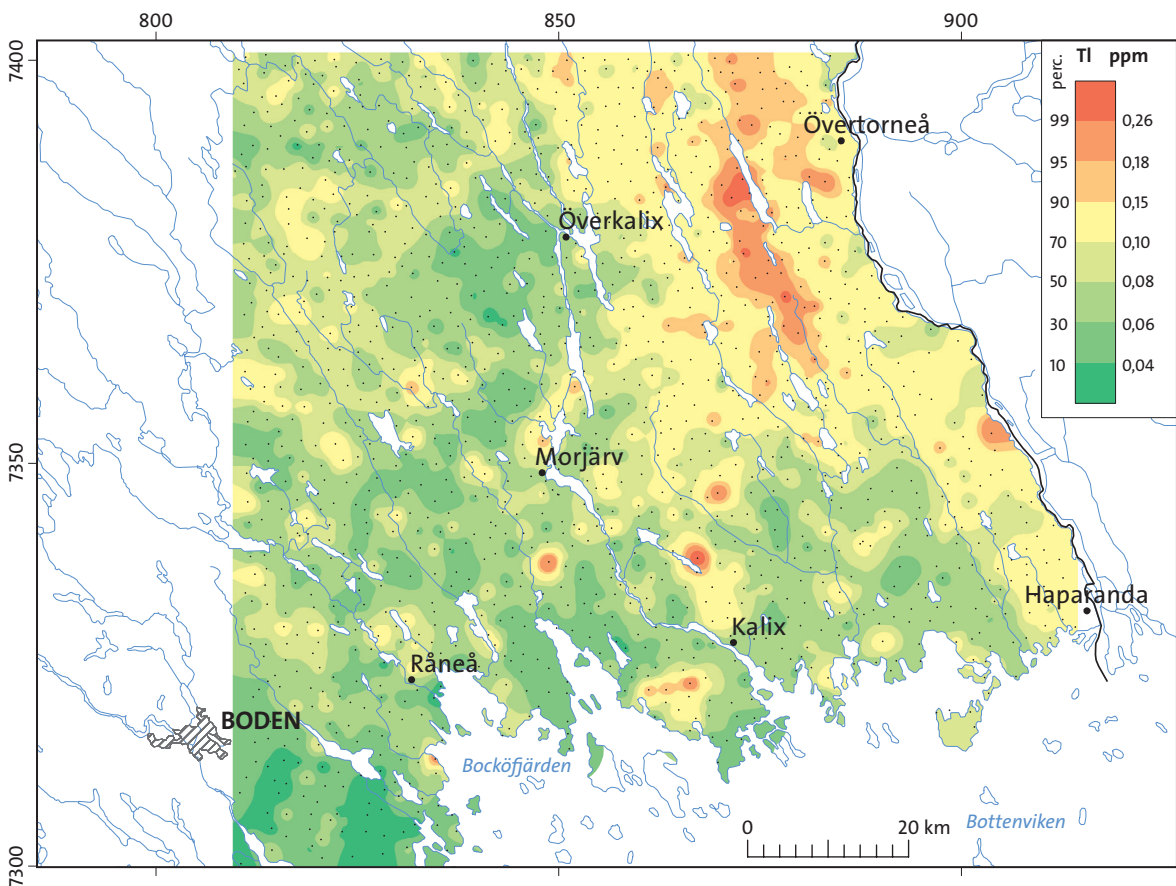
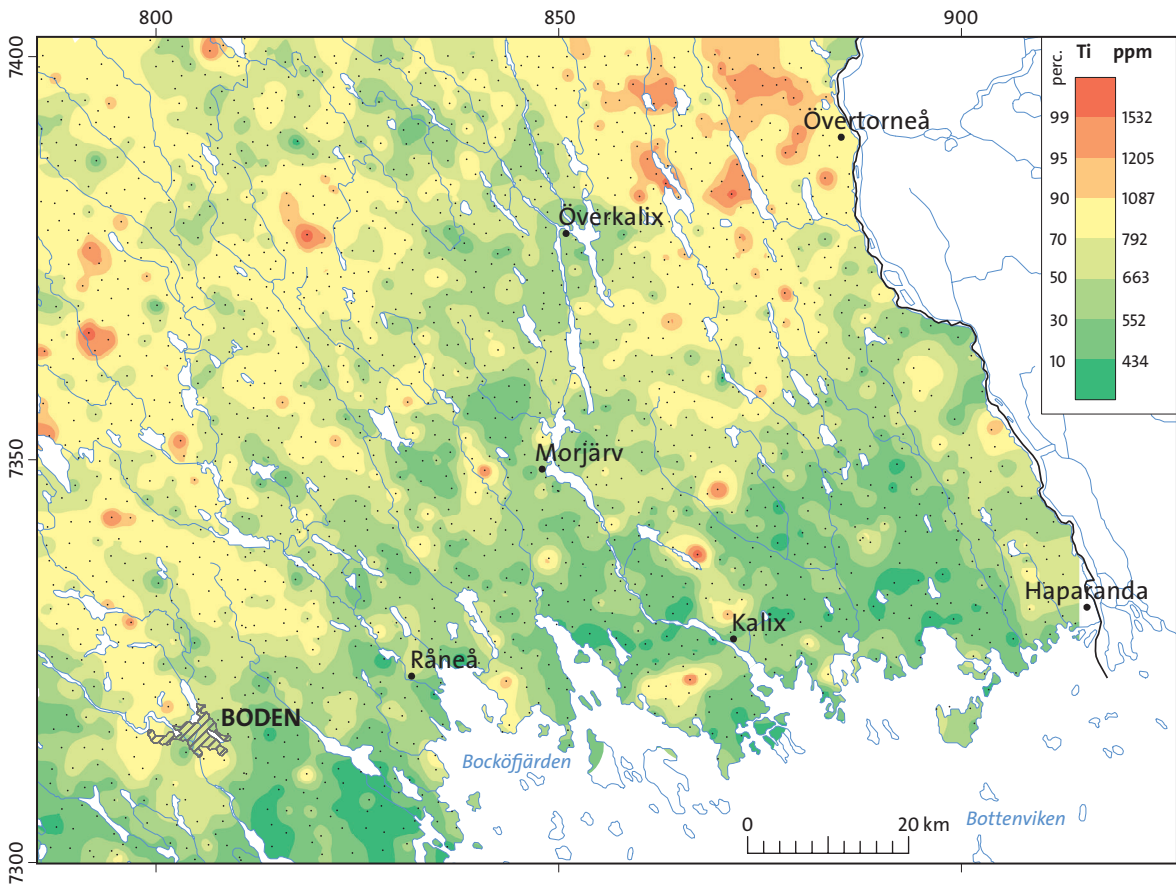


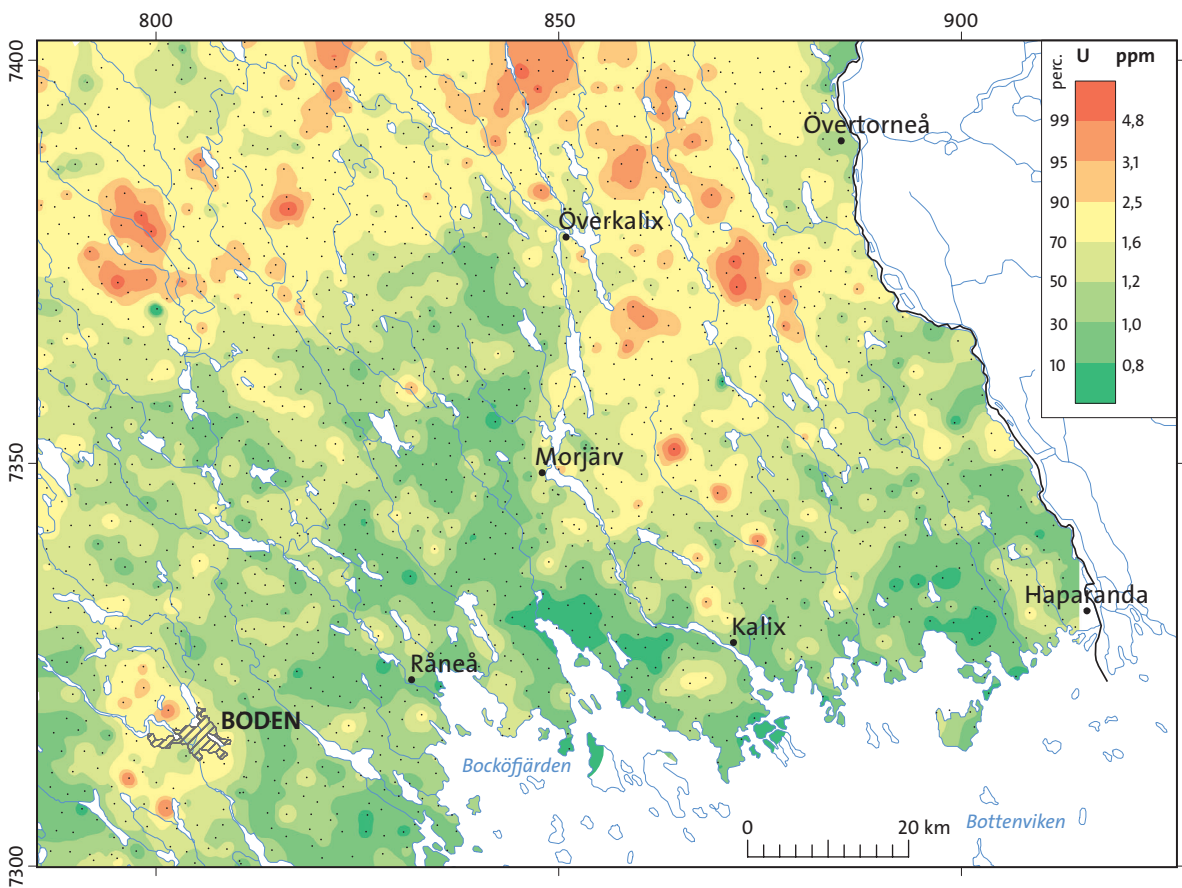
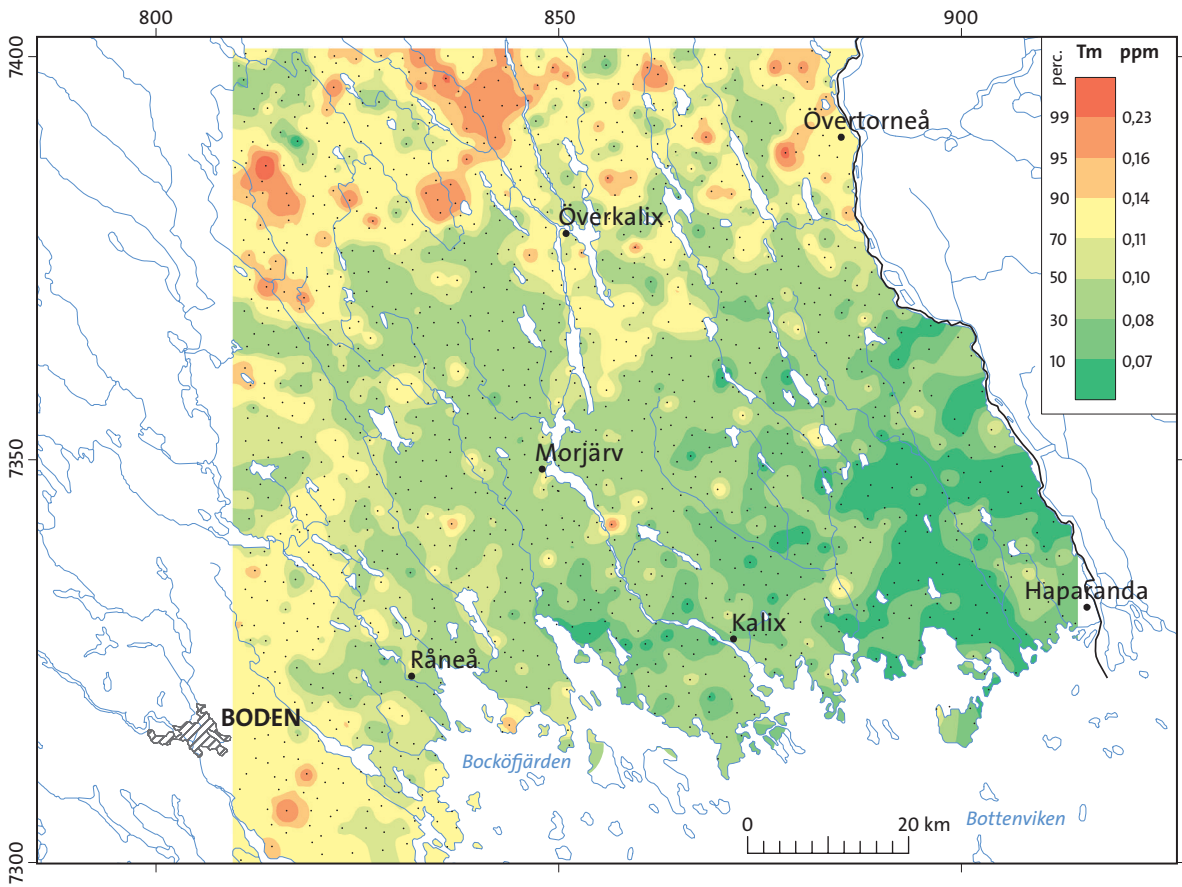


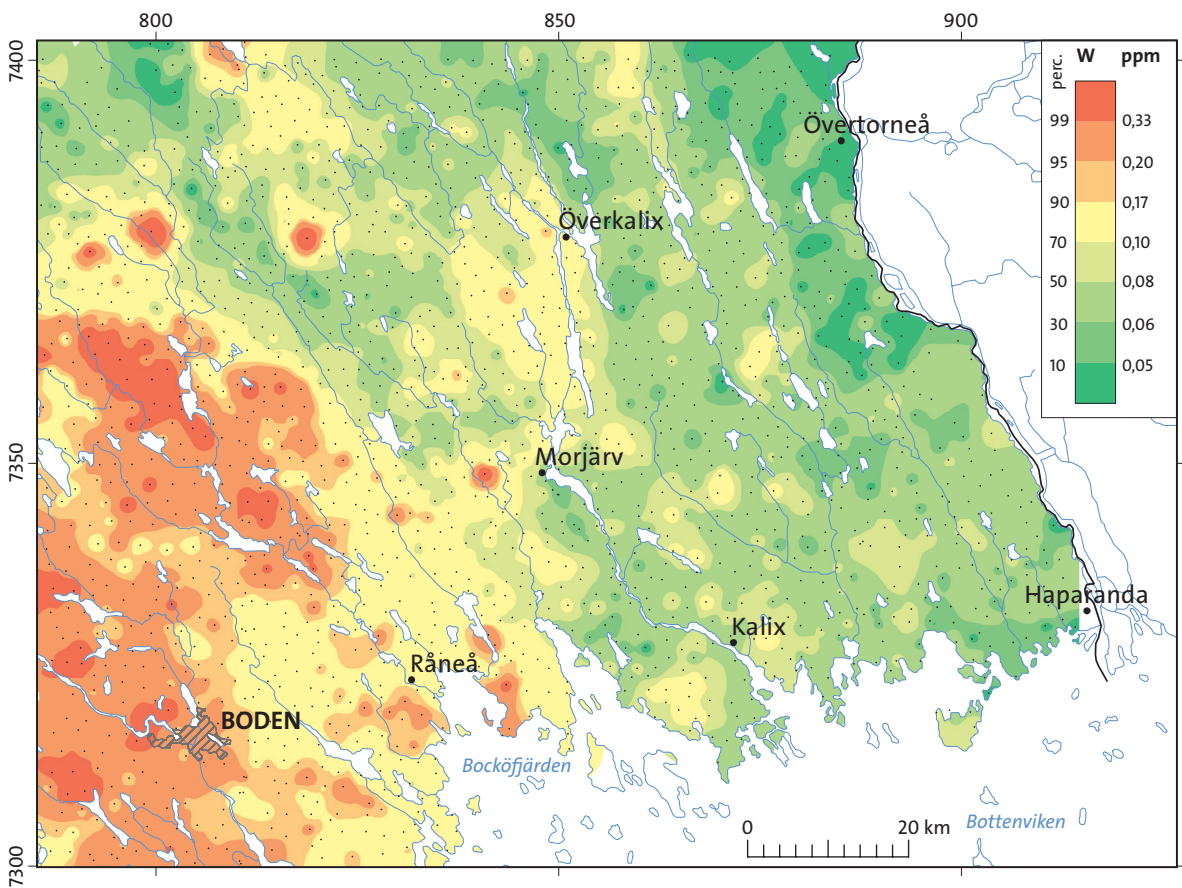
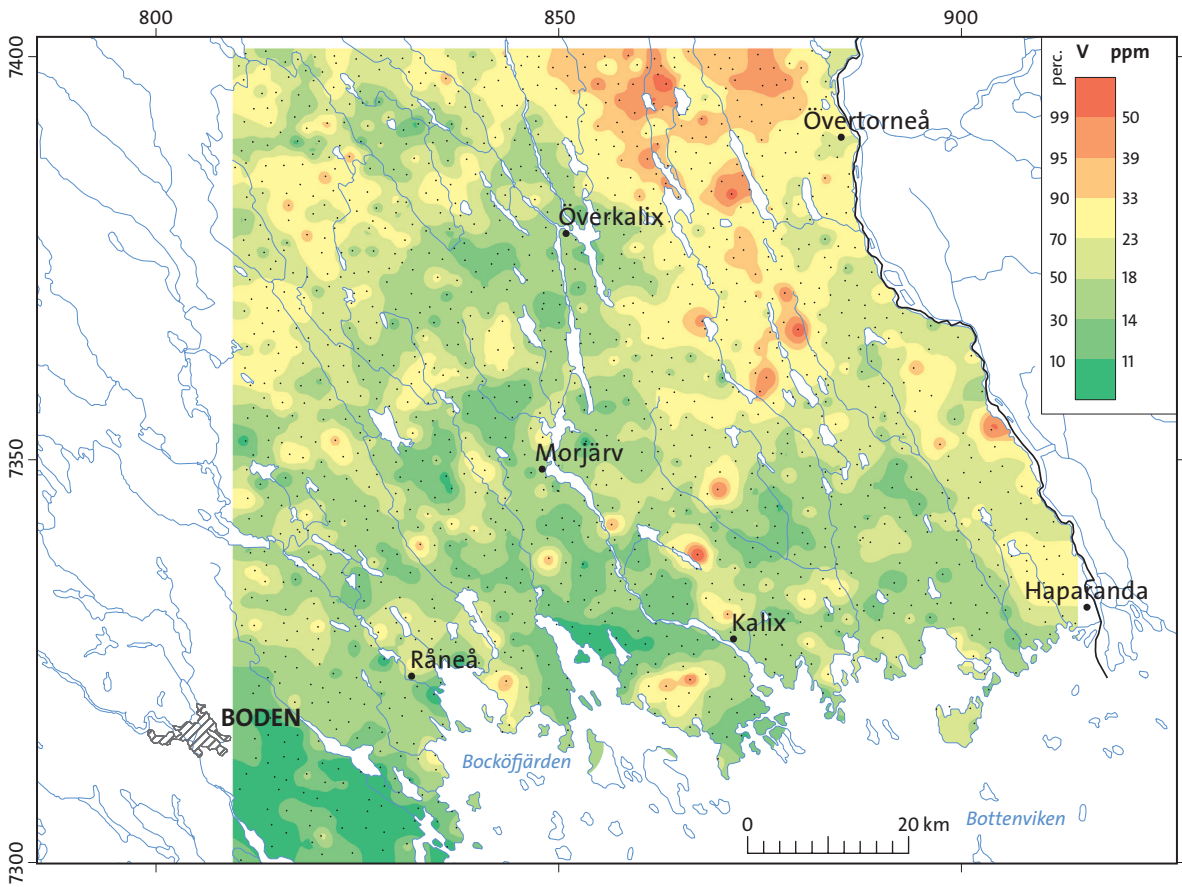


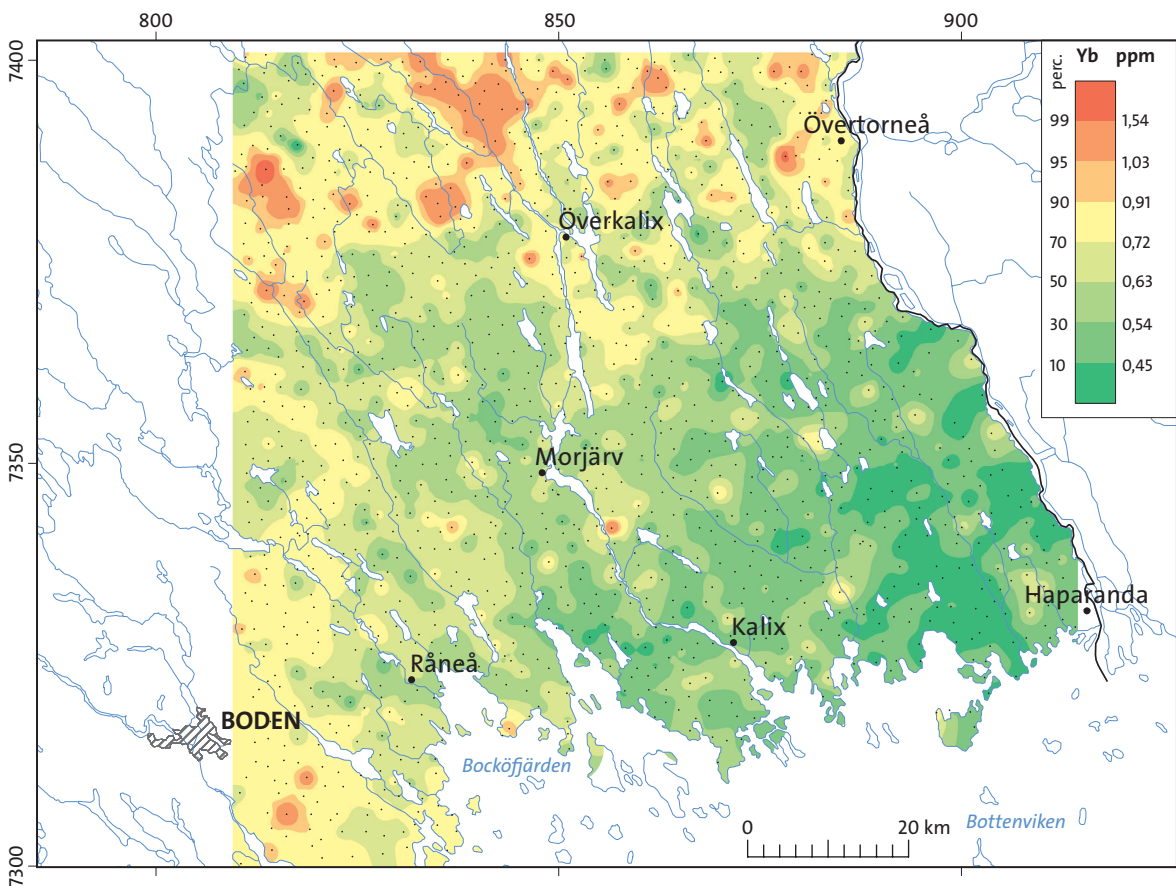
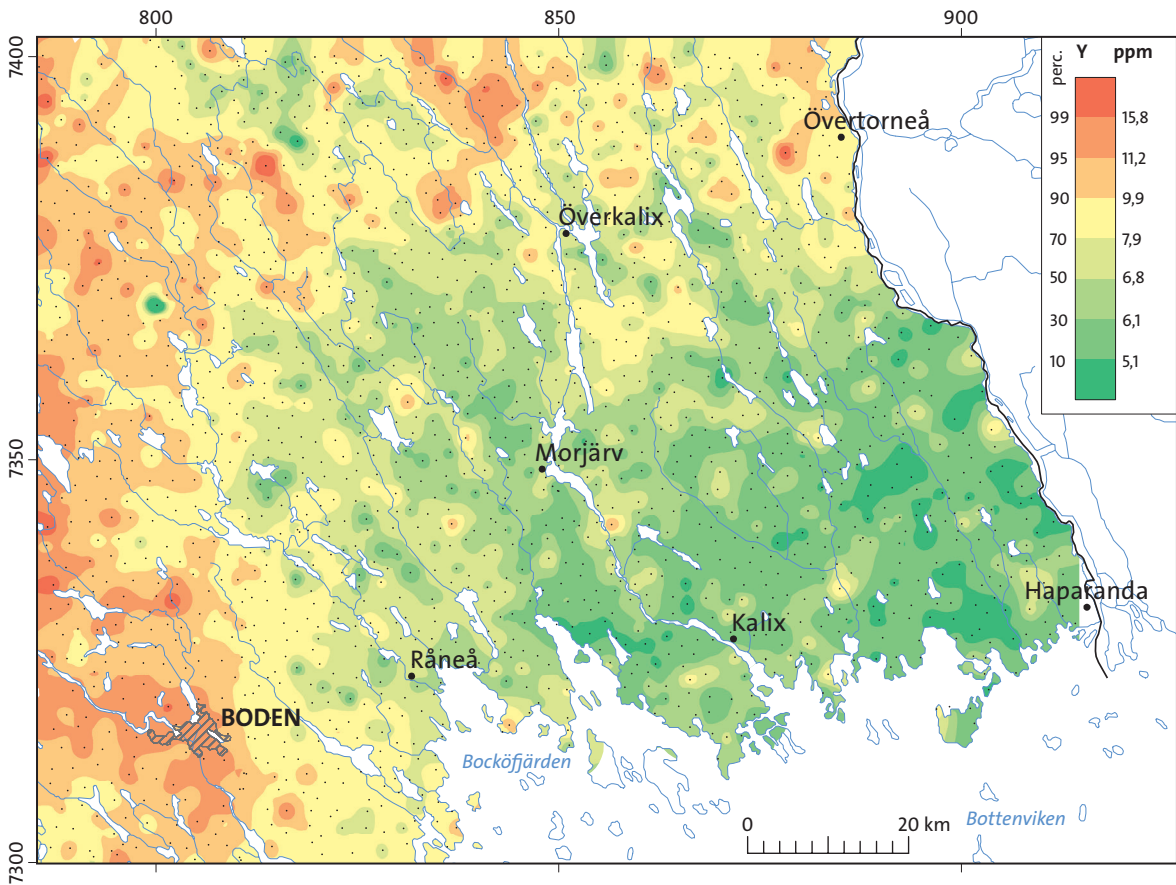


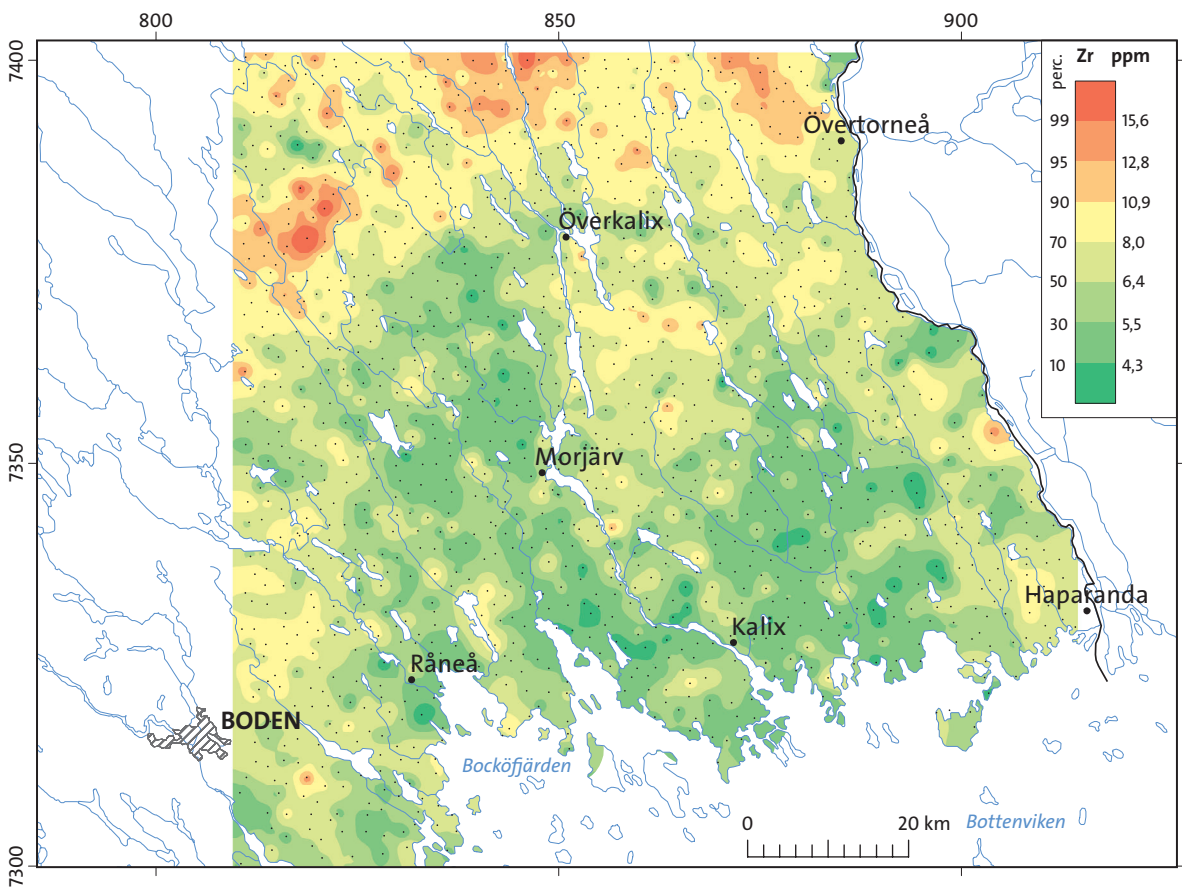
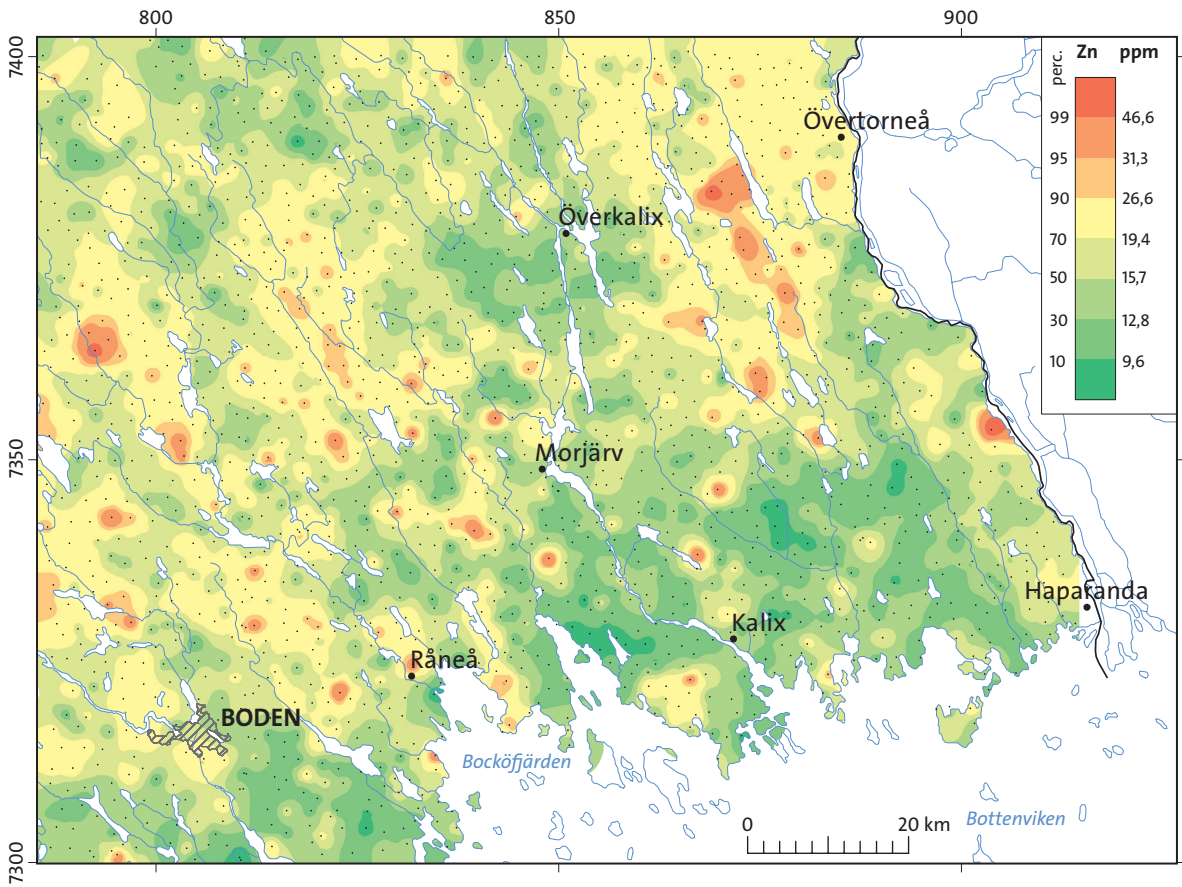


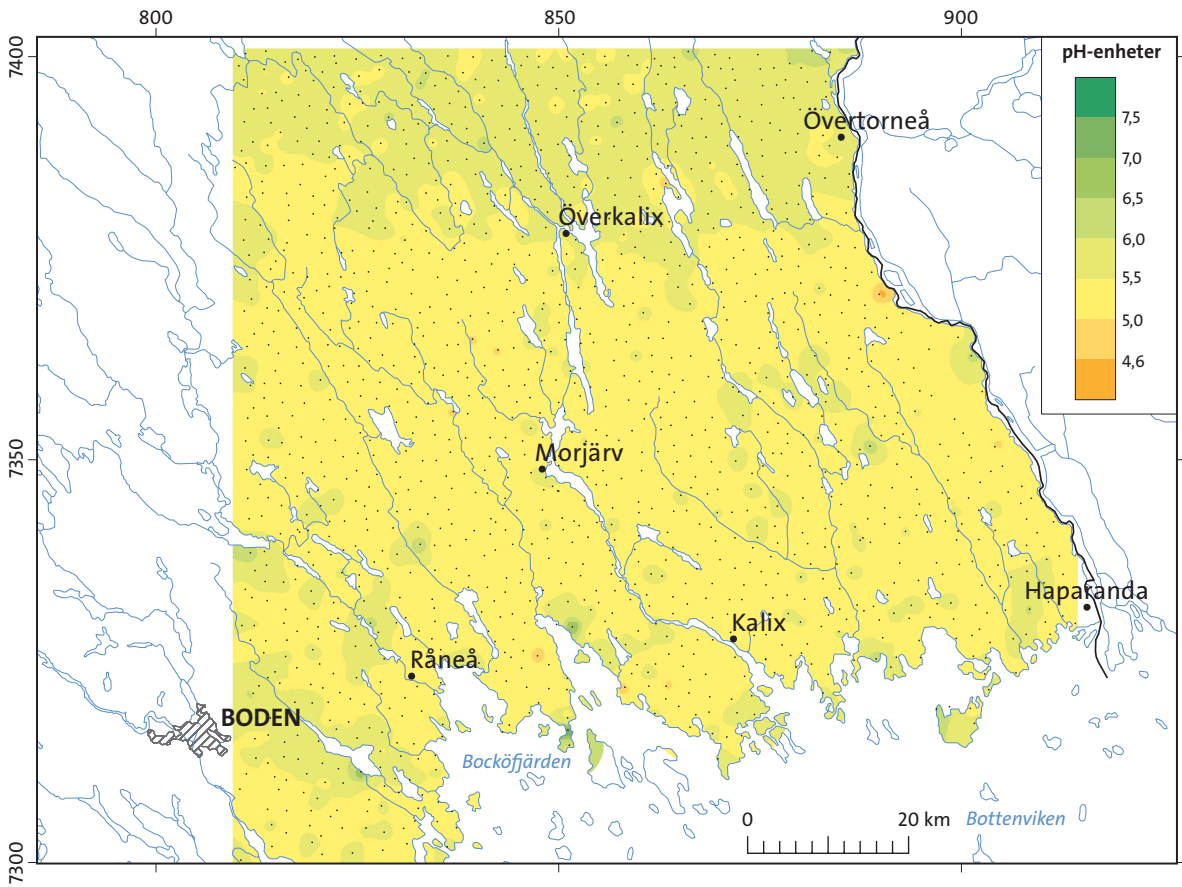












BILAGA 2

Översiktlig elementbeskrivning *General description of elements*

Ag, silver

Silver är en av ädelmetallerna. Silver återfinns i gedigen form i naturen men är vanligast i sulfider och arsenider samt som spårelement i malmmineral som blyglans, kopparkis och zinkblände. Silver uppträder främst i sedimentära och i mafiska intrusiva bergarter medan innehållet i graniter, felsiska vulkaniter och gnejser oftast är lägre. Silver kan uppträda i hydrotermala gångar, i kambrisk sandsten och i skiffer. Vid vittring är silver lättlösligt, men fastläggs och bildar stabila komplex eller adsorberas av markpartiklar med järn och mangan eller lerpartiklar.

Al, aluminium

Aluminium är det tredje vanligaste grundämnet i jordskorpan. I berggrunden och jordarterna uppträder aluminium huvudsakligen i bergartsbildande mineral och till viss andel i sekundära mineral som bildats genom vittringsprocesser. De bergartsbildande mineralen domineras av olika typer av fältspat och glimmer. Mineralen i leror till stor utsträckning består av olika aluminiumsilikat. Sekundärt bildade aluminiumhydroxider (gibbsit, böhmit, diaspor) utgör de ekonomiskt viktigaste källorna till aluminium. Alkalina bergarter (t.ex. syenit, anortosit) visar vanligen de högsta aluminiumhalterna. Mafiska intrusiva bergarter, graniter och skiffer innehåller måttliga mängder av elementet, medan ultramafiska bergarter har mycket lågt aluminiuminnehåll liksom kalkstenar och sandstenar.

Lösligheten av aluminium är starkt pH-beroende. Vanligen är aluminium relativt icke-mobilt men blir lösligt i sura ($\text{pH} < 5,5$) och mycket alkalina miljöer ($\text{pH} > 8$). Löst aluminium binds åter bland annat i sekundära lermineral, exempelvis kaolinleror. Aluminium är mycket svårlösligt i naturliga vatten. Endast det aluminium som är mobilt och lättlösligt kan utgöra en risk för levande organismer.

As, arsenik

Arsenik förekommer naturligt i jord och berg, vanligen med halter på 1–40 mg/kg. Bly-, koppar- och guldmalmer kan innehålla upp till 3 % 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. Måttlig förekomst av arsenik finns i kiselrika vulkaniska bergarter och stor förekomst av arsenik finns i sulfidmalmer och svartskiffer. Hydrotermala processer kan koncentrera arsenik, vilket kan leda till höga arsenikhalter i hydrotermalt omvandlade vulkaniska bergarter, lerskiffer, metamorf skiffer och i kol.

Vid vittring är arsenik lättlösligt, men dess rörlighet är ganska begränsad då arsenik binds till leror, metallhydroxider (järn, aluminium och mangan) och organiskt material. Arsenikjonerna binds således till markpartiklar och denna adsorption är starkast under oxiderande och sura till nästan neutrala förhållanden. Vid högt pH minskar adsorptionsförmågan och arsenikkoncentrationen i lösning ökar kraftigt. Reducerande förhållanden ger än kraftigare arsenikkoncentration då järnhydroxider löses upp och bundet arsenik frigörs.

Au, guld

Guld är en ädelmetall och 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 magmatiska bergarter som gabbro och diorit, i 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 icke-mobilt, icke-reaktivt och har låg aktivitet i lösning med undantag för när det bildar komplex med cyanidjoner. Höga guldhalter har observerats i växter och humusrika jordar som överlagrar guldmineraliseringar. Associerat med organiskt innehåll är transporterat guld ofta anrikt i en markprofils övre delar. Guldhalterna i mark är därför vanligtvis högre i humus än i djupare marklager.

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 lättlösligt 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 förekommer främst i fältspater och glimrar men kan även bilda baryt (BaSO_4), ett mineral som ofta förekommer i samband med sulfidmineraliseringar med bly och zink i kalksten och dolomit. Graniter 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. Metallen kan ersätta kalium i bergartsbildande mineral, men också kalcium (i t.ex. plagioklaser) och strontium. Metallen bariums uppträdande är ofta associerat med specifika mineraliseringar och hydrotermala omvandlingar. 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 är ett sällsynt grundämne och bildar egna mineral t.ex. beryll och krysoberyll. Beryllium ingår också som spårelement i mineral som amfibol, pyroxen, glimmer, fältspat och lermineral. Beryllium anrikas i senmagmatiska bergarter t.ex. i graniter och 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. Högre halter av vismut finns ofta i kvarts- och glimmerrika magmatiska bergarter. Sekundära koncentrationer av vismut finns i finkorniga sediment, leror och kol. Vismut uppträder tillsammans med Cu-, Zn-, Pb-, W-, Sn- och Au-mineraliseringar och används som indikatorelement vid guldprospektering. Vismut har låg mobilitet och tenderar att falla ut tillsammans med järn-manganhydroxider. Det bildar också olösliga salter och adsorberas till organiskt material.

Ca, kalcium

Kalcium är ett av de vanligaste grundämnena i jordskorpan. Huvudelementet kalcium ingår i ett flertal bergartsbildande mineral, exempelvis kalcit, amfibol, pyroxen och plagioklaz. Kalcium är också den viktigaste komponenten i kalksten, som till övervägande del består av kalcit. Generellt, kiselfattiga

magmatiska bergarter som gabbro, diorit och basalt har högre kalciumhalter än kiselrika bergarter som granit. Vid vittring är kalcium mycket löslöst under lågt pH och relativt stabilt under högt pH. Lösligheten i olika mineral varierar och är betydligt lägre i silikater än i karbonater. Kalcium i lösning faller lätt ut som karbonat vid pH-ökning och kan åter bindas i olika lermineral, exempelvis i illit och klorit.

Cd, kadmium

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

Ce, cerium

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

Co, kobolt

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

Cr, krom

Krom är en vanlig övergångsmetall som bildar mineral kromit och finns i små mängder i bergartsbildande mineral t.ex. amfibol, pyroxen, glimmer och granat. Krom förekommer i högra halter i kiselfattiga magmatiska bergarter som gabbro och peridotit. Sandstenar kan innehålla en del krom medan granitiska bergarter har lågt innehåll av metallen. Mobiliteten hos krom är låg och vid vittring binds elementet lätt till järn- och manganoxider och till lermineral. Krom bygger föreningar med organiska ämnen. Giftigt och löslöst fyrvärt krom kan reduceras av organiskt material till mer stabilt trevärt krom.

Cu, koppar

Koppar förekommer företrädesvis i sulfidform t.ex. kopparkis, bornit, kopparglans och covellin. Gedigen koppar förekommer i klumpar och ådror. Koppar ingår i olika typer av mineraliseringar tillsammans med guld, silver, kobolt, nickel, bly och zink. Som spårelement kan det också finnas i glimmer, pyroxen och amfibol och är därför vanligare i mafiska bergarter som basalt och gabbro. Höga kopparhalter kan finnas i finkorniga sediment (skiffer) och metallen adsorberas lätt till lerpartiklar. 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 kiselfattiga magmatiska bergarter jämfört med lägre halter i granit, kalksten och sandsten. 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.

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 glimmer- och fältspatrika magmatiska bergarter, inklusive alkalina och metamorfa varianter, och i sandstenar och lerskiffer. Vid vittring blir kalium lösligt och mobilt men har en hög tendens att adsorbera till lermineral. Kaliums extraherbarhet i syra är låg eftersom det mesta av kaliumet är bundet i vittringsbeständiga mineral som kalifältspat.

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 vilket styrs av adsorptionen till järnoxider, fosfater och lermineral. Alla sällsynta jordartsmetaller har en tendens att ackumuleras i en basisk snarare än sur miljö och därför är lantankoncentrationen ofta hög i jord som innehåller kalkhaltigt bergartsmaterial.

Li, litium

Litium är en alkalimetall och återfinns som spårämne i bergartsbildande mineral som biotit, fältspat och amfibol samt i lermineral. Litium bildar mineral som spodumen (pyroxen) och lepidolit (glimmer), vilka är karakteristiska för senmagmatiska bergarter, t.ex. granit, pegmatit, greisen och kvartsådror. De högsta koncentrationerna av litium finns i alkalina 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 järn- och manganoxider, 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 kiselfattiga magmatiska bergarter som gabbro, basalt

och peridotit. 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 mafiska 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 (molybdenglans) men bildar även andra föreningar med syre (molybdater). Som ett spårelement finns molybden i pyrit, kopparkis, blyglans, zinkblände, wolframit, scheelit, titanit och magnetit, samt i fältspat och biotit. Molybden anrikas i kiselrika 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 huvudkomponent 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 magmatiska bergarter som granit, i alkalina bergarter (t.ex. syenit) och i sedimentära bergarter (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.

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). Höga nickelhalter förekommer i magmatiska bergarter som gabbro, basalt och framförallt peridotit. Skiffrar är också vanligtvis nickelförande medan innehållet i granitiska bergarter och kalkstenar är betydligt lägre. Sekundära nickelhalter förekommer i lateritiska och lerrika avlagringar som utvecklas ovanpå peridotit och serpentinit. 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. Magmatiska bergarter som gabbro, basalt och syenit innehåller vanligen högre fosforhalter än granit och ryolit. Bland sedimentära bergarter innehåller svartskiffer och fosforiter de högsta koncentrationerna. I naturen är fosfor lösligt vid neutralt pH (7), mobilt under lätt sura förhållanden, samt olösligt vid väldigt låga respektive väldigt höga pH-förhållanden. Lösligheten för fosfor varierar

beroende på mineraltillhörighet. I apatit är fosfor lösligt, men svårslösligt i bl.a. monazit. Fosfor adsorberas till lerpartiklar och organiskt material. Fosfor bildar svårslösliga föreningar med kalcium vid höga pH-värden och med järn och aluminium vid låga pH-värden.

Pb, bly

Bly är ett kalkofilt grundämne som oftast förekommer i sulfidform, t.ex. blyglans, 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 förekommer i polymetalliska sulfidmalmer, ofta med zink, koppar och silver. Bly binder lätt till organiskt material och därför kan vissa typer av svartlerskiffer och kol innehålla höga Pb-halter. Mobiliteten är låg på grund av den starka adsorptionen till lerpartiklar, Fe-Mn-hydroxider och organiskt material. Rörligheten av bly är dock pH-beroende och minskar kraftigt med kalkning och ökat pH.

Rb, rubidium

Rubidium är ett relativt vanligt förekommande grundämne som huvudsakligen ersätter kalium i bergartsbildande och accessoriska mineral samt i lermineral (t.ex. glimmer, K-fältspat, lepidolit, zinnwaldit, carnallit, illit, montmorillonit). På grund av den stora jonradien och oxidationstillståndet (+1) anrikas rubidium i senmagmatiska 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 med undantag högt pH förhållande och binds framförallt till lerpartiklar.

REEs, sällsynta jordartsmetaller

De sällsynta jordartsmetallerna (*rare earth elements*, REEs) omfattar 15 s.k. lantanoider med atomnummer från lantan (57) till lutetium (71). De återfinns generellt i samma geologiska miljöer och har kemisk likhet. De indelas i två undergrupper, den lätta gruppen (*light rare element group*, LREE) som omfattar lantan (La), cerium (Ce), praseodym (Pr), neodym (Nd), prometium (Pm), samarium (Sm) och europium (Eu) och den tunga gruppen (*heavy rare element group*, HREE) som omfattar gadolinium, (Gd), terbium (Tb), dysprosium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), tulium (Tm), ytterbium (Yb) och lutetium (Lu). På grund av liknande fysikaliskt och kemiskt uppträdande räknas även yttrium (Y) i den tunga gruppen och skandium (Sc) i den lätta gruppen.

De sällsynta jordartsmetallerna bildar ett flertal mineral, som monazit, bastnäsit, allanit och cerit och de kan även ingå i små mängder i exempelvis apatit, biotit, pyroxen, turmalin, granat och zirkon. Det finns upp mot 200 mineral som innehåller metallerna, men endast några få är ekonomiskt intressanta, t.ex. monazit, bastnäsit och xenotim. Sällsynta jordartsmetaller förknippas i ett mer generellt perspektiv med magmatiska bergarter (granit och pegmatit) och med alkalina bergarter. Vid vittring är mobiliteten hos de sällsynta jordartsmetallerna låg, men ökar under låg pH förhållande. Rörligheten hämmas genom adsorption till Fe-oxider, fosfater och lermineral.

Sb, antimon

Antimon är ett 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). 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. Vissa växter kan ackumulera antimon.

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. Kiselfattiga mafiska bergarter har vanligtvis högre scandiumhalter än kiselrika felsiska 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 kan hittas i laterit- och bauxitavlagringar. Skandiums mobilitet i jord är låg, huvudsakligen på grund av den starka tendensen till att binda till lermineral och organiskt material.

Se, selen

Selen bildar selenider, t.ex. claushtalit och crookesit, och förekommer i sulfider där det vanligen ersätter svavel (i pyrit, kopparkis och zinkblände). Selen är volatilt och vanligt i områden med vulkanisk aktivitet. Kiselfattiga vulkaniska 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 hög 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 (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 senmagmatiska 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 ersätter 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. Magmatiska bergarter som gabbro, basalt och karbonatit har ofta förhöjda strontiumhalter (i jämförelse med granit). 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 ersätter titan, yttrium och sällsynta jordartsmetaller (REE). Tantal förekommer tillsammans med niob i granit, pegmatit och alkalina bergarter. Höga tantalhalter finns i greisen och i hydrotermala spricksystem som är rika på tenn. Tantalit och pyroklor är de huvudsakliga Ta-mineralen i mineraliseringar. Mineral som innehåller tantal är ofta vittringsbeständiga och mobiliteten av grundämnet 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 gulddmineraliseringar. Kiselfattiga magmatiska (som gabbro) bergarter innehåller högre tellurhalter än kiselrika bergarter (t.ex. granit) och sekundära koncentrationer av tellur har observerats i kol och inom oxidationszoner nära malmfyndigheter. Tellur har låg mobilitet i jord och vatten och kan adsorberas till Fe- och Mn-oxyhydroxider samt organiskt material.

Th, torium

Torium är ett radioaktivt grundämne och tillhör aktiniderna (tillsammans med uran). Torium koncentreras i sen-magmatiska bergarter som granit och pegmatit. Finkorniga sedimentära bergarter (ler-skiffer) 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 i accessoriska mineral som monazit, allanit, epidot, titanit och zirkon. Under alla förhållanden är torium svårslösligt men organiska syror ökar lösligheten. Torium oxiderar vid vittring och kan anrikas i reducerande miljöer samt adsorberas till lerpartiklar och i något mindre utsträckning till organiskt material.

Ti, titan

Titan är ett vanligt grundämne som bildar ett flertal mineral t.ex. ilmenit, rutil, titanit, anatas och brookit. Titan ersätter magnesium och järn i bergartsbildande silikater som pyroxen, amfibol, granat och glimmer. Titan förekommer med högst halt i bergarter som gabbro, diorit, vissa typer av basalt och granit och metamorfa bergarter som eklogit. Anrikning i grävacka och lerskiffer är vanlig. Titan är generellt svartlösligt och lösligt titan kommer vanligen från vittrade Fe-Mg-silikater. 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 ersätter kalium i silikater (t.ex. fältspat, leucit, glimmer). Egna mineral är sällsynta. De högsta talliumkoncentrationerna finns i granit, metamorf skiffer, lerskiffer och kol. Talliummineral uppträder i hydrotermala miljöer (t.ex. lorandit, crookesit). Tallium kan anrikas i pegmatit och i Zn-Pb mineraliseringar med blyglans och zinkblände. Tallium är lösligt och mobiliserar vid sjunkande pH. Den relativt 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 i stället för makronäringsämnet kalium.

U, uran

Uran är ett radioaktivt grundämne som tillhör aktiniderna (tillsammans med torium). 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. Uran kan koncentreras vid metamorfos och finns ibland anrikat i skarn och gnejs. Finkorniga sedimentära bergarter som är rik på organiskt material kan innehålla höga uranhalter (t.ex. svart-skiffer). Uran är ett mobilt element och mer lösligt under oxiderande förhållanden vid högt pH än i sura, reducerande miljöer. Uran adsorberas till lermineral, organiskt material och järnoxider samt binder till fosfater.

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 kiselfattiga mafiska och ultramafiska 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 sällsynt grundämne som förekommer i senmagmatiska bergarter (granit, pegmatit), metasedimentära bergarter (t.ex. grafitiskiffer, fyllit, kalksilikat) och finkorniga sedimentära bergarter (lerskiffer). Wolframs egna mineral som scheelit och wolframit uppträder ofta i kvartsgångar, pegmatiter och skarnmineraliseringar. Wolframmineral förekommer ofta i samband med kassiterit, molybdenglans och fluorit. Små mängder wolfram finns i glimmer, magnetit och rutil. 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 spårelement förekommer yttrium även i accessoriska mineral (zirkon, apatit, granat) och i bergartsbildande mineral som biotit och pyroxen. Yttrium förekommer i senmagmatiska bergarter som granit och pegmatit, alkalina bergarter (syenit) och hydrotermalt omvandlade bergarter. Sekundära koncentrationer i sedimentära bergarter beror på förekomsten av tunga mineral (zirkon, monazit). Yttriummineral är svårvittrade men lösligt yttrium är relativt mobilt och har hög tendens att adsorberas till lermineral och Fe- och Mn-oxider och -hydroxider. Vid högt pH faller yttrium ut med karbonatmineral.

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, glimmer, granat och dolomit. Kiselfattiga magmatiska bergarter, metamorf skiffer och lerskiffer kan innehålla höga zinkhalter. I sedimentära bergarter förekommer 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 i reducerande (bildning av zinkblände) och alkalina (bildning av karbonater) miljöer.

Zr, zirkonium

Zirkonium är ett 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 ersätter 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 mycket låg löslighet och mobilitet. Zirkonium från vittrade mineral som biotit, pyroxen och amfibol kan adsorberas till lerpartiklar och i viss mån till organiskt material.



Sveriges geologiska undersökning

Box 670

751 28 Uppsala

Tel: 018-17 90 00

Fax: 018-17 93 70

www.sgu.se

Uppsala 2016
ISSN 1652-8336
ISBN 978-91-7403-378-6