

Markgeokemiska kartan

Morängeokemi i norra Norrbotten *Till geochemistry in northern Norrbotten*

Anna Ladenberger, Madelen Andersson,
Julio Gonzalez, Kaj Lax, Mikael Carlsson,
Sten-Åke Olsson & Cecilia Jelinek



Markgeokemiska kartan
Morängeokemi i norra Norrbotten
Till geochemistry in northern Norrbotten

Anna Ladenberger, Madelen Andersson,
Julio Gonzalez, Kaj Lax, Mikael Carlsson,
Sten-Åke Olsson & Cecilia Jelinek

ISSN 1652-8336
ISBN 978-91-7403-158-4

Omslagsbild: Kaptensgropen i Malmberget. Foto: LKAB.

Layout: Jeanette Bergman Weihed, SGU
Tryck: Davidsons Tryckeri AB, Växjö 2012

INNEHÅLL

Geokemisk kartering vid SGU	5
Användning av de markgeokemiska kartorna	6
Provtypen morän	6
Metodik	8
Provtagning	8
Provberedning	9
Analysering	9
Kvalitetskontroll	10
Databehandling	10
Percentilindelning	10
Undersökning av procentuell lakbarhet	12
Korrelationer	13
Faktoranalys	14
Kartor	14
Elementens förekomst och rörlighet	15
Geologiska förutsättningar	15
Markprocesser	17
Lakbarhet och associationer	18
De kemiska elementen i näringskedjan	18
Områdets geologi	19
Berggrunden	19
Arkeiska bergarter	19
Proterozoiska bergarter	19
Mineraliseringar	23
Hydrotermala omvandlingar (metasomatos) och exempel på deras avspeglning i morängeokemin	24
Undre Haukiseriens sericit- och kvarts-sericitmetasomatiter	26
Stark argillitisk omvandling och metasomatiska bergarter liknande hydrotermala kvartsiter i området runt Malmberget	29
Aitik och metasomatiska omvandlingar associerade med mindre porfyrisk intrusioner	30
Kvartärgeologi i undersökningsområdet	31
Glacialgeologisk, morfologisk och annan inverkan på geokemimönstren	36
Geokemi i området – elementens förekomst och associationer i morän	37
Silver (Ag)	37
Aluminium (Al)	39
Arsenik (As)	41
Guld (Au)	42
Barium (Ba)	45
Beryllium (Be)	48
Vismut (Bi)	49
Kalcium (Ca)	50

Kadmium (Cd)	52
Klor (Cl)	53
Kobolt (Co)	55
Krom (Cr)	56
Koppar (Cu)	58
Järn (Fe)	61
Kalium (K)	62
Lantan (La)	64
Litium (Li)	65
Magnesium (Mg)	66
Mangan (Mn)	68
Molybden (Mo)	69
Natrium (Na)	71
Nickel (Ni)	73
Fosfor (P)	75
Bly (Pb)	76
Palladium (Pd)	77
Rubidium (Rb)	78
Svavel (S)	80
Antimon (Sb)	81
Selen (Se)	82
Kisel (Si)	84
Tenn (Sn)	85
Strontium (Sr)	86
Tellur (Te)	87
Torium (Th)	89
Titan (Ti)	90
Tallium (Tl)	92
Uran (U)	93
Vanadin (V)	95
Wolfram (W)	97
Yttrium (Y)	99
Zink (Zn)	100
Zirkonium (Zr)	101
pH och försurningsresistens	103
Miljögeokemi – gränsvärden för känslig markanvändning (KM)	105
Summary	106
Referenser	108

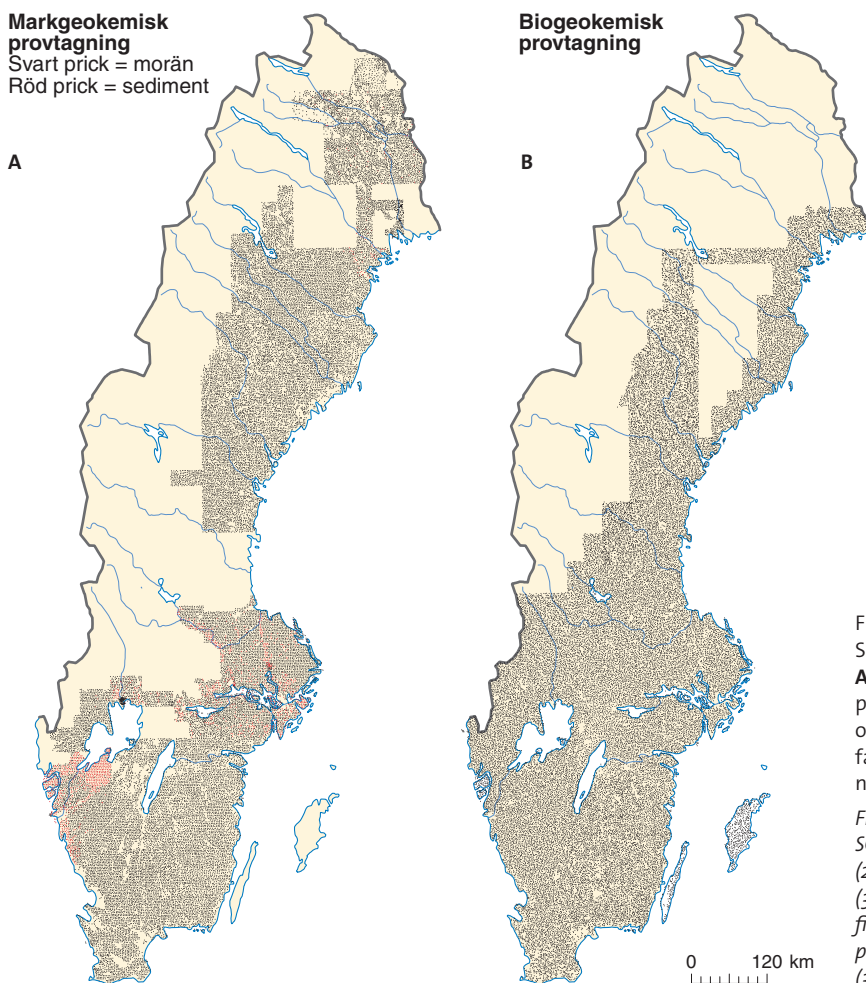
GEOKEMISK KARTERING VID SGU

Geokemisk kartering vid SGU bedrivs huvudsakligen i syfte att visa regional fördelning av huvudämnen och spårämnen samt pH i mark och vatten. Två olika undersökningsmetoder används för att åskådliggöra detta. Med markgeokemisk kartering provtas och analyseras morän och ett urval av leror, silt och grövre sediment. Hittills är hela Götaland och stora delar av Svealand och Norrland karterade på detta sätt. Förutom markgeokemisk kartering har tidigare även biogeokemisk kartering utförts (fig. 1, se t.ex. Holmberg m.fl. 1999). Den senare baserades på analyser av levande bäckvattenväxter (starr- och älggräsrotter samt näckmossa) från små vattendrag. Denna kartering har dock hittills inte berört undersökningsområdet.

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

Kartor över de kemiska parametrarna baseras på moränprov normalt tagna på ca 0,6–1,2 m djup och analyserade på finfraktionen (<0,063 mm). Alla mätvärden lagras tillsammans med koordinater i en lättåtkomlig databank. Analoga eller digitala data och kartor tillhandahålls efter begäran från SGUs kundtjänst.

Föreliggande rapport utgör en del i en presentation av markens naturliga innehåll av grundämnena i Sverige, samt surhetsgraden mätt som pH. Rapporten, som är en fortsättning på den serie rapporter om markgeokemi som tidigare publicerats inom SGUs serier Rapporter och meddelanden, K samt Gk (se t.ex. Andersson & Lax 1996, Andersson m.fl. 1997, Andersson & Lax 2000), omfattar ett 25 500 km² stort område.



Figur 1. Aktuell täckningsgrad för SGUs markgeokemiska databas
A. Omfattning av markgeokemisk provtagning på morän (31 500 prov) och sediment (3 785 prov). **B.** Omfattning av biogeokemisk provtagning (baserad på 38 480 prov).

Figure 1. Current coverage for the SGU soil geochemical database (2009). **A.** Soil geochemistry: till (31 500 samples, black dots); clay and fine grained sediments (3 785 samples, red dots). **B.** Biogeochemistry (38 480 samples).

Rapporten har framställts av Anna Ladenberger (tolkning, sammanställning), Madelen Andersson (tolkning, kvartärgeologi, glacialmorfologi), Julio Gonzalez (berggrund, mineraliseringar, tolkning), Kaj Lax (tolkning), Sten-Åke Ohlsson (kvartärgeologi) samt Cecilia Jelinek (tolkning av uran och torium). Kartorna har framställts av Mikael Carlsson. Ansvarig för pH-mätningar har varit Birgitta Löwenhielm, för ICP-analyser Torsten Liljefors och Sten-Åke Ohlsson. För analyskvalitet och bearbetning svarar Kaj Lax och Anna Ladenberger. Anders Hallberg, Robert Lagerbäck och Magnus Ripa har granskat rapporten.

ANVÄNDNING AV DE MARKGEOKEMISKA KARTORNA

Markgeokemiska data används bland annat inom mineralprospektering, miljöövervakning, markforskning, skogsbruk, kommunal planering och medicinsk forskning. Eftersom provtypen avspeglar den naturliga metallhalten i marken kan de markgeokemiska resultaten med fördel användas som bakgrundsinformation vid undersökning av förorenad mark.

Med teman som malmletning, försurning, recipientskydd och förorenad mark kan kartorna och informationen anpassas till olika relevanta verksamhetsområden.

Kartorna, som visar den naturliga förekomsten av grundämnen i marken, ger information om halter av huvudkomponenter och spårämnen i miljön med avseende på det geologiska ursprunget. Antropogen påverkan bidrar ytterst sällan eller lite till de förekomster av metaller och andra 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). Endast om påverkan är kraftig kan med andra ord påverkan ses, och då i allmänhet endast i utsläppskällans omedelbara närhet – dylika utsläppskällor undviks i möjligaste mån vid provtagning.

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

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

Många av de nyttiga spårämnena är samtidigt metaller. Förekommer de med höga halter, eller i olika associationer, kan de i vissa fall indikera mineralisering, vilket är av intresse vid malmprospektering, men kan också, speciellt i regioner med låga 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 (i söder) till ca 8 500 (i norr) år sedan. Isen eroderade berggrunden och transporterade iväg det nybrutna materialet tillsammans med varierande mängder äldre jordarter

avlagrade före nedisningen. Förekomst av preglaciala sediment i morän har bland annat konstaterats i Finland, där en del geokemiska drag i morän i västra Finland antas bero på inblandning av gamla havssediment (leror) i moränen (Lintinen 1995).

Tre huvudtyper av morän förekommer: basalt deponerad morän, utsmältningsmorän samt flytmorän. Basalt deponerad morän avsätts under en aktiv glaciär genom att material i princip skrapas av mot underlaget. Resultatet blir ofta en hårt packad morän med relativt få strukturer. Den är ganska homogen vad avser utseende, textur och innehåll. Inom undersökningsområdena kan det antas att materialet i en morän av denna typ är ganska korttransporterat. Denna moräntyp ger därför i regel den bästa speglingen 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. Dessa kan sedan anrikas t.ex. runt stenar vilket medför att denna moräntyp kan vara ganska inhomogen. Eftersom den kan vara transporterad uppe på glaciären kan den 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 utsmältnings- som flytmoräner täcker ibland basalt deponerade moräner.

Normalt har en basalt deponerad morän en jämn eller regelbundet strömlinjeformad överyta. Utsmältningsmoräner och flytmoräner bildar ett mer oregelbundet småkulligt landskap. En basalt avsatt morän är ofta massiv till sitt utseende och saknar strukturer. Utsmältningsmorän och flytmorän innehåller däremot strukturer av olika slag 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. I detta fall blir inte heller urtvättningen av finmaterial och tunga mineral så utpräglad. För mer ingående diskussioner rörande olika moräntyper, strukturer och texturer se t.ex. Krüger (1979).

Oavsett moräntyp finns ofta ett samband mellan andelen finkornigt material i moränen och metallinnehållet – ju större andel finkornigt material desto högre metallhalt. Det finns dock undantag från detta, och moränens sammansättning kan sammanfattningsvis sägas avspegla såväl modern materialet som de moränbildande processerna.

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

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

Trots att svårigheter vid tolkning ibland uppträder vad gäller komplexa bildningssätt för moräner, variationer i transportlängder etc. finns få alternativ till denna provtyp om avsikten är att få en bild av berggrundens generella sammansättning. Direkt bergartsprovtagning är ofta dyr, och på grund av homogenitetsproblematik kan resultaten bli missvisande. Moränprovtagning är generellt sett betydligt billigare och resultaten kan ses som kompositprov av moderbergarterna.

METODIK

Provtagning

För karteringsändamål insamlas moränproven med kriterierna att de ska vara representativa för regionen och om möjligt tillhöra typen sandig eller sandig siltig morän. Dessutom ska potentiellt förorenade områden undvikas.

Topografiska kartor i skala 1:50 000 (1:100 000 i delar av Norrlands inland) används för att lägga ut ett rutnät med tämligen jämn fördelning av proven och om möjligt vinkelrätt mot de isrörelseriktningar som finns dokumenterade. Avståndet mellan proven är normalt ca 2,5 km, vilket innebär att det samlas in ungefär 15 prov per kvadratmil. Vid provtagningen genomgrävs markprofilen för hand med spade och spett. Man får därigenom god möjlighet att upptäcka om provet av någon anledning är olämpligt att ta, på grund av svallning, växtrötter, djupt gående markprocesser, underliggande sediment etc. Provet, som uppgår till ca 0,8 kg, tas sedan ett stycke ner i C-horisonten genom att material slås loss på några ställen i gropens botten (fig. 2). Analyserna från dessa prov utgör därför en relativt homogen och jämförbar statistisk population, där förutsättningarna för grundämnenas haltvariation bygger på olikheter i ursprunglig kemisk sammansättning.

Sedimentproven tas på 1 m djup men geografiskt har de oftast inte samma utbredning som moränprov. En skillnad mellan de båda provtyperna är att vid tolkning av geokemiska mönster är det betydligt färre faktorer som påverkar moränens metallhalt än vad gäller sediment. Moränens C-horisont är så gott som uteslutande geologiskt relaterad och kan lättare kopplas till berggrunden. Lerorna och övriga



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

Figure 2. Typical sampling site in podzol from Norrbotten. Sampling depth approximately 0.8 m.

finkorniga sediments elementhalter påverkas av fler faktorer. Sedimentationsprocessen i sig kan t.ex. medföra anrikning av mineral och därmed omfördelning av element.

Provtagningen sker förutsättningslöst, dvs. ingen hänsyn tas till förekomst av malmer, mineraliseringar eller bergartstyper. Däremot tas viss hänsyn till läget för prov tagna inom ramen för NSGs och SGABs regionala kartering, detta för att en eventuell sammanslagning av resultaten från de olika databaserna ska ge så god täckning som möjligt.

Om B-horisonten eller svallkappan är för mäktig för att grävas igenom, där håll påträffas nära markytan eller där materialet är för blött för att kunna provtas, flyttas provpunkten något. Provdjupet varierar efter förhållandena men är normalt 0,6–1,2 m.

Provberedning

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

Ett urval av proven (en del moränprov och alla sedimentprov) analyseras även på fraktionen <2,0 mm. Detta sker för att erhålla information om sambanden mellan ämneshalter i de två fraktionerna, eftersom fraktionen <2,0 mm ofta används inom miljö- och skogssektorn.

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

Analysering

Ett fyrtiotal grundämnen analyseras och ämnenas haltvariation bygger på olikheter i ursprunglig kemisk sammansättning av jordarterna. Analyserna görs av morän med kornstorlek <0,063 mm och av morän och sediment med kornstorlek <2 mm med hjälp av flera olika analysmetoder.

Proven (<0,063 mm) analyseras med röntgenfluorescens (XRF), varvid totalhalter från drygt trettio ämnen erhålls. Dessutom görs en partiell lakning av proven med kungsvatten (<0,063 mm) och 7M HNO₃ (<0,063 mm och <2 mm) och den lösta delen av provet analyseras med plasmateknik (ICP-MS). Guldanalyser har tidigare gjorts med grafitugn och atomabsorption (GF-AAS) men görs sedan 1996 med ICP-MS. Alla guldanalyser (tillsammans med Bi, Sb, Sn m.fl.) har utförts efter lakning med kungsvatten.

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

Det sammanlagda antalet element som analyseras uppgår till ca 40. Parametrar av fullgod eller tillfredsställande analytisk kvalitet som ingår i den geokemiska referenssamlingen är: pH, pH1 (efter H₂SO₄), Ag, Al₂O₃, As, Au, Ba, Be, Bi, CaO, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, Fe₂O₃, K₂O, La, Li, MgO, MnO, Mo, Na₂O, Ni, P₂O₅, Pb, Rb, S, Sb, Se, Sn, Sr, Th, TiO₂, Tl, U, V, W, Y, Zn och Zr. Utöver detta finns

dessutom ett fåtal grundämnen av sämre kvalitet, t.ex. Br, Ga och Nb, som i vissa fall kan användas som indikativa. Pd och Te som beskrivs i texten kommer från den äldre NSG-SGAB-databasen. En närmare beskrivning av provtagning och analysmetodik återfinns i Lax & Selinus (2005).

Kvalitetskontroll

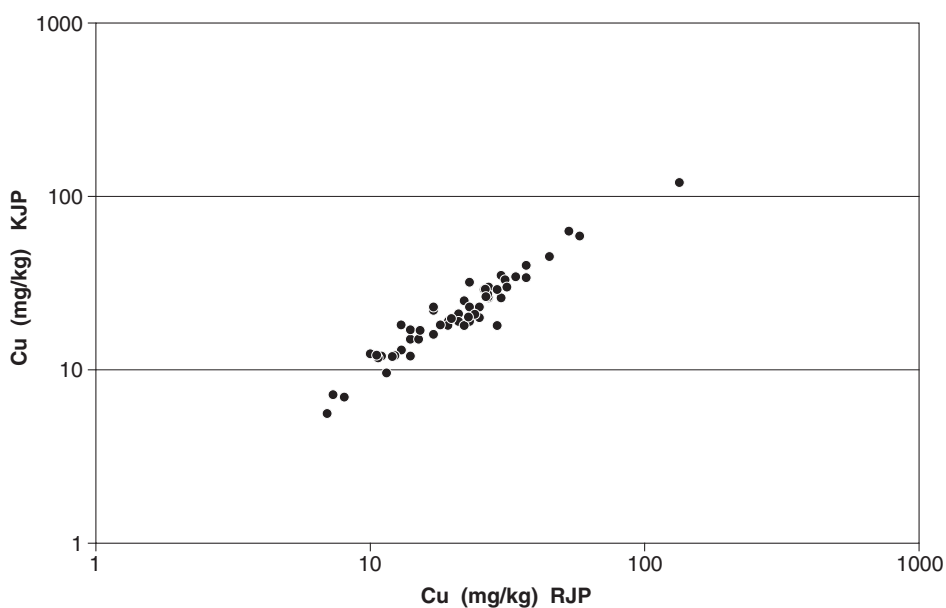
Vid all hantering av analyser är en omfattande kvalitetskontroll nödvändig. Mindre haltvariationer kan uppstå och uppstår i princip i varje enskilt skede vid en geokemisk kartering. Genom att undersöka dubbelprov (replikat) tagna i fält undersöks den s.k. totalvariansen (fig. 3). I denna ingår skillnader som uppkommer på grund av småskalig inhomogenitet i moräners 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 tillräcklig för att bedöma resultatens användbarhet vid geokemisk kartering. Totalvariansen är en minst lika viktig och i vissa fall bättre bedömningsgrund. I dagsläget utgör ca 10 % av alla analyser någon form av kontrollprov.

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 fortloppande analysarbetet finns även kontrollprov inlagda, och en visuell kontroll av resultaten i kartform (där nya resultat jämförs med äldre) sker elementvis. Kvalitetskontrollen påminner till stora delar om den som tillämpas vid Geologiska Forskningscentralen i Finland (Salminen 1995). Vid SGU tillämpas dock sedan 1995 analys i slumpmässig provordning (s.k. randomisering) för att ytterligare öka möjligheterna till kvalitetskontroll.

DATABASEHANDLING

Percentilindelning

Statistisk indelning efter percentiler görs för att visa ett elements halter i en region, exempelvis undersökningsområdet (tabell 1), och jämföra det med landet i övrigt (rikspercentiler, tabell 2). I tabel-



Figur 3. Korrelation mellan fältreplikat och originalprov för Cu (provtagning 2006–2007). Analysmetod Aqua Regia/ICP-MS (n=56). KJP – originalprov, RJP – replikat.

Figure 3. Correlation between field replicate samples and original samples for Cu (sampling 2006–2007). Method Aqua Regia/ICP-MS (n=56). KJP – original sample, RJP – replicate.

Tabell 1. Elementhalter i undersökningsområdet. Bakgrundshalter i morän <0,063 mm i C-horisonten, n=3 397. Indelning enligt percentiler p10–p99, p50=medianvärde. **A.** Totalhalter (XRF). **B.** Syralakade halter.

Table 1. Concentrations of elements in the project area. Background values in the C-horizon of till <0.063 mm, n=3 397. Percentile classes p10–p99, where p50=median value. **A.** Total concentrations. **B.** Leached concentrations.

A.

Totalhalter (Röntgenfluorescens, XRF), mg/kg

	Ba	Cl	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Rb	S	Sr	V	Zn	Zr
p10	511	404	21	47	8	15	12	60	78	190	90	33	316
p30	609	604	25	66	14	21	14	68	106	212	113	38	359
p50	663	787	27	81	21	27	16	75	119	231	127	41	389
p70	725	1002	30	93	31	32	17	81	134	253	138	46	422
p90	806	1352	35	109	48	40	20	93	168	289	156	57	477
p95	858	1548	38	120	59	45	22	100	192	330	165	65	511
p99	965	1939	46	155	133	62	26	124	282	399	185	94	606
max	1507	5193	80	454	672	153	1191	211	9074	715	319	231	1034

Totalhalter (Röntgenfluorescens, XRF), g/kg

	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
p10	126	0,57	29	42	19	15	0,61	28	2,5	629	7,9
p30	137	0,68	33	48	22	20	0,67	33	2,8	655	8,9
p50	143	0,74	35	52	23	23	0,71	36	3,0	670	9,4
p70	149	0,81	38	57	25	27	0,77	39	3,3	685	10,0
p90	159	0,90	42	65	29	33	0,85	43	3,8	706	10,8
p95	166	0,96	44	69	30	36	0,92	44	4,0	718	11,3
p99	183	1,08	50	82	34	47	1,10	47	4,8	741	13,4
max	237	1,68	59	116	49	82	2,75	52	8,2	772	23,8

B.

KM-värde i fraktion <2 mm

Salpetersyralakning (7M HNO₃) med ICP-MS, mg/kg

	Ag	As	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	La	Li	Mo	Ni	Pb	Rb	Se
KM-värde		10	200			0,5	15,0	80	80			40	40	50		
p10	0,021	0,6	27	0,22	0,015	0,02	3,7	8,9	7,5	14,0	4,2	0,10	5,1	2,6	7,1	0,06
p30	0,031	0,8	38	0,29	0,020	0,03	5,2	13,5	12,1	17,1	6,0	0,16	7,7	3,3	10,3	0,10
p50	0,041	1,0	46	0,35	0,025	0,03	6,6	18,1	17,3	19,7	7,4	0,21	10,6	3,9	13,0	0,12
p70	0,053	1,2	57	0,41	0,030	0,04	8,2	23,8	24,8	23,0	9,1	0,28	13,7	4,5	16,4	0,14
p90	0,073	2,1	82	0,55	0,042	0,05	10,7	32,4	37,8	31,9	12,4	0,47	18,5	6,1	23,9	0,18
p95	0,084	2,7	99	0,64	0,050	0,05	12,4	37,2	46,4	39,0	15,0	0,60	21,7	7,4	29,2	0,21
p99	0,111	5,0	165	0,94	0,075	0,07	17,4	56,0	106,0	67,1	21,4	1,11	35,5	10,3	51,1	0,29
max	0,264	46,6	707	1,99	1,790	0,31	37,9	223,1	469,2	200,3	53,7	8,88	83,9	859,1	218,7	1,63

Salpetersyralakning med ICP-MS, mg/kg

Kungsvattenlakning med ICP-MS, mg/kg

	Sn	Sr	Th	Tl	U	V	W	Y	Zn	Au (µg/kg)	Bi (µg/kg)	Pd (µg/kg)	Sb (µg/kg)	Sn	Te (µg/kg)
KM-värde						100			250				12		
p10	<0,4	7,6	3,7	0,05	0,7	16,6	0,03	5,7	10,7	0,3	<0,02	0,1	0,02	<0,4	1,0
p30	<0,4	9,2	5,1	0,07	1,0	22,4	0,04	7,0	14,1	0,6	0,02	0,1	0,03	<0,4	1,0
p50	<0,4	10,5	6,4	0,09	1,3	27,8	0,05	8,2	16,8	0,9	0,03	0,2	0,04	<0,4	3,0
p70	<0,4	12,0	8,0	0,11	1,8	34,8	0,06	9,8	20,3	1,3	0,04	0,4	0,06	<0,4	4,0
p90	<0,4	14,8	11,2	0,16	2,8	45,5	0,11	13,7	28,5	2,7	0,05	0,8	0,11	0,4	6,0
p95	0,40	16,6	13,2	0,19	3,5	50,8	0,14	16,5	36,0	4,2	0,06	1,1	0,14	0,6	7,0
p99	0,57	21,6	19,6	0,30	5,9	64,5	0,24	23,4	60,1	15	0,16	1,63	0,21	1,2	11,0
max	1,21	61,8	69,3	1,19	13,5	195,0	13,31	53,1	164,8	150	2,11	160,1	0,83	3,1	35,0

Salpetersyralakning med ICP-MS, g/kg

	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	pH	pH1
p10	10	0,03	2,8	11	0,6	3,3	0,12	<0,2	1,8	1,09	5,2	3,1
p30	13	0,04	3,8	15	0,9	4,8	0,16	<0,2	2,1	1,35	5,5	3,3
p50	16	0,05	4,5	18	1,2	6,2	0,19	<0,2	2,4	1,55	5,6	3,5
p70	19	0,06	5,1	21	1,5	7,5	0,23	0,20	2,6	1,78	5,8	3,6
p90	25	0,09	5,9	26	2,3	9,9	0,30	0,30	3,0	2,15	6,0	3,8
p95	29	0,11	6,3	29	2,9	11,9	0,36	0,30	3,2	2,39	6,1	3,9
p99	43	0,18	7,1	39	5,8	17,9	0,54	0,40	3,9	3,37	6,4	4,1
max	99	0,79	8,8	105	34,5	62,3	2,19	0,64	6,3	10,92	7,4	4,3

Tabell 2. Naturliga bakgrundshalter samt pH i morän <0,063 mm i C-horisonten. Data från SGUs riksomfattande markgeokemiska kartering. Indelning i percentiler p10–p99, p50=medianvärde. **A.** Totalhalter (XRF). **B.** Kungsvattenlakade halter och ICP-MS. **C.** Salpetersyralakade halter och ICP-MS.

Table 2. Natural background levels and pH in the C-horizon of till <0.063 mm. Data from SGU's geochemical mapping in Sweden. Percentile classes p10–p99, where p50=median value. **A.** Total concentrations. **B.** Aqua regia leached concentrations and ICP-MS. **C.** Nitric acid leached concentrations and ICP-MS.

A. Totalhalter (Röntgenfluorescens, XRF)

	p10	p30	p50	p70	p90	p95	p99	n
Al ₂ O ₃ (g/kg)	116	128	136	144	157	164	180	26343
BaO (g/kg)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	26343
CaO (g/kg)	13	19	22	24	29	32	46	26343
Fe ₂ O ₃ (g/kg)	25	31	37	44	55	59	74	26343
K ₂ O (g/kg)	23	26	29	31	35	37	41	26343
MgO (g/kg)	7	10	13	16	21	23	32	26343
MnO (g/kg)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,6	26343
Na ₂ O (g/kg)	18	23	27	31	36	38	42	26343
P ₂ O ₅ (g/kg)	1,4	2,0	2,3	2,6	3,2	3,5	4,6	26343
SiO ₂ (g/kg)*	675	704	721	738	764	767	825	26343
TiO ₂ (g/kg)	5,2	6,5	7,4	8,3	9,6	10,3	11,7	26343
As (mg/kg)**	<10	<10	<10	11	16	20	32	26343
Cl (mg/kg)	<50	<50	66	91	200	298	1336	26343
Co (mg/kg)	13	17	20	23	29	31	40	26343
Cr (mg/kg)	24	36	48	61	85	99	137	26343
Cu (mg/kg)	6	10	14	19	30	35	61	26343
Mo (mg/kg)	<2	<2	<2	2	2	3	7	26343
Ni (mg/kg)	8	12	16	21	32	39	58	26343
Pb (mg/kg)	16	20	22	26	32	36	57	26343
Rb (mg/kg)	62	74	85	98	120	130	161	26343
S (mg/kg)	91	117	146	197	356	502	1109	26343
Sr (mg/kg)	107	146	173	196	247	277	328	26343
V (mg/kg)	36	48	58	71	99	108	150	26343
Zn (mg/kg)	30	41	50	61	81	92	135	26343
Zr (mg/kg)	323	390	452	534	681	759	931	26343

*Beräknad SiO₂-halt

**Analysmetoden överskattar halter <30 mg/kg

B. Kungsvattenlakning med ICP-MS

	p10	p30	p50	p70	p90	p95	p99	n
BaO (g/kg)	0,02	0,03	0,04	0,05	0,08	0,09	0,14	9763
As (mg/kg)	1	2	3	5	12	20	32	9763
Au (µg/kg)	0,2	0,6	0,9	1,4	2,7	4,5	11,9	9763
Bi (mg/kg)	0,03	0,05	0,10	0,15	0,28	0,38	0,84	9763
Cu (mg/kg)	4	8	11	17	28	33	59	9763
Mo (mg/kg)	0,2	0,3	0,4	0,6	1,1	1,4	3,3	7818
Sb (mg/kg)	0,03	0,04	0,08	0,14	0,26	0,34	0,62	9763
Sn (mg/kg)	<1	<1	<1	<1	1,2	1,5	1,9	9763

lerna används 10, 30, 50 70, 90, 95 och 99:e percentilen. 50:e percentilen utgör medianvärdet, 90:e percentilen innebär att 10 % av antalet analyser för ett specifikt element har halter som överstiger motsvarande analysvärde.

I elementbeskrivningen använder vi termen anomali, som definieras på basis av percentiler: en positiv anomali specificerar värden som är högre än 90:e percentilen och en negativ anomali värden som är lägre än 10:e percentilen. Undantag från detta kan vara när ett elements mönster i kartbilden ger en mindre avvikelse som ansluter till tolkningen av elementet i övrigt.

Undersökning av procentuell lakbarhet

Eftersom ett antal element analyserats för såväl totalhalt som syralakbar halt är det möjligt att undersöka proven även med avseende på hur stor del av totalhalten som löses vid uppslutning med de

Tabell 2. Fortsättning. / Table 2. Continued.
C. Salpetersyralakning (7M HNO₃) med ICP-MS

	p10	p30	p50	p70	p90	p95	p99	n
Al ₂ O ₃ (g/kg)	9	13	17	21	30	36	51	12124
BaO (g/kg)	0,02	0,03	0,04	0,06	0,09	0,12	0,18	12124
CaO (g/kg)	2	3	4	5	6	7	57	12124
Fe ₂ O ₃ (g/kg)	9	14	17	23	33	41	56	12124
K ₂ O (g/kg)	0,5	0,9	1,2	1,7	2,7	3,5	5,4	12124
MgO (g/kg)	2	4	5	7	10	11	17	12124
MnO (g/kg)	0,12	0,18	0,23	0,32	0,53	0,76	1,21	12124
Na ₂ O (g/kg)	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0,2	0,3	0,4	12124
P ₂ O ₅ (g/kg)	1	1,6	1,9	2,3	2,8	3,1	3,9	12124
TiO ₂ (g/kg)	0,6	1,0	1,2	1,4	1,9	2,1	2,8	12124
Ag (mg/kg)	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,15	6830
As (mg/kg)	1	2	3	5	13	21	36	12124
Be (mg/kg)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8	1,0	1,3	12124
Bi (mg/kg)	0,02	0,05	0,09	0,13	0,24	0,32	0,72	12124
Cd (mg/kg)	0,03	0,05	0,07	0,1	0,16	0,24	0,37	12124
Co (mg/kg)	2	4	5	7	10	12	17	12124
Cr (mg/kg)	6	9	13	18	28	34	51	12124
Cu (mg/kg)	5	8	12	17	28	33	58	12124
La (mg/kg)	13	17	20	24	34	43	62	12124
Li (mg/kg)	4	7	9	13	19	23	34	12124
Mo (mg/kg)	0,1	0,2	0,3	0,5	1,1	1,6	4,7	12124
Ni (mg/kg)	4	6	9	13	22	30	45	12124
Pb (mg/kg)	3	5	7	10	16	22	40	12124
Rb (mg/kg)	6	9	12	17	25	31	46	12124
Se (mg/kg)*	0,1	0,15	0,2	0,27	0,47	0,59	0,95	12124
Sn (mg/kg)	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,9	12124
Sr (mg/kg)	6	8	10	13	19	25	89	12124
Th (mg/kg)	4	6	7	9	13	15	21	9673
Tl (mg/kg)	0,05	0,08	0,13	0,19	0,30	0,38	0,60	12124
U (mg/kg)	0,9	1,2	1,5	2,0	3,3	4,2	7,4	12124
V (mg/kg)	10	15	20	26	37	39	58	12124
W (mg/kg)	0,04	0,06	0,09	0,14	0,23	0,33	0,50	12124
Y (mg/kg)	7	9	11	14	19	26	36	12124
Zn (mg/kg)	13	20	29	41	61	78	111	12124

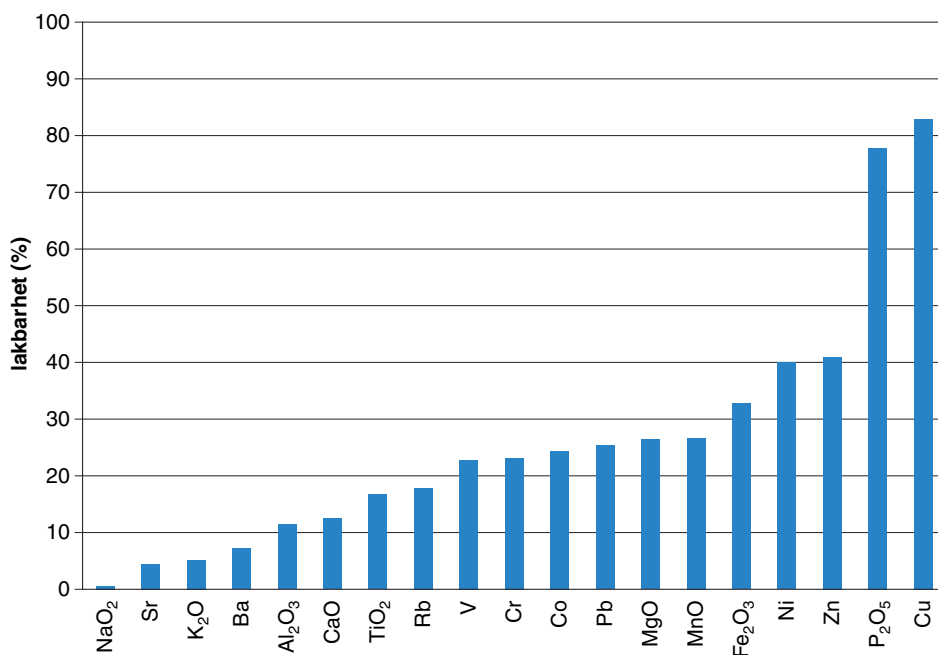
* Låg kvalitet på låga nivåer

pH	fasta klassgränser						
morän	4,6	5	5,5	6	6,5	7	7,5

använda syrorna. Detta tillämpades enbart för element analyserade med 7M HNO₃, och element med stort antal analyser nära nedre bestämningsgränsen för XRF uteslöts. För att erhålla procentuell lakbarhet användes formeln: lakbarhet [%] = (e_{ICP-MS}/e_{XRF}) × 100, där e syftar på elementhalt. Denna parameter undersöktes såväl statistiskt som spatialt (i kartform). Procentuell lakbarhet undersöktes för huvudelementen Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Ti samt spärelementen Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Rb, Sr, V och Zn (fig. 4).

Korrelationer

I texten nämns hur ett element förhåller sig till andra element i en korrelationsmatris. Med hjälp av programmet Statistica 9 undersöktes samtliga element med avseende på korrelationskoefficienter, r (Spearman rank correlation). Här har Spearmans rang-korrelation använts eftersom geokemisk information utgörs av icke normalfördelade data. Metoden är relativt okänslig för extremvärden och är ett vanligt instrument för att mäta systematiska samband mellan variablerna (exempelvis elementen)



Figur 4. Lakbarhet (i procent, medianvärden) i kartområde (baserat på 3 397 prov).

Figure 4. Leachability (in per cent, median values) in the studied area (calculated for 3 397 samples).

i en geokemisk datamängd. I texten används beteckningen relativt starkt för intervallet $r = 0,6-0,7$, och starkt för $r > 0,7$. Om korrelationen är negativ anges detta, annars gäller att koefficienten är positiv.

Faktoranalys

Faktoranalys är ytterligare en statistisk metod som använts för att belysa en variabls uppträdande i olika elementassociationer (faktorer). Metoden har använts på den aktuella datamängden och endast med syftet att mycket översiktligt belysa om en variabel uppträder i fler än en faktor.

Kartor

I rapporten redovisas ett antal analysparametrar i form av singelelementkartor och beräknad (tematisk) karta utvisande förurningsresistens kopplad till aluminiums lakbarhet.

Kartskalan är 1:1 000 000. Utöver de presenterade kartorna kan kartor beställas av totalhalter respektive syralösliga halter av ett fyrtiotal huvud- och spårämnen inklusive guld, samt pH. Kartor utvisande prognos för baskatjonbildning samt lakbarhet för aluminium och andra huvudelement, och lakbarhet för några spårämnen, kan också tas fram. För beställning av kartor kontakta SGUs kundtjänst.

Färgkartorna är gjorda efter att de geografiskt oregelbundet placerade analysvärdena gjorts om till ett regelbundet punktnät (grid) med interpolerade värden. Den färgade ytan visar endast en matematiskt beräknad halt (eller annan parameter), och ska därför behandlas med viss försiktighet. Metoden innebär också att den färgade ytan kommer att täcka även områden med andra sediment än morän.

Färgskalorna för markgeokemiska elementkartor är satta från grönt (låga halter för elementen, höga värden för pH) till rött (höga halter för elementen, låga för pH-värden). 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 – färgskalan används bara för att kunna sätta olika geokemiska regioner i relation till varandra. Klassindelningar med percentiler på färgkartorna grundar sig på rikets klassindelning om inte annat anges.

I tabell 1 och tabell 2 ges jämförande percentiler för det aktuella kartområdet, respektive rikets percentilindelning för analyserade element. Riket avser samtliga prov i den karterade ytan av Sverige

(t.o.m. 2006). De kartor som här baseras enbart på NSG-SGAB-databasen är palladium (Pd) och tellur (Te).

ELEMENTENS FÖREKOMST OCH RÖRLIGHET

Geologiska förutsättningar

Berggrundens kemiska sammansättning varierar beroende på de ingående bergarternas sammansättning och proportioner. Halterna av många metaller är t.ex. jämförelsevis låga i de sura kiselsyrarika bergarter som dominerar den svenska berggrunden. I basiska bergarter finns däremot högre innehåll av bl.a. järn, magnesium, kobolt, koppar, krom och nickel. Om skifferinslag finns blir halterna ofta betydligt högre eller mycket höga för en del spårämnen, t.ex. uran. I tabell 3 visas huvudsaklig bergartstillhörighet för element i vanligt förekommande bergarter i Sverige. Huvudskillnader mellan sura och basiska bergarter är kiselhalter, höga i sura bergarter och låga i basiska bergarter. Dessutom är magnesiumhalterna höga i basiska bergarter och låga i sura bergarter vilket resulterar i att basiska bergarter i allmänhet är mörka och sura ljusa. I tabell 4 visas medelhalterna för element i olika vanligt förekommande bergarter i Finland (Koljonen 1992), där bergarterna är relativt lika jämfört med Sveriges bergarter.

Moräners innehåll av olika mineral beror till största delen på de ingående nedkrossade bergarterna med varierande kemisk sammansättning. I tabell 5 visas det genomsnittliga innehållet i en 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. (Notera att huvudelementen kisel t.o.m. barium inte är i oxidform i tabellen.) Utöver det minerogena innehållet finns det också exempelvis kol. På det djup moränproven insamlas är förekomsten av organiskt material mycket liten, men i vissa fall kan djupa tunna rottrådar eller rester av sådana medföra att kol förekommer. I ett begränsat test av kolinnehållet i ett tiotal moränprov 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 indikerar totalhalter av bl.a. kalium och bly oftast kalifältspater medan syralakade halter av samma element istället visar elementens lösliga förekomst t.ex. i biotit som är ett vanligt förekommande mineral. Basiska bergarter och diabaser markeras av förhöjningar av den mafiska elementgruppen, med kalcium, järn, magnesium, kobolt, koppar, krom, nickel, vanadin m.fl. Granitiskt och pegmatitiskt bergartsmaterial ger sig till känna som förhöjningar av bland annat bly, uran, tenn, wolfram och molybden.

En tidigt avsatt morän kan också påverkas av senare isrörelser med annan riktning än den som huvudsakligen transporterat moränmaterialet. Detta tillsammans med att isen fört med sig såväl eventuella gamla jordarter som lossbrutet bergartsmaterial och avsatt det som morän, gör att de geokemiska mönstren ibland kan vara komplexa och svårtolkade. Moränen i ett område har också transporterats mer eller mindre långt och har därför ofta en något annorlunda sammansättning än den underliggande berggrunden. Tydligast syns detta där t.ex. ett granitiskt berggrundsområde har en ovanliggande morän med inslag av basiska bergarter. Kartbilden får då områden med högre halter av t.ex. magnesium i en annars magnesiumlåg region. Detta kan bl.a. ses öster om fjällkedjeranden, där vissa fjällkedjeborgarter uppträder i moräner som underlagras av olika granitoider.

Geokemiska elementmönster kompletterar ofta den isrörelseriktning som indikeras av isräfflor och kan också vid mer noggranna studier användas bl.a. som indikation på transportlängd av bergartsmaterial.

Faktorer som ibland kan påverka de geokemiska mönstren är tunna jordtäckan, deposition av svavel och andra luftburna havsaerosoler och föroreningar samt hög nederbörd (Andersson 2006).

Tabell 3. Bergartstyper med associerade element.

Table 3. Rock types and associated elements.

Bergarter	Förhöjda halter
Graniter	Au, Ba, Be, Bi, Cl, K, La, Mo, Pb, Rb, Sn, Th, Tl, U, W, Y, Zr
Sura vulkaniska bergarter (ryoliter, andesiter m.fl.)	Ag, As, Cd, Cu, Hg, Pb, Se, Zn
Basiska bergarter (gabbror, basalter m.fl.)	Ca, Fe, Mg, Mn, P, Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, S, Sr, Ti, V, Zn
Skiffrar	Al, Ag, As, Au, Ba, Bi, Cd, Cl, Co, Cu, La, Li, Mo, Ni, Pb, Rb, S, Sb, Sn, Se, Th, Tl, U, W, Y, Zn

Tabell 4. Medelhalter av element i olika vanligt förekommande bergarter (mg/kg, Koljonen 1992, Tauber 1988).

Table 4. Average whole rock concentrations of elements (mg/kg) in common rock types occurring in Scandinavia (Koljonen 1992, Tauber 1988).

Element	Ultrabasiska bergarter ¹	Gabbro, basalt ¹	Skiffrar ¹	Graniter, granodioriter ¹	Sandstenar ¹	Kalkstenar ¹	Kol ²
Aluminium	20000	83000	91000	73000	37000	4000	21000
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	94000	86000	55000	20000	10000	5000	10000
Kadmium	0,05	0,2	0,25	0,1	<0,04	0,1	1
Kalcium	25000	74000	22000	9000	13000	380000	5000
Kalium	5000	8000	27000	33000	11000	3000	3500
Kisel	201000	227000	288000	337000	403000	31000	34000
Klor	80			200	10	150	
Kobolt	110	45	20	4	0,3	0,1	10
Koppar	40	90	45	12	2	6	20
Krom	2300	250	100	10	35	5	20
Kviksilver	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	208000	64000	16000	5000	7000	4000	2600
Mangan	1200	1500	850	400	100	700	40
Molybden	0,3	1,2	2	1,5	0,3	0,3	3
Natrium	6000	20000	13000	25000	17000	6000	900
Nickel	2000	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	20000
Tallium	0,05	0,18	1	1,1	0,4	0,05	3
Tenn	0,3			3,6	0,6	0,3	
Titan	3000	10000	6000	3000	1500	400	1000
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 5. Innehåll (medianhalter) i 1 kg svensk morän (C-horisont, fraktion <0,063 mm). Uppgifter hämtade från SGUs markgeokemiska databas (2004), sort anges i gram.

Table 5. Average elemental concentrations in 1 kg of till (C-horizon, fraction <0.063 mm). Data from SGU's database (2004).

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

Markprocesser

Om markens buffringsförmåga är låg sjunker pH när försurande vätejoner tillförs, antingen via naturliga processer eller antropogen försurning. När pH sjunker ökar urlakningen av näringsämnen, aluminium och vissa metaller, t.ex. kadmium, och dessa transporteras ut i vattendragen. Andra ämnen som fosfor och molybden binds hårdare i marken. Buffring vid måttligt låga pH-värden, mellan 6,2 och 4,2, sker genom att vätejonerna byts ut mot tillgängliga joner av kalcium, magnesium och kalium, vilka då lakas ur. Om tillgången på dessa joner är stor, t.ex. om berggrunden består av kalksten, är denna buffring mycket effektiv. I urbergsområden är dock detta buffringssystem ofta av underordnad betydelse. Detta beror på att även om t.ex. granit och gnejs innehåller kalciummineral (såsom plagioklas) är vittringsbenägenheten lägre. Sjunker pH under 4,2 börjar buffring med aluminiumjoner att ske som då istället tillförs markvattnet, ofta tillsammans med bl.a. kadmium, nickel, mangan och zink. Indikationer på vilket buffringssystem som råder kan beräknas med hjälp av bl.a. två pH-värden, före och efter tillsättning av svavelsyra. Den så uppkomna försurningsresistensen visar den procentuella del av ett prov som inte berörs av en pH-sänkning vid tillförsel av vätejoner. Är försurningsresistensen total, dvs. 100 %, råder med all sannolikhet karbonatbuffring. När försurningsresistensen är under 100 % har i stället det effektiva aluminiumbuffringssystemet trätt i kraft. Om tillgången på lösliga aluminiummineral är låg sker silikatvittring och jonbytesbuffring istället, vilket är positivt för markvattnet som får tillskott av gynnsamma joner, men förrådet i marken minskar naturligtvis. Detta buffringssystem är ganska långsamt, vilket indikeras av lägre försurningsresistens (runt 90 %). Någon klar gräns mellan de olika buffringssystemen går inte att fastlägga, eftersom de olika systemen överlappar varandra. Neutralisationsprocesserna beror bland annat på markens vittringsbenägenhet och på den katjonbildande förmågan.

Vertikalt i marken varierar den kemiska sammansättningen bl.a. på grund av jordmånsbildande markprocesser. Vilken typ av jordmån (markprofil) som bildas beror på ett flertal faktorer, bland dem kan nämnas jordart, mineralinnehåll, markanvändning, vegetation och klimat. Den vanligaste jordmånen i svensk skogsmark är podsol, som utvecklas i näringsfattiga marker (fig. 2). I dess översta mineraljordshorisont, blekjorden, har kemiska och biologiska processer lakat ur de flesta huvudämnen och metaller. Några av dessa, t.ex. järn och aluminium, har fällts ut i den underliggande, ofta rostfärgade B-horisonten. Den kemiska sammansättningen i dessa båda markskikt beror främst på innehållet av primära (bergartsbildande) mineral och på sekundära mineral och föreningar som bildats vid vittring och utlakning. 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 bergartsmineral. Undantag från detta är t.ex. vissa sulfidmineral som är instabila ovan grundvattenytan. Metaller som frigjorts när dessa mineral vittrat har istället fastlagts i andra former, exempelvis genom jonbytesprocesser (t.ex. 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 lösligt vid en tillsats av syra, i detta fall kungsvatten eller salpetersyra. 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.

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

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

Tillgången av elementen beror alltså på mineralinnehållet i moränen och miljön som moränen befinner sig i, dvs. pH, oxiderande eller reducerande miljö etc. Genom att kombinera information om ett elements totala spridning i moränen med dess lakbarhet får man en indikation om en regions geokemiska status. 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, och strontium förekommer därför i de flesta mineral som innehåller kalcium. I magmatiska bergarter varierar dock förhållandet, eller kvoten, mellan dem beroende på i vilket kristallisationsskede bergartens mineral bildats. I ett tidigt kristallisationsskede i en svalnande magma dominerar kalciumjonen över strontiumjonen. Detta innebär att andelen kalcium i förhållande till andelen strontium är högre i apatit och pyroxen, eftersom dessa mineral bildas först i den stelnande magman. I senare skeden bildas plagioklaser, och förhållandet mellan elementen ändras så att andelen kalcium minskar medan strontium ökar. Genom att studera mönstret för kvoten mellan dessa element, 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.

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 grundämnena har dokumenterats på många håll i världen. I Sverige är sådana samband inte vanliga, till stor del beroende på att den kost som människor konsumerar ofta härstammar från många olika håll varför den lokala markens påverkan inte blir så stark. Det bör betonas att vad gäller

sambanden med hälsoeffekter är dessa komplexa och ibland svårutredda. Samband som trots allt har påpekats eller antagits i Sverige är bl.a. mellan markradon och lungcancer, selenbrist och hjärtsjukdomar och mellan kadmium i dricksvatten och barndiabetes. Hårt dricksvatten, dvs. vatten med mycket kalcium och magnesium, anses däremot ha en positiv effekt genom ett samband med lägre frekvens uppkomna hjärt- och kärlsjukdomar. Dylika samband har konstaterats vara relativt vanliga internationellt (Karppanen 2002). Under senare tid har även förekomst av uran i dricksvatten identifierats som en riskfaktor (Kurtio m.fl. 2002), och 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 i denna rapport klassas som höga, innebär detta inte automatiskt att det finns någon risk för negativ miljöpåverkan. Dels kan elementen vara relativt hårt bundna till mineral, dels kan förekomst av element med antagonistisk effekt (t.ex. kadmium–selen) påverka eventuella risker. För konkreta riskbedömningar krävs betydligt mera ingående undersökningar än vad som har gjorts här.

OMRÅDETS GEOLOGI

Berggrunden

Undersökningsområdet omfattar de nordostligaste delarna av Norrbotten (fig. 5). Berggrunden tillhör den nordligaste delen av den Fennoskandiska skölden (fig. 6). Området visar starka geofysiska anomalier (fig. 7) som kopplas till berggrunden, dess egenskaper och strukturer. Urbergssköldens äldsta bergarter bildades under den Samiska orogenesen (bergskedjebildning) för ca 3,5–3,0 miljarder år sedan. Dessa bergarter förekommer som rester bland mer utbredda, yngre arkeiska bergarter som uppstod under en annan bergskedjebildning, nämligen den Lopiska för ca 2,9–2,6 miljarder år sedan. Tidigt under paleoproterozoikum, för ca 2,4–1,96 miljarder år sedan, bildades stora riftbassänger i vilka sedimentära bergarter avsattes. Ungefär samtidigt pågick en omfattande magmatisk aktivitet med dominerande basisk karaktär. Under den Svekokarelska orogenesen, för ca 1,96–1,75 miljarder år sedan, avsattes både vulkaniska och sedimentära bergarter som sedan intruderades av flera generationer av magmatiska bergarter. För ca 500–400 miljoner år sedan kolliderade den Fennoskandiska skölden med kontinenten Laurentia (som nu motsvarar ungefär Nordamerika och Grönland) under den Kaledoniska orogenesen som bildade fjällkedjans bergarter.

Arkeiska bergarter

Arkeiska bergarter tangerar de nordligaste delarna av undersökningsområdet. De domineras av ådrade metagranitoider med tonalitisk, granodioritisk och kvartsdioritisk sammansättning samt suprakrustala bergarter. De senare är gnejser med sedimentärt ursprung och intermediära till sura metavulkaniter. Dessutom finns amfiboliter i området.

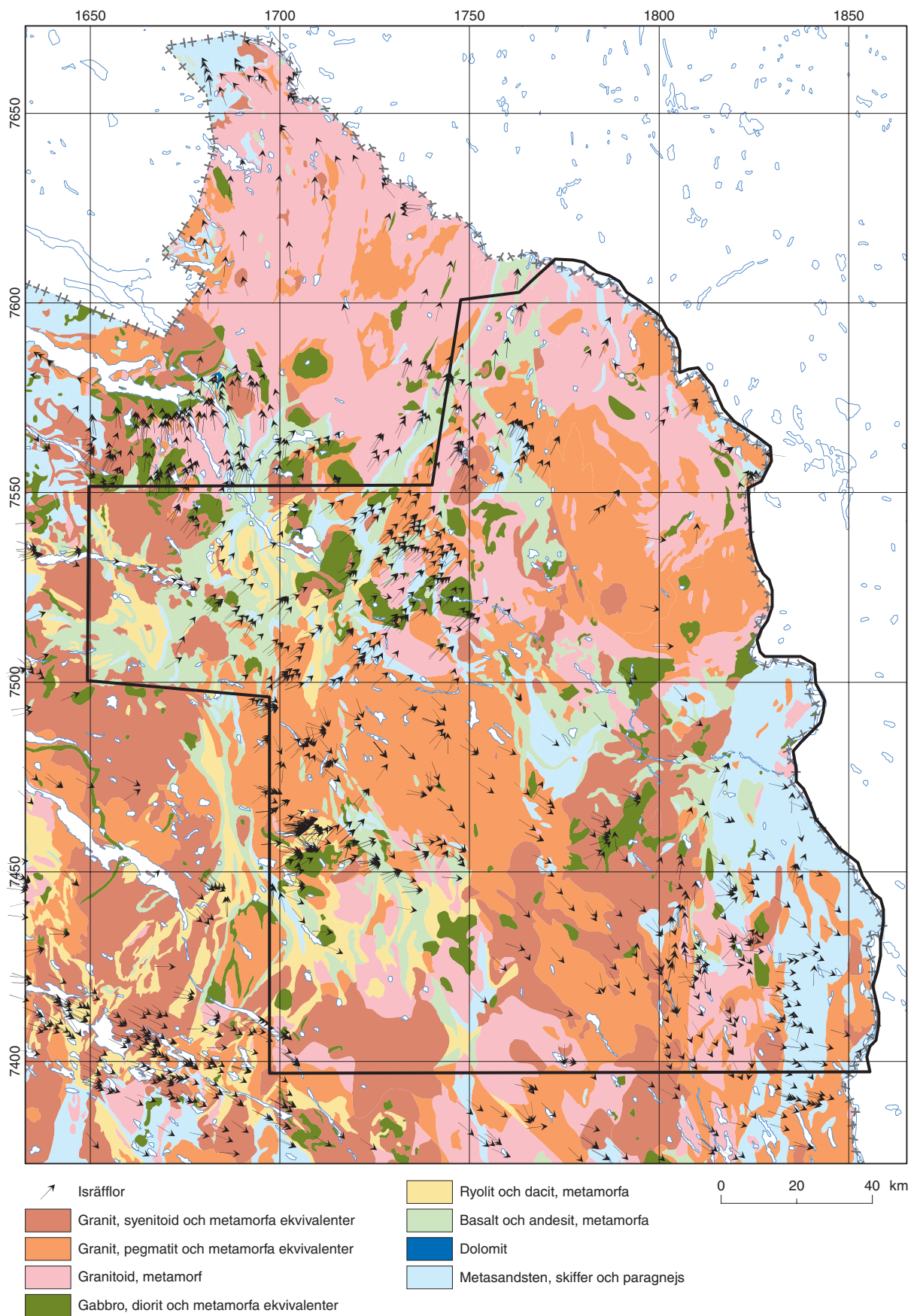
Proterozoiska bergarter

De äldsta proterozoiska bergarterna (ca 2,44 miljarder år gamla) har ultrabasiska eller basiska sammansättningar. De finns bl.a. vid Karesuando.

Karelska bergarter (2,4–1,96 miljarder år gamla) indelas i Kovo- och grönstensgrupperna. Kovo-gruppen domineras av klastiska metasedimentära bergarter som konglomerat och kvartsit i området kring Kiruna. De växellagrar med tholeitiska metabasalter och kalkalkalina metavulkaniska bergarter. Grönstensgruppen består företrädesvis av metabasalter, grafitförande metaargilliter, marmor samt

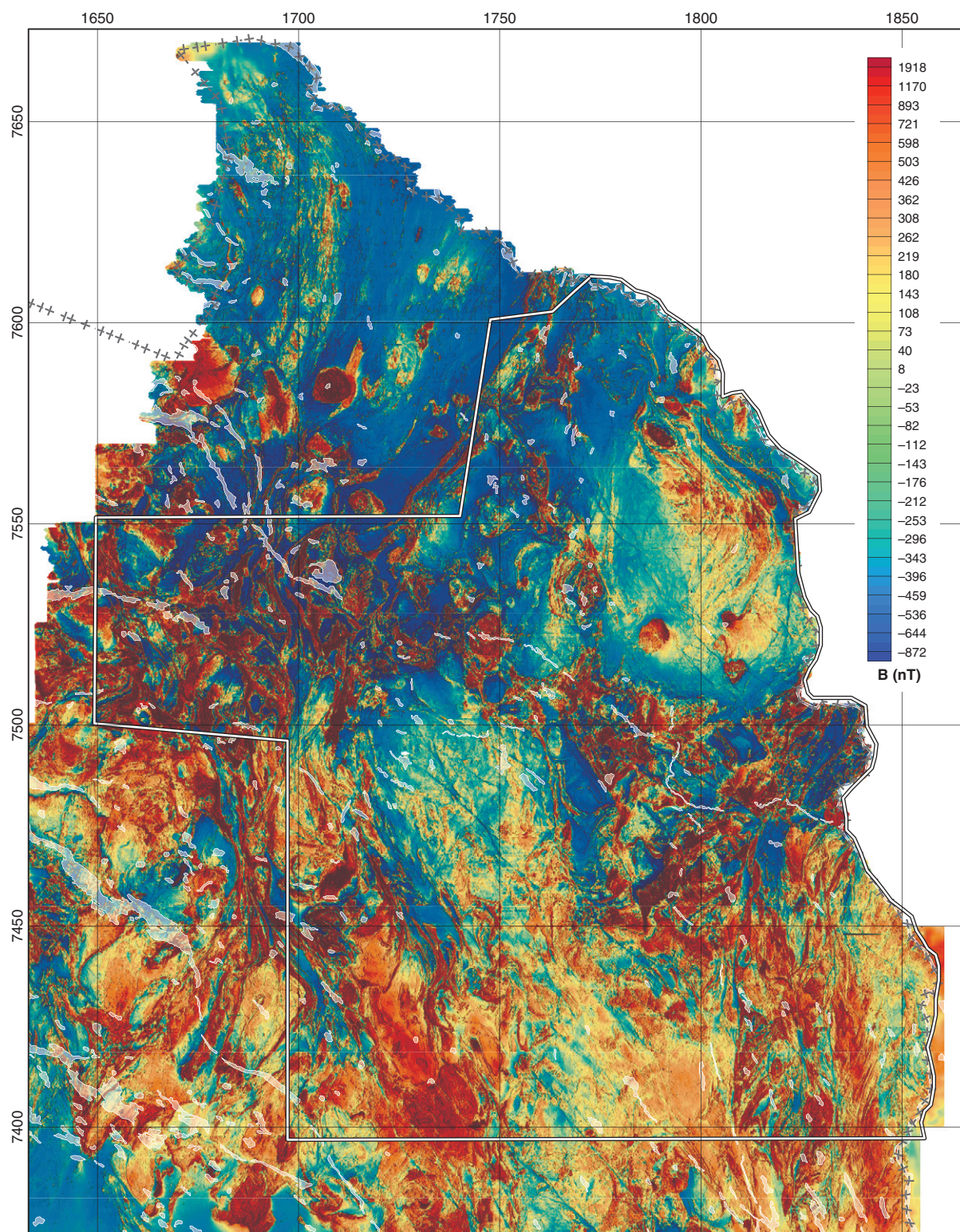
0 20 40 60 80 km

0 20 40 60 80 km



Figur 6. Berggrundskarta med isrörelseriktningar.

Figure 6. Bedrock map with ice movement directions.



Figur 7. Magnetfältskarta.

Figure 7. Magnetic total field map of the studied area.

Grönstensgruppen täcks av svekofenniska (1,96–1,85 miljarder år gamla) metasedimentära och meta-vulkaniska ytbergarter. De svekofenniska metasedimentära bergarterna består av metakonglomerat och metaareniter med underordnade karbonater och kalksilikatbergarter (skarn). I Kirunaområdet överlagrar metakonglomerat och metasandstenar (Kurravaarakonglomerat) bergarter från grönstens-

gruppen. Söder om Masungsbyn och sydväst om Pajala finns metaargillitiska bergarter med andalusitförande glimmerskiffer, sillimanitrika glimmerskiffrar och ådrade gnejser.

De svekofenniska metavulkaniterna indelas i en stratigrafiskt underliggande Porfyritgrupp och en överliggande Porfyritgrupp. Porfyritgruppen består av kalkalkalina metaandesiter och metabasalter som växellagrar med sura metatuffer och metatuffiter. Porfyritgruppen består av metabasalter, metatrakandesiter, metaryodaciter och metaryoliter. Porfyritgruppens bergarter har generellt lågt innehåll av titan och zirkonium vilket skiljer dem från Porfyritgruppens bergarter som har höga titan- och zirkoniumhalter. Vissa partier av porfyritgruppen har genomgått metasomatisk omvandling, till exempel den så kallade Under Haukiserien som återfinns i området strax norr om Kiruna stad.

I området kan sex olika sviter av intrusiva bergarter urskiljas: Haparandasviten, pertitmonzonitsviten, 1,86–1,84 miljarder år gamla granitoider, granit-pegmatitsviten, granit-syenitoid-gabbroidassociationen och gabbro-metagabbro-diabassviten. Bergarterna som ingår i Haparandasviten uppträder framför allt i de östra delarna av området. Sammansättningsmässigt finns metagrabbro, metadiorit, metamonzodiorit, metamonzonit, metagranodiorit och metagranit. Metasyenitoider finns främst i de centrala delarna av undersökningsområdet, mellan Vittangi och Huuki, medan metagraniter dominerar i områdena kring Karesuando och Muonionalusta. Den kemiska trenden är alkalikalkig till kalkalkalin. Jämfört med de arkeiska bergarterna har Haparandasviten högre innehåll av kalium och torium.

Pertitmonzonitsviten består mest av kvartsmonzoniter, monzoniter och graniter. Det som kännetecknar dessa bergarter är att den kalifältspat som finns är pertitisk. Sviten har sin större utbredning i de västra delarna av området, och syenitoiderna dominerar kraftigt över granit. Det finns enklaver och andra hybridiseringsfenomen som visar att mingling och magmablandningsprocesser bidrog till deras bildning. Underordnat finns även gabbro och diorit samt ultrabasiska bergarter som pyroxeniter och serpentiniter. Den dominerande kemiska trenden är alkalikalkig. Pertitmonzonitsviten har, jämfört med Haparandasviten, högre innehåll av kalium, titan, yttrium och zirkonium samt lägre innehåll av strontium.

I den östra delen av området finns granitoider som bildades för ca 1,86–1,84 miljarder år sedan. De har granitisk till granodioritisk sammansättning. Lokalt finns xenoliter av amfiboliter och metapyroxeniter samt biotitrika band och rester av delvis assimilerade äldre bergarter. Kemiska analyser visar en ganska tydlig kalkalkalin trend. Tillsammans med granitoiderna finns genetiskt associerade pegmatiter.

Granit-pegmatitassociationens bergarter bildades för ca 1,8 miljarder år sedan och är i litteraturen känd som Linagranit. Halten av mörka mineral är låg med biotit som dominerande fas. Muskovit är förhållandevis sällsynt. Graniten är associerad med granitiska pegmatiter som i vissa områden bildar stora massiv. I graniten är det vanligt med fragment från sidoberget. Gångar av graniter, pegmatiter och apliter finns ofta i omgivande bergarter. Associationen har relativt högt innehåll av rubidium och torium.

Bergarter som tillhör granit-syenitoid-gabbroidassociationen bildades också för ca 1,8 miljarder år sedan. Sammansättningen varierar från gabbro till granit. De intermediära bergarterna är monzoniter och monzodioriter, men även syeniter samt kvartsrikare varianter som kvartsmonzonit och kvartsmonzodiorit förekommer. De har alkalikalkig karaktär.

Längst i öster finns gabbro, metagabbro och diabas som är yngre än 1,8 miljarder år. Lokalt graderar de till anortositer. Gabbroerna har förhöjt innehåll av järn, aluminium, fosfor, titan och svavel.

Under neoproterozoikums senare del skedde en transgression som ledde till omfattande sedimentation. Lagerserien består av kvartsit, sandsten, siltsten samt tunna lager av skiffrar och alunskiffrar.

En mer detaljerad beskrivning av Norrbottens geologi finns i Bergman m.fl. (2001).

Mineraliseringar

Norra Norrbotten utgör en av Europas malmtätaste regioner (fig. 8) och här finns några av kontinentens viktigaste gruvor, t.ex. järnmalmsgruvorna i Kiruna och Malmberget och koppargruvan i Aitik. Järnmineraliseringarna i Norrbottens län var kända redan på 1600-talet, men det var inte förrän järnvägen byggdes runt år 1900 som de kunde utvinnas lönsamt. Inom några år dominerades svensk

järnmalmproduktion av Kiruna och Malmberget. Idag kommer nästan all svensk järnmalm därifrån. Förutom de stora malmerna finns över 550 beskrivna mineraliseringar i länet. I många av dem har det pågått gruvbrytning. De som nämns i texten visas i figur 8 och tabell 6.

Den förbättrade infrastrukturen i norra Sverige öppnade regionen för prospektering efter andra råvaror. Det första malmblocket från vad som skulle bli koppargruvan Aitik hittades 1930. Efter ett omfattande prospekteringsarbete öppnades gruvan 1968. Från en blygsam produktion på 1–2 miljoner ton per år har gruvbrytningen successivt utökats och kommer inom några år att nå 36 miljoner ton per år.

Några år efter att Aitik kommit i produktion hittades en kopparmalm bara fyra kilometer väster om Kiruna. Gruvan gavs namnet Viscaria efter namnet på den koppartåliga blomman som ledde prospektörerna till området. Gruvan var i produktion 1982–1997 men det finns avancerade planer på att öppna den igen för att utvinna kvarvarande malm.

Just nu pågår arbeten för att återuppta brytningen av dagbrottsgruvan Leveäniemi i Svappavaara, fyra mil sydost om Kiruna. Gruvan drevs från 1964 till 1983 då den stängdes av marknadsskäl. Genom att börja bryta Leveäniemi och dagbrotten Gruvberget och Mertainen planerar LKAB att öka sin produktion med 35 procent till år 2015.

Gruvföretaget Northland Resources AB har under de senaste åren genomfört omfattande gruvförberedande arbeten i Kaunisvaaraområdet i Pajala kommun. Företaget har nu beslutat att öppna den första gruvan som dagbrott i Tapulivuoma. Anläggningsarbetena startades under början av 2011. Planerna är därefter att öppna gruvan vid Stora Sahavaara och Pellivuoma. Malmbrytningen beräknas börja under 2013 (Northland Resources 2010).

Förutom de stora malmerna finns över 550 beskrivna mineraliseringar i länet. Många av dem har tidigare brutits.

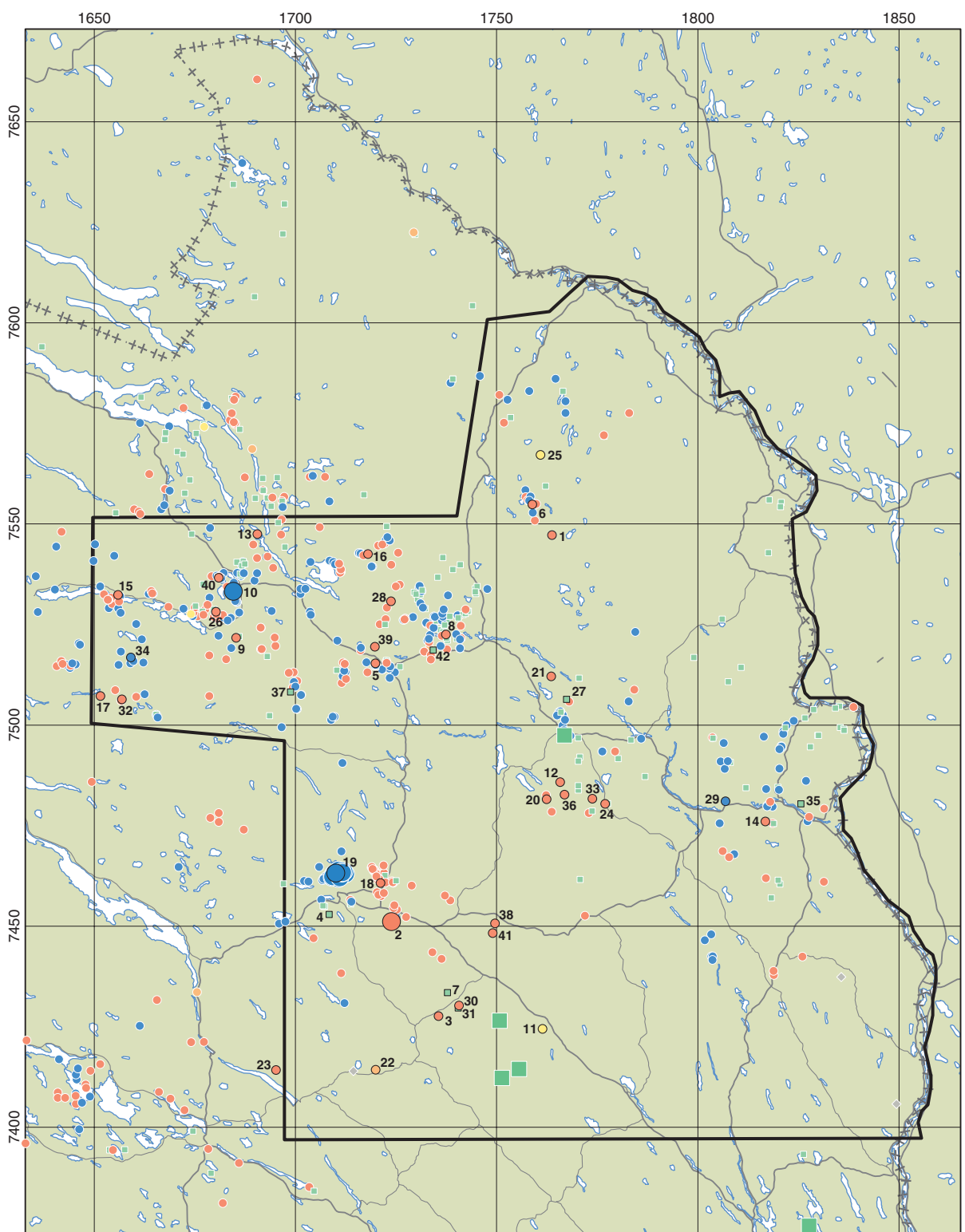
Hydrotermala omvandlingar (metasomatos) och exempel på deras avspegling i morängeokemin

Inte sällan finns geokemiska anomalier i berggrunden i närheten av malmförekomster som reflekterar deras mineralogiska och kemiska innehåll. På samma sätt finns förhöjda koncentrationer av vissa element i anslutning till hydrotermalt omvandlade bergarter. Spridningsmönstren i morän relaterade till anomala halter av dessa element är ofta utsträckta längs isrörelseriktningen och speglar omvandlingens kemi och mineralogi. Eftersom flertalet av mineraliseringarna i Norrbotten är rumsligt kopplade till hydrotermalt omvandlade bergarter utgör denna iakttagelse värdefull information för malmetning. I de fall det också finns en genetisk koppling mellan de omvandlade bergarterna och mineraliseringarna har vi i morängeokemin ett utomordentligt betydelsefullt prospekteringsinstrument.

För att utarbeta detta verktyg krävs främst en systematisering och klassificering av metasomatiska omvandlingar. Noggranna studier av de metasomatiskt omvandlade bergarter som dominerar i området bör kunna ge nya infallsvinklar beträffande deras kemiska och mineralogiska egenskaper, relation till mineraliseringarna, anknytning till specifik magmatisk aktivitet samt metamorfa och tektoniska händelser osv. En detaljerad beskrivning av bergarternas kemiska karaktärsdrag skulle ha betydelse för tolkningen av resultaten från indirekta prospekteringsmetoder som geokemisk provtagning av morän.

Stora delar av berggrunden i undersökningsområdet har drabbats av omfattande metasomatiska omvandlingar av regional karaktär. Den mest påtagliga är så kallad natriumomvandling (natriummetasomatos) som yttrat sig i form av betydande spilitisering, albitisering och skapolitisering. Skapolitomvandlingen har stor utbredning och förekommer i många intrusiva och sedimentära bergarter av proterozoisk ålder (Bergman m.fl. 2001, Melezhik m.fl. 2005). Däremot är den sällsynt i de arkeiska bergarterna.

Natriumomvandlingen tros ha uppstått genom upplösning av halit från idag försvunna evaporitlager under regionalmetamorfosen eller genom en mäktig metasomatisk omvandlingsprocess. Nyligen upptäcktes välbevarade evaporitlager i Onegaområdet i ryska Karelen, vilket bekräftar teorin om att evaporitupplösningen till stor del kan förklara den betydande natriumomvandling som präglat regionen och, inte minst, den enorma kloranomali i morän som är typisk för Norrbotten (fig. 9).



Aktiva gruvor

- Sulfider
- Järnmalm
- Industrimineral

Övriga mineralförekomster

- Sulfider
- Ädelmetaller
- Järnmalm
- Andra oxider
- Industrimineral
- Ornamentsten
- Industriella bergarter

0 20 40 60 80 km

Figur 8. Gruvor och mineraliseringar i och omkring undersökningsområdet. Mineraliseringar som nämns i texten är markerade med svart kontur och siffra. Siffran återfinns i tabell 6.

Figure 8. Mines and mineralisations within and surrounding the study area. Mineralisations referred to in the text are marked with black contour and a number. This number is found in Table 6.

Tabell 6. Fyndigheter som omnämns i texten. Dessa finns också markerade i figur 8. Koordinaterna är angivna i RT90.
 Table 6. Mineralisations mentioned in text. These are marked in Figure 8. Coordinates in national grid RT90.

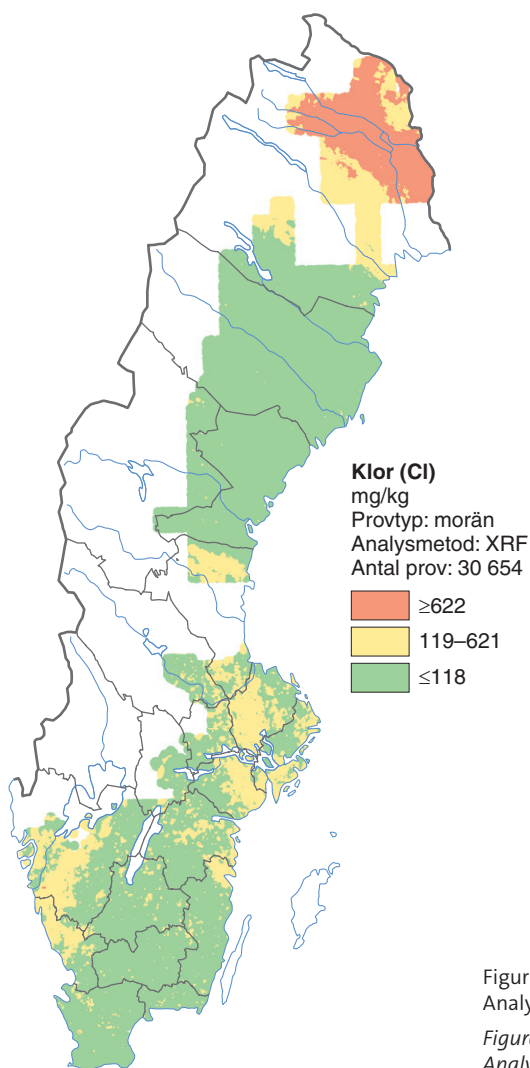
Nr	Fyndighet	N-koordinat	Ö-koordinat	Mineraliseringstyp
1	Ahmavuoma	7547150	1763850	Mo, Co, Cu, Au
2	Aitik	7451000	1723950	Cu, Au
3	Artuvaara	7427509	1735637	As, Pb, Zn, Cu,
4	Dundret	7452900	1708400	Mg-silikat
5	Gruvberget	7515250	1719950	Cu
6	Huornaisenvuoma	7554750	1758950	Pb, Zn, Cu, Ag
7	Iso Sormus	7433426	1737799	Mg-silikat
8	Jälketkurkkio	7522440	1737500	Ni, Co, Cu, Au
9	Kalixfors	7521600	1685350	Ni, Mo, Co, Cu, Ag
10	Kirunavaara	7533150	1684600	Fe, apatit
11	Koppelovaara	7424363	1761453	Au
12	Kurkkionvaara	7482600	1766950	Pb, Zn, Ag
13	Kurravaara Nya	7547370	1690590	Cu
14	Kursunoja	7475950	1816850	Cu, Au
15	Laukujärvi	7532300	1655950	Co, Cu, Au
16	Leppäsuanto	7542500	1718100	Zn, Cu, Ag, Au
17	Lieteksavo	7507100	1651600	Cu, Ag, Au
18	Liikavare	7460645	1721235	Cu
19	Malmberget	7461300	1706800	apatit, Fe
20	Maunuvaara	7481435	1762495	Te, Bi, W, Mo, Cu, Ag
21	Merasvaara	7512000	1763650	Mo
22	Meuresvare	7414200	1720000	U, Cu
23	Mäskoskärso	7414100	1695250	Pb, Ag
24	Oriasvaara	7480300	1777050	Cu, Ag, Au
25	Outavaara	7567100	1761000	Au
26	Pahtohavare	7528109	1680291	Cu, Au
27	Palo Pöyviö	7506350	1767400	grafit
28	Paurankilantto	7530700	1723800	Mo, Co, Cu
29	Peräjävaara	7480940	1806950	apatit, Fe
30	Puolalaki	7429978	1740587	As, W, Cu, Au
31	Purnu-Puolalaki	7429777	1740509	olivin
32	Pärkajaure	7506300	1656900	Cu, Ag
33	Rappukoski	7481600	1773900	Mo, Cu
34	Renhagen	7516700	1659150	apatit, Fe
35	Rytivaara	7480400	1825650	Mg-silikat
36	Saarikoski	7485700	1765850	Cu, Au
37	Saivo	7508200	1698800	bentonit
38	Suorravaara	7450600	1749700	Bi, pyrite, Mo, Cu, Ag, Au
39	Särkivaara	7519400	1719820	Mo, Cu, Au
40	Viscaria	7536540	1681000	Cu, Zn, Ag, Fe-sulfider
41	Vähävaara	7448156	1749124	Cu, Au, Mo
42	Äijärova	7518600	1734250	grafit

Spilitiseringen och albitiseringen av grönstensgruppens bergarter kan till viss del även vara syngenetisk och återspegla de subakvatiska, marina bildningsförhållandena som rådde vid bergartsavsättningen.

Vår moränundersökning har på ett antal ställen avslöjat tydliga geokemiska signaturer som sannolikt kan kopplas samman med hydrotermalomvandlade bergarter bildade genom sur urlakningsmetasomatos. Moränen kännetecknas i dessa områden av höga halter av kisel, aluminium, kalium, barium, strontium, järn, fosfor, titan, arsenik, vismut, uran, molybden och wolfram. Nedan beskrivs några exempel i korthet.

Undre Haukiseriens sericit- och kvarts-sericitmetasomatiter

Undre Haukiseriens bergarter har historiskt betraktats som metasomatiskt omvandlade (Högbom 1910, Geijer 1931, Frietsch 1966). Mineralsammansättningen i dessa bergarter består huvudsakligen



Figur 9. Klor i morän.

Analysmetod: XRF

Figure 9. Chlorine in till.

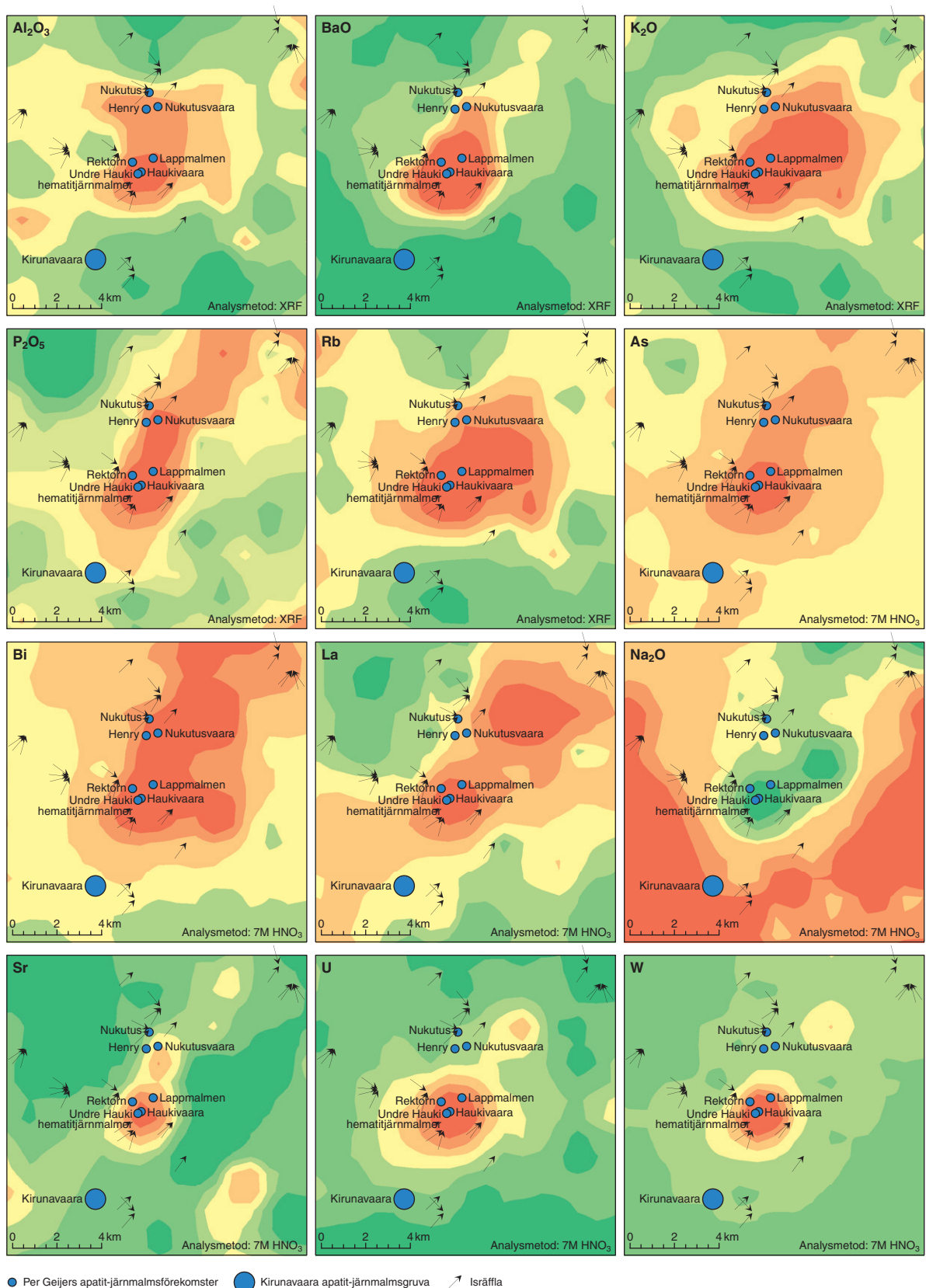
Analytical method: XRF

av sericit och kvarts i varierande halter. I underordnad mängd finns även biotit och klorit. Kalcit eller ankerit uppträder ibland relativt rikligt. I små eller accessoriska mängder ingår apatit, titanit-leukoxen, turmalin, allanit, baryt, zirkon och mer sällan flusspat. Det vanligaste malmmineralet i de sericit- och kvarts-sericitomvandlade bergarterna är hematit.

Undre Haukiseriens såväl kemiska som mineralogiska karaktärsdrag stämmer väl överens med de karaktäristiska berggrundsdrag som relaterar till så kallade argillitiska omvandlingar (Pirajno 2009, Gifkin m.fl. 2005, Seedorff m.fl. 2005) eller argillisiter (Fettes & Desmons 2007, Bardina & Popov 1992, Popov & Bogatkov 2001, Zharikov & Zarskiy 1991). De bildas i en sur urlakningsprocess som i undersökningsområdet sannolikt kan kopplas samman med den vulkaniska utveckling som bildade trakyandesiterna, daciterna och ryoliterna i Porfyrgruppen. Regionalmetamorfa processer förvandlade sedan argillisiterna till sericitrika bergarter som dagens sericitskiffrar och sericitkvartsiter.

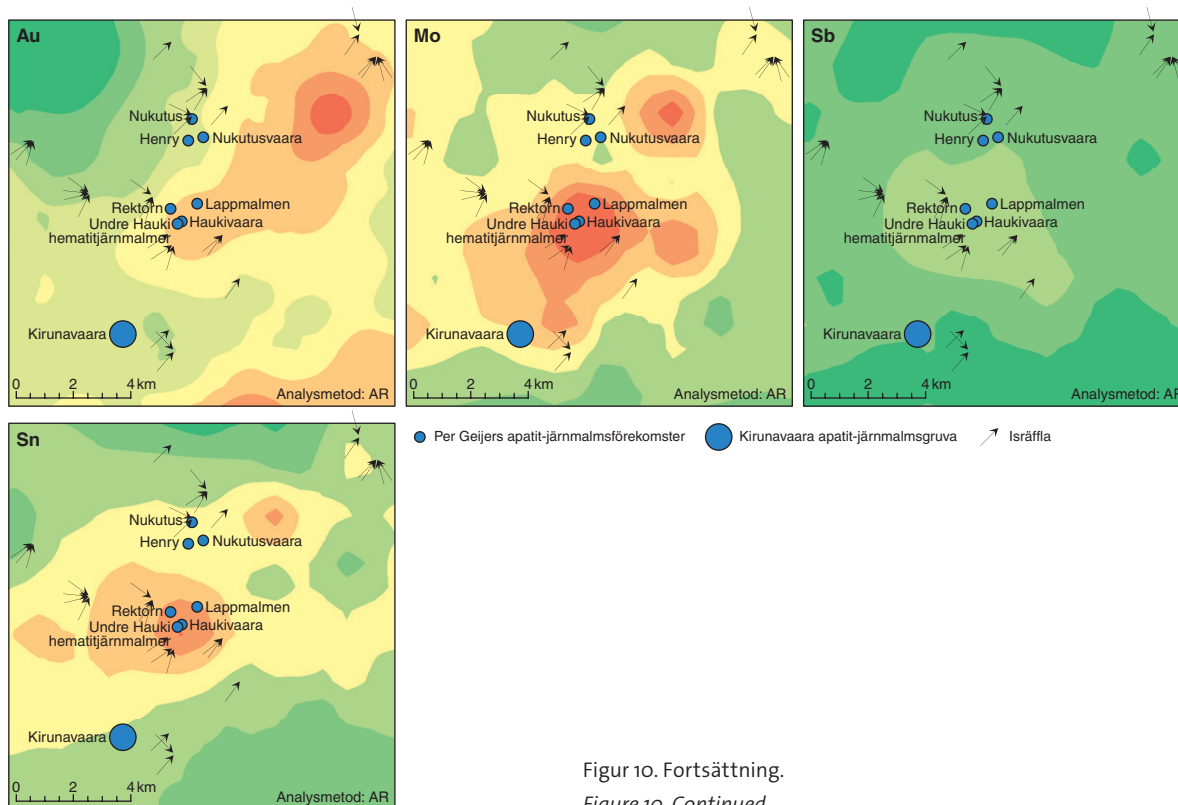
Argillisitbildningen ledde, i förhållande till ursprungsbergarterna, till en ökning av halterna av kisel, aluminium, kalium, trevärt järn, titan, fosfor, barium, guld, silver, arsenik, vismut, molybden, wolfram, antimon och uran samt en minskning av halterna av kalcium, tvåvärt järn, magnesium och natrium.

På kartorna över moränernas kemiska innehåll iakttas förhöjda halter av element som har en direkt relation till Undre Haukiseriens metasomatiska bergarter (fig. 10). Det är uppenbart att morängeoke-min avspeglar bergarternas mineralsammansättning och kemiska specialisering. I moränen påträffas förhöjda totalhalter av aluminium, barium, rubidium, bly, fosfor, kalium och titan. Dessa element bil-



Figur 10. Anomala halter av element i morän som är relaterade till Undre Haukiseriens metasomatiska bergarter.

Figure 10. Anomalous elemental concentrations in till related to the occurrences of metasomatic rocks of the Lower Hauki formation.



Figur 10. Fortsättning.
Figure 10. Continued.

dar inte sällan anomalier som är utsträckta i nordostlig riktning, vilket sammanfaller med inlandsisens rörelser i området. I trakterna kring Undre Haukiseriens metasomatiter har moränen också anomala halter av salpetersyralakat barium, silver, arsenik, wolfram, uran, titan, strontium, bly, fosfor, lantan och vismut. Anrikning av strontium i samband med sur metasomatos beskrevs bl.a. av Hikov (2004a, b). I anslutning till Undre Haukiseriens bergarter hittas dessutom en del negativa anomalier av salpetersyralakat natrium, magnesium och beryllium, vilka verkar ha betett sig mobilt och bortförts av de sura lösningarna under den metasomatiska processen. Även totalhalterna av magnesium och natrium är låga och antyder att de hydrotermala bergarterna urlakades på dessa element. Kungsvattenanalyser påvisar förhöjda halter av antimon, tenn, molybden och guld (4–12 ppb).

Såväl moränkemiska som mineralogiska aspekter liknar de som finns i epitermala guldmineraliseringar. Förhöjda halter av guld, silver, arsenik, antimon, vismut, tenn och molybden är typiska för svavelrika epitermala guldförekomster (high sulphidation epithermal gold deposits) samtidigt som höga halter av guld, silver, arsenik, antimon och kalium är mer vanliga bland svavelfattiga epitermala guldförekomster (low sulphidation epithermal gold deposits, White & Hedenquist 1995). I området där Undre Haukiseriens bergarter breder ut sig finns en blandning av båda geokemiska signaturerna i morän.

Stark argillitisk omvandling och metasomatiska bergarter liknande hydrotermala kvartsiter i området runt Malmberget

Den befintliga geologiska informationen om den magnetit-hematitförande mineraliseringen i Malmberget pekar på att fyndigheten uppträder i anslutning till metamorfoserade hydrotermalomvandlade bergarter. De flesta forskare som studerat Norrbottens geologi har kommit till insikten att metasomatosen satt sin prägel på omgivningen runt denna malmfyndighet (Högbom 1910, Geijer 1931, Frietsch 1966). De omvandlade bergarternas rumsliga samband med mineraliseringen innebär inte nödvändigtvis att det finns en genetisk relation mellan dem. Det är inte känt att den typ av omvandlingsbergarter som omger Malmberget har en direkt genetisk koppling med apatitjärnmalmer.

Studier genomförda av Geijer (1930) avslöjade att det råder ett rumsligt samband mellan hematitmalmerna och långsträckta zoner av sillimanitgnejs; zonerna stryker parallellt med malmkropparna. I de övriga delarna av fältet, där malmen utgörs av magnetit, förekommer inga sillimanitförande bergarter.

Mineralsammansättningen i de sillimanitförande bergarterna innefattar sillimanit, kvarts, muskovit, hematit, magnetit och turmalin. Korund och andalusit förekommer relativt ofta som accessoriska mineral (Frietsch 1966, Grip & Frietsch 1973). Vissa partier består enbart av kvarts och sillimanit (Högbom 1910) vilket är ett särdrag som har stora petrografiska likheter med sidoberget kring guld-mineraliseringen Enåsen (Hallberg 1994, Hallberg & Fallick 1994).

Redan på 1900-talet uppmärksammade Högbom (1910) likheterna mellan sillimanitbergarterna i Malmberget, sericitskiffrarna från Svappavaara-fältet och Undre Haukiseriens bergarter och fastlog att de är kemiskt besläktade.

Den modala mineralsammansättningen och bergartskemin pekar på en stark argillitisk omvandling (Pirajno 2009, Gifkin m.fl. 2005, Seedorff m.fl. 2005). Den här typen av bergarter är resultat av en kraftig, sur urlakningsmetasomatos som skapas under ett ganska brett temperaturintervall och som är i jämvikt med klorhaltiga lösningar som även bär på koldioxid och svavel. Under dessa extrema förhållanden är enbart kvarts och aluminiumhaltiga mineral som korund, andalusit och pyrofyllit stabila. Efterföljande regionalmetamorfa processer omvandlade under relativt höga temperaturer pyrofyllit till sillimanit. Korund och andalusit var troligtvis stabila under de nya termodynamiska förhållandena och genomgick möjligen omkristallisering. Ursprungsbergarterna var främst vulkaniska, vulkanosedimentära och intrusiva med sur eller intermediär sammansättning. De dominerande enheterna runt Malmberget består av sura metavulkaniter.

På kartorna över moränens kemiska egenskaper observeras förhöjda totalhalter av aluminium, kisel, barium, titan, zirkonium, kalium, svavel, fosfor, mangan och järn i området runt Malmberget. Beträffande syralakade elementhalter ses höga sådana av titan, strontium, barium, aluminium, beryllium och vismut, vilket är en geokemisk signatur som påminner om den som finns i moränen i området strax norr om Kiruna och vars berggrund domineras av Undre Haukiseriens metasomatiskt omvandlade bergarter. Ungefär 2,5 km nordost om Malmberget finns förhöjda halter av syralakat strontium i morän vilket sannolikt återspeglar den metasomatiska process som bildade de ursprungliga hydrotermala kvartsiterna och deras nuvarande metamorfa ekvivalent, dvs. de korund-, andalusit- och sillimanitförande gnejserna. Denna egenskap i morän kan i viss mån sammankopplas med Aitik's metasomatiska bergarter som är kemiskt likartade de som finns runt Malmberget.

Aitik och metasomatiska omvandlingar associerade med mindre porfyriska intrusioner

Aitikgruvan är en av Europas viktigaste producenter av koppar och guld. Den ligger nära Nautanens deformationszon. Mineraliseringen uppträder i biotit- och muskovitskiffrar samt hornbländeförande biotitgnejs. Två lätt deformerade, porfyriska kvartsmonzodioritintrusioner finns i nära anslutning till mineraliseringszonen. En gångsvärm av odeformerade pegmatiter skär igenom malmens strukturella hängvägg (Bergman m.fl. 2001 och referenser däri).

Aitikmalmen har ett hydrotermalt ursprung och är genetiskt relaterad till kvartsmonzodioritintrusionerna som finns i anslutning till mineraliseringszonen. Omfattande hydrotermal aktivitet gav upphov till metasomatiskt omvandlade bergarter och mineraliseringen (Yngström m.fl. 1986, Monro 1988, Wanhainen m.fl. 1999, 2003, 2006). Våra iakttagelser tillåter oss att särskilja olika typer av metamorfoserade hydrotermalomvandlade bergarter. Biotit- och muskovitskiffrarna utgör med all sannolikhet metamorfoserade metasomatiska ursprungsbergarter. Biotitskiffrarna med granatporfyroblaster liknar fylliska metasomatiskt omvandlade bergarter. Sericitskiffrarna utgör sannolikt metamorfoserade argillisiter eller bergarter hörande till familjen av hydrotermala kvartsit. De omgivande hornbländeförande biotitgnejserna är förmodligen metamorfoserade perifera propylitiska omvandlingszoner. Höga kaliumhalter i malmzonen i Aitik kan troligtvis koppla samman med metasomatiskt omvandlade bergarter bestående av biotit och kalifältspat som uppträder i kärnan av vissa

porfyriska kopparmalmer, t.ex. i porfyrokopparmalmen San Manuel i USA (Lowell & Guilbert 1970) där malmfältets centrala delar domineras av metasomatiskt bildade ortoklasiter. Dessa kaliumrika metasomatiskt omvandlade bergarter har en varierande mineralogi men deras modala sammansättning domineras av kaliumförande mineral. I västerländsk geologisk litteratur samlas de under begreppet kaliumomvandling (Gifkin m.fl. 2005, Seedorff m.fl. 2005, Pirajno 2009).

I Aitik är kalifältspat omvandlig och epidotisering mer karaktäristiska längs kontakten mellan malmzonen och den strukturella liggväggen, men lokalt uppträder den även i hängväggen och inne i det mineraliserade området. I hängväggen är sericit ett av de viktigaste bergartsbildande mineralen och huvudkomponent i sericitskiffrar (ursprungligen argillisiter och sericitrika bergarter) rika på pyrit.

Aitik betraktas som en metamorfoserad ekvivalent av porfyrokopparmalmer (Yngström m.fl. 1986, Monro 1988). Vissa malmforskare förespråkar ett komplext ursprung med flera faser av malmobilisering under en invecklad metasomatisk utvecklingsprocess (Wanhainen m.fl. 1999, 2003, 2006).

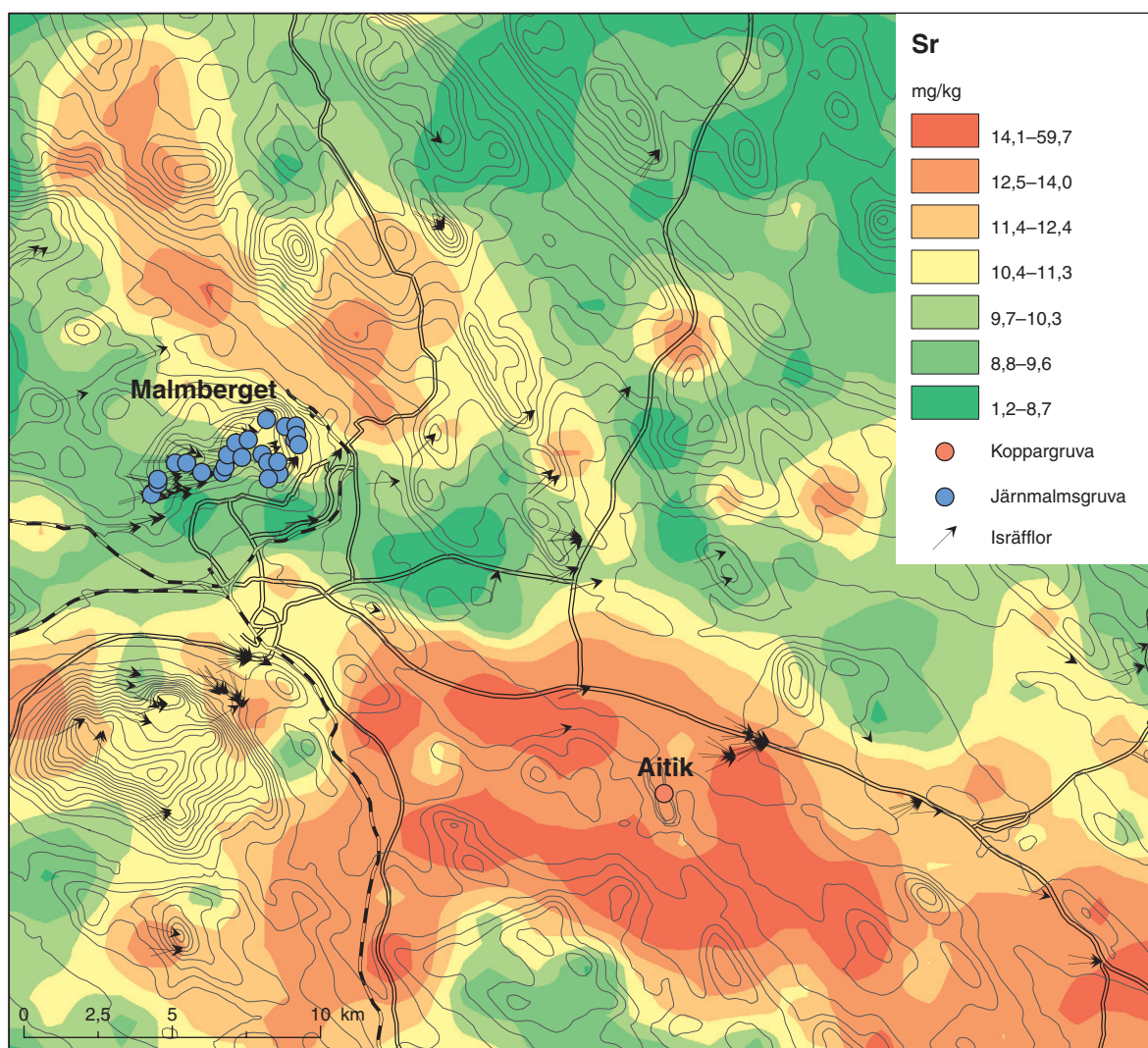
Aitik's metamorfoserade metasomatiskt omvandlade bergarter har haft en direkt påverkan på morängeokemin som påminner om den hos moränavlagringarna i området kring Undre Haukiseriens bergarter. Likheterna är delvis slående, vilket tyder på att likartade hydrotermala processer har varit inblandade. Ett studium av moränens kemiska innehåll antyder att de metasomatiskt omvandlade bergarterna i Aitik uppstod på grund av en omfattande, sur urlakningsprocess. Kartor över moränens kemiska innehåll (totala halter) avslöjar höga kisel-, kalium- och fosforhalter som kopplas till de underliggande muskovitskiffrarna. Moränens förhöjda kaliumhalter har sannolikt också att göra med kaliummetasomatosen som bildade de idag metamorfoserade metasomatiskt omvandlade bergarterna i malmzonen dvs. kvartsbiotitgnejserna. Resultaten från morängeokemin och tolkningen ovan är kompatibla med Monros (1988) bergartsanalyser.

I likhet med bergarterna i Undre Haukiserien uppdagar Monros analysdata höga bariumhalter i bergarterna, vilket dock inte återspeglas i morängeokemin. Kartan som visar halter av salpetersyralakat strontium har en stor positiv anomali i området omkring malmen (fig. 11), vilken möjligtvis kan vara sammankopplad med den sura urlakningsprocessen. Resultaten passar ihop med iakttagelserna gjorda av Yngström m.fl. (1986) och Monro (1988). I det sistnämnda arbetet dokumenterade Monro fem bergartsanalyser med upp till 3 000 ppm strontium. I några väldokumenterade och ometamorfoserade starkt argillitiskt omvandlade bergarter i Rhodopes och Srednogorie i Bulgarien (Kunov 2003, Velinov m.fl. 2007, Kunov 2008) finns tydliga strontiumanomalier i anslutning till argillisiter och hydrotermala kvartsiter. Det verkar som om dessa metasomatiska processer, som orsakats av lösningar med låga pH-värden, kan förorsaka en märkbar strontiumansamling (Hikov 2004a, b samt referenser däri). Strontiumrikning finns även i Undre Haukiseriens sericitskiffrar och sericitkvartsiter samt i berggrunden norr om Malmberget.

Sammanfattningsvis kan konstateras att morängeokemin vid Aitik mer eller mindre återspeglar kemin hos de hydrotermalt omvandlade bergarterna och mineraliseringen samt avslöjar vissa detaljer om de metasomatiska processer som ägde rum i området. Kännetecknande för det här områdets morän är förhöjda halter av kisel, fosfor, kalium, strontium, koppar, kalcium, yttrium, wolfram, uran, guld, tantal, kadmium, arsenik och molybden samt låga halter av magnesium, järn, mangan, vanadin, zink, krom, kobolt, nickel, beryllium, litium, tenn, selen och torium.

Kvartärgeologi i undersökningsområdet

Landskapet inom undersökningsområdet sluttar med trappstegsrelief mot sydost ner mot kusten. I stora drag återspeglar landformerna berggrundens ytformer, men det kvartära landskapet varierar kraftigt och uppvisar en mångfald terrängformer som har bildats under olika glaciala faser (fig. 12). I väster avgränsas området av fjällkedjan där jordtäcket är relativt tunt och där kalt berg sticker fram i höjdområden och i branta sluttningar. Mot öster får landskapet ett allt flackare utseende med betydande inslag av myrmarker i landskapets lågområden. Hela undersökningsområdet är beläget över



Figur 11. Anomala halter av syralakad strontium i området omkring Aitik. Analysmetod: 7M HNO₃/ICP-MS.

Figure 11. Anomalous strontium concentrations in the Aitik region. Analytical method: 7M HNO₃/ICP-MS.

högsta kustlinjen (HK) med undantag av den sydöstra delen. Vid Svanstein ligger högsta kustlinjen på cirka 200 m ö.h., vid Lansjärv ca 180 m ö.h. och vid Huuki 170 m ö.h.

Den nordliga delen av undersökningsområdet sträcker sig från fjällranden i väster till gränsen mot Finland i öster. Inom områdets västliga delar är jordtäcket i allmänhet tunt och hållmarker är relativt vanliga. Här bildar moränen vanligtvis inte några egna former utan markytan återspeglar berggrundens topografi. Tydliga erosionsformer från avsmältningen av inlandsisen förekommer på flera platser i form av isälvsrännor. Sorterade jordarter i form av isälvs sediment förekommer ofta i anslutning till dessa isälvsrännor vars riktning följer topografen och har en övergripande östlig dräneringsriktning. Öster om ovanstående beskrivna landskap sker en övergång till typisk norrlandsterräng med mera runda och flacka former och där torv- och våtmarker dominerar i landskapets lägre partier. Jordlagren har här större mäktigheter och utbildar även egna former i landskapet. Avtryck i landskapet som indikerar påverkan från en aktiv inlandsis förekommer i form av drumlinisering och fluting. Spridda svärmar av drumlinier förekommer. Drumlinerna är ofta utbildade som cigarrformade öar i omkringliggande myrområden medan områden med fluting kan vara svåra att upptäcka i fält utan att först ha granskat flygbilder.

I undersökningsområdets centrala och sydliga delar sker, jämfört med norra delen, en viss förändring av kvartärgeologin. Den dominerande isrörelseriktningen som i norr har en tydlig sydvästlig

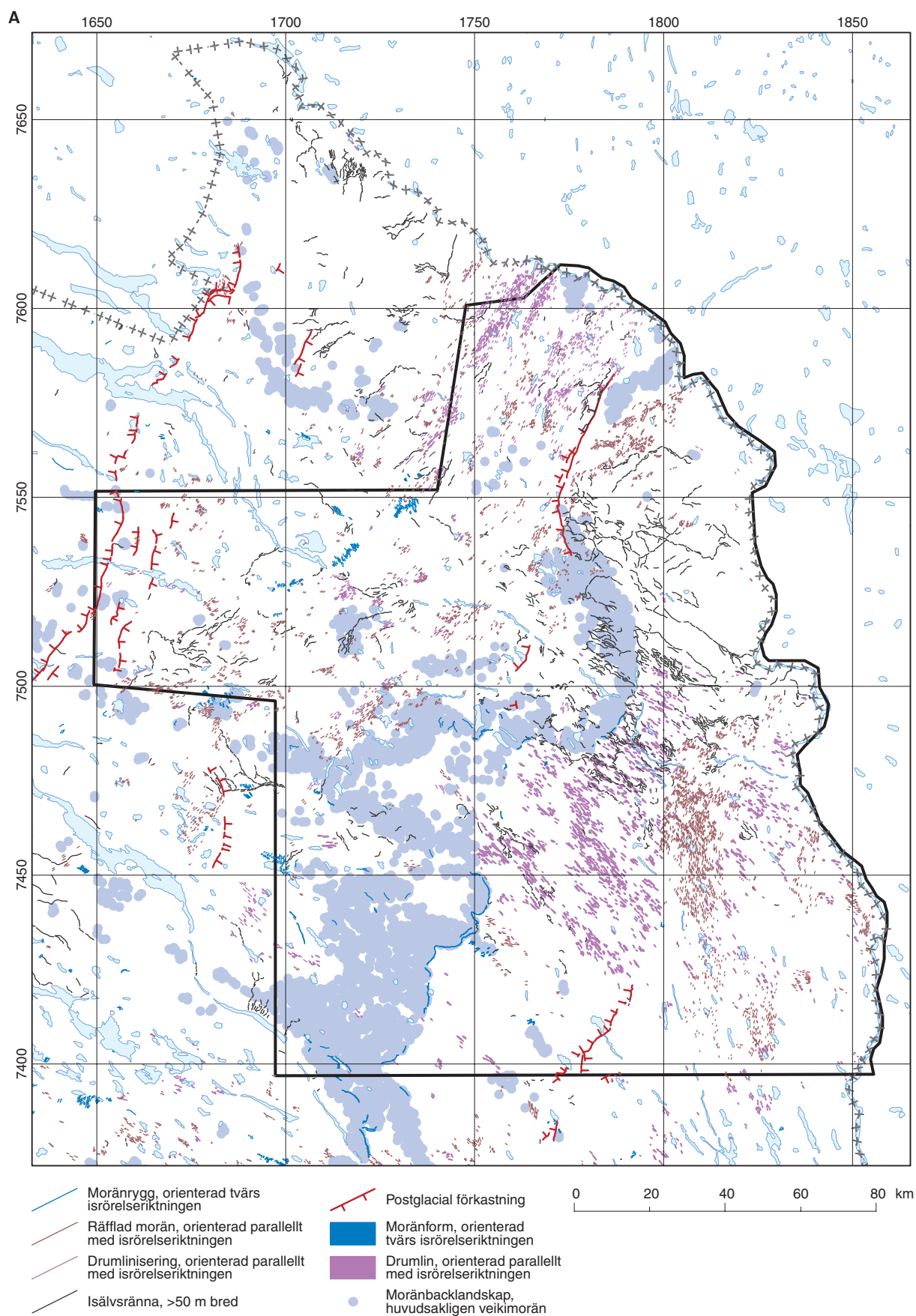
riktning övergår här i en tydlig riktning från nordväst. Landskapet övergår också i mera brutna landformer som tyder på att avsättningen av kvartära avlagringar har skett under stagnanta förhållanden i en glaciation. Utmärkande för denna del av undersökningsområdet är förekomsten av veikimorän (fig. 13). Den förekommer allmänt men med en tvär avgränsning mot öster, den s.k. Lainiobågen. Veikimoränen har avsatts av en äldre inlandsis och har undgått påverkan av senare isar (Bergman m.fl. 1998). Det som karaktäriserar landskapet med Veikimorän är att terrängen upplevs vara rikligt pålagrad av moränmaterial. Det saknas också i stort sett tecken på en aktiv inlandsis i form av isräfflor och drumliniseringar.

Under den senaste nedisningens sista fas antas isdelaren ha varit lokaliserad till de västliga delarna av området, närmast fjällkedjan (Sveriges Nationalatlas 1994). Närheten till isdelaren har bland annat inneburit att denna del av landet sent blev frilagd från inlandsisen och har även påverkat takten på landhöjningen i regionen. Man antar att det nordostligaste området frilades först, i kartområdet ungefär mellan Karesuando och Mounionalusta. Därefter följde avsmältningen i stort sett österifrån. I landskapet kan man med hjälp av isräfflor, moränformer (drumliner, flutings och läsidesmoräner) och partiklars orientering i moränen urskilja spår efter olika isrörelseriktningar och ibland ange åldersförhållandena mellan dem relativt sett. Generellt är det två isrörelser som dominerar inom kartområdet. Den äldsta, med riktning från nordväst, antas vara den som haft störst betydelse för nötning av berggrunden, upplöckning, transport och deposition av bergartsmaterialet i form av morän. Isräfflor och drumliner med denna nordvästliga riktning återfinns främst inom den södra halvan av kartområdet. Spår efter en yngre isrörelse från sydväst påträffas främst i den norra halvan av området.

Avvikelser från de dominerande riktningarna finns exempelvis i nordost, där enstaka observationer av räfflor från öster och sydost är dokumenterade, men även enstaka sydliga riktningar. I den sydöstra delen av kartområdet återfinns en isrörelse från söder som här haft påtaglig inverkan på moränen. I detta område, i Pajala-Korpilombolotrakten, finns en mängd moränryggar (små drumliner och mindre former, s.k. flutings) parallella med räffelriktningen. En möjlig förklaring skulle kunna vara att ryggarna är bildade under en bottensmältande is under rörelse med effekten att underlagets material omlagrats och ovittrat material kommit upp till ytan (Robert Lagerbäck, muntlig kommunikation). I detta område finns basiska bergarter med gott om lättvittrade mineral som ingår i moränen. Ur vegetationssynpunkt låg därför en jungfrulig mark med högt näringsinnehåll bar när isen smält av. Effekter av andra processer kan finnas i områden som påverkats kraftigt av vattenmassor från en avsmältande is som sköljt ur jordlagren och lämnat en residualjord. I landskapet syns spåren i form av isälvsrännor som är särskilt frekventa öster om Lainiobågen (fig. 12). Moränen i detta område har vittrat kraftigt, särskilt om den innehåller sulfider, och den är urlakad på sitt näringsinnehåll. Exempel på vittrad morän och bergyta kan bland annat ses ett par mil norr om Pajala.

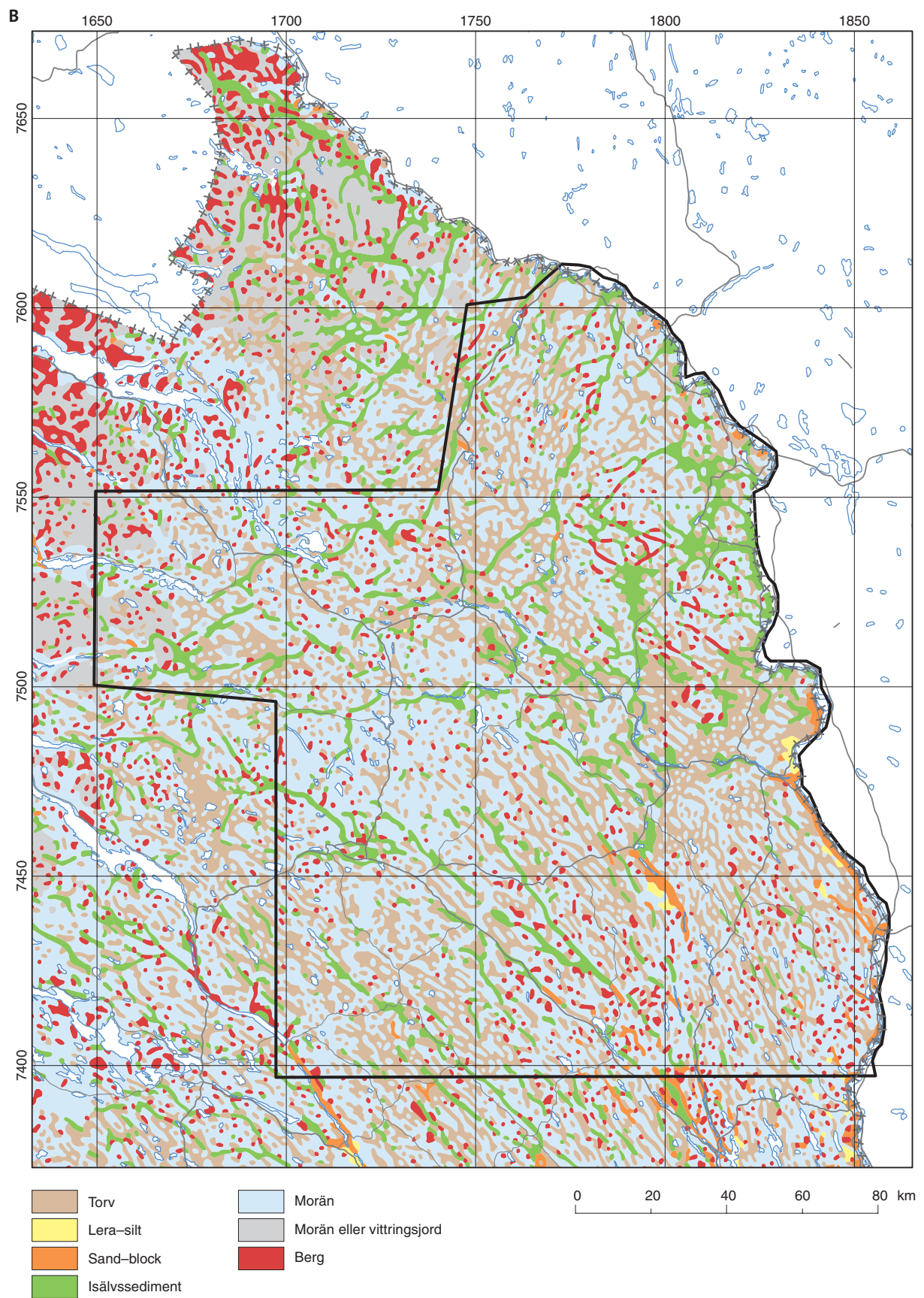
Åldersförhållanden mellan olika isrörelser kan bestämmas tämligen väl. Exempelvis från kartområdet 28K Gällivare, där undersökningar anger att en isrörelse från nordväst är den äldsta. I landskapet antas denna första nedisningsfas (Weichsel I) ha lämnat spår i form av drumliner och räfflor och en moräntransport från nordväst. I djupt liggande moränbäddar finns också en partikelorientering med samma riktning (Dittrich 2005). En yngre isrörelse från väst har gett räfflor och även avsatt drumliner, främst i Gällivaretrakten. Ännu yngre än denna är ett räffelsystem från sydväst som även format långsmala moränryggar i samma riktning. Isrörelsen från sydväst har dock haft större påverkan på partiklarnas orientering i moränen än på formerna. Den sydvästliga isrörelsen antas höra till den sista Weichselisen. I kartområdet 28K Gällivare finns även isräfflor från syd, men åldersförhållandet till de tre ovan nämnda är inte klarlagt. Samma isrörelseriktningar som beskrivits ovan är generellt de som återfinns inom undersökningsområdet, men det kan också förekomma lokala avvikelser.

Den äldsta Weichselnedisningen torde ha börjat i fjällkedjan och isar med tempererad botten påverkade dåvarande landyta. Bland annat bildades drumliner. Därefter inföll en varmare period (Brörup-interstadialen) innan nästa glaciala fas (Weichsel II) inföll. Under nästa interstadial, Odderade (i Lappland kallad Tärendöinterstadialen), smälte så gott som hela istäcket bort, men perioden var åtminstone



Figur 12. **A.** Glacialmorfologisk karta. **B.** Jordartskarta (nästa sida).

Figure 12. **A.** Morphological map of glacial and periglacial features. **B.** Map of the Quaternary geology (next page).





Figur 13. Moränbacklandskap med veikimorän i Nattavaaratrakten. Foto: Robert Lagerbäck.

Figure 13. Hummocky moraine (Veiki) in the Nattavaara region.

under ett skede betydligt svalare än Brörupinterstadialen. Periglaciala förhållanden rådde och hårda vindar gjorde att snökrystaller slipade block och hållar. Isen (Weichsel III) som sedan bredde ut sig var mycket kall, frusen till sitt underlag och erosionen blev därför obetydlig. Moränformer och äldre sediment bevarades därför. Avsmältningen av isen kunde sedan ske från ytan av isen, från botten eller vid isens front stående på torr mark eller i vatten. Om nederbörd (främst som snö) tillfördes i isens ackumulationsområde fanns aktiv rörelse mot fronten, även om denna samtidigt avsmälte. Upphörde tillförseln stannade rörelsen och isen smälte som dödis. Avsmälte isen i vatten bröts stora isblock av (kalvade). Deglaciationen skedde sannolikt inte kontinuerligt med en jämn hastighet.

Utöver att hela kartområdets glacialgeologiska historia är komplex, är även moränens tillblivelse inte helt enkel att utreda. Olika stadier under den senaste istiden (Weichsel I–III) med tillväxt av is samt bortsmältande is har skett under olika tempererade förhållanden. Moräner kan bland annat ha bildats av en aktiv is eller en stagnant smältande is. Det kan finnas preglacialt minerogent material som bottenfruset inte påverkades nämnvärt av Weichselisen och som nu kan påträffas under glaciala sediment (Nordkalottprojektet 1986). Inom hela kartområdet kan olikåldriga moräner hittas på en och samma plats. Organiskt material från interstadialer (varmare perioder under en istid) och interglacialer (varmare perioder mellan istider) kan påträffas som skikt mellan olika jordlager (Lagerbäck & Robertsson 1988). I trakten av Svappavaara har man exempelvis funnit torv daterad till Eem-interglacialen som rårde för 130 000–115 000 år sedan. Att människan följde i en avsmältande iskants spår visar bosättningar kring Kaunisvaara och Aareavaara i Pajala kommun. Tack vare undersökningar föranledda av öppnandet av en ny gruva vid Kaunisvaara genomfördes en arkeologisk undersökning hösten 2009 varvid fyra stenåldersboplatser påträffades (arkeolog Olof Östlund, Norrbottens museum). Två av boplatserna har kol-14-daterats till omkring 9 300 f.Kr. Bosättningarna, som är Norrbottens och norra Finlands hittills äldsta kända, visar att människor fanns här för 11 300 år sedan. Hur fynden påverkar tolkningen av den sista islobens utsträckning i Norrbotten återstår att se.

Glacialgeologisk, morfologisk och annan inverkan på geokemimönstren

Ett flertal glaciala formelement såsom drumliner, andra former av moränryggar, spår efter isälvar (fig. 12) samt isräfflor (fig. 6) visar hur moräntransport och deposition av bergartsmaterial kan ha ägt

rum. Tillsammans med studier av geokemiska elementmönster kan inlandsisens påverkan på landskapet belysas än mer. I föreliggande rapport berörs dock detta mycket överskådligt.

Utöver berggrundens kemiska sammansättning som dominerar moränens innehåll av element kan en del av de geokemiska anomalier (positiva eller negativa) eller lineament i elementmönstren kopplas till Lainiobågens norra del, Tärendö isälvsrännssystem, bandet av moränryggar väster om Pajala–Korpilombolo samt Lainiobågens södra del med ändmoräner.

Kraftfullt framträder också med skarp begränsning åt nordväst, positiva anomalier av ett flertal element knutna till en magnetisk anomali (fig. 7) väster om Muodoslompolo. Elementanomialernas avgränsningar följer även förändringar i det glacialt präglade landskapet med isälvsrännor och i nordväst en postglacial förkastningszon som löper i sydväst–nordöstlig riktning.

Det måste också uppmärksammas att Sveriges största järnmeteorit hittades 2009 i kartområdet. Den antas höra till en sprängd dvärgplanet som gett en svärm meteoriter som störtat mot marken före den senaste istiden (Hättstrand 2009). Meteoritsvärmen antas ha slagit ner för över 100 000 år sedan beräknat efter att de hittas i avlagringar från den senaste istiden som inleddes för ca 115 000 år sedan. Den över ett ton tunga meteoriten hittades i trakten av Kitkiöjärvi, sju mil norr om Pajala. Området är välkänt av meteoritetare och ett stort antal mindre och större meteoriter har hittats under den senaste århundradet. De kallas Muonionalustameteoriterna och består av järn och nickel. Lättare ämnen som magnesium, aluminium och kisel har ursprungligen funnits som en omgärdande mantel eller skorpa. Geokemiskt innehåller de också iridium, ett element som kunde ha gett en ”meteorit-signal” i de geokemiska kartorna, men iridiumanalyser saknas i SGUs analyspaket. Det kan dock konstateras att det finns kraftigt förhöjda analyshalter av flera element i området, bland annat järn och nickel, som bildar en kraftig och uthållig anomali som sträcker i sydsydost–nordnordväst.

GEOKEMI I OMRÅDET – ELEMENTENS FÖREKOMST OCH ASSOCIATIONER I MORÄN

Den markgeokemiska karteringen i norra Norrbotten utfördes under ett antal år, med provtagning mellan 2000 och 2007. För palladium och tellur har analysresultat från NSGs kartering använts, då dessa element saknas i SGUs nuvarande analysprogram.

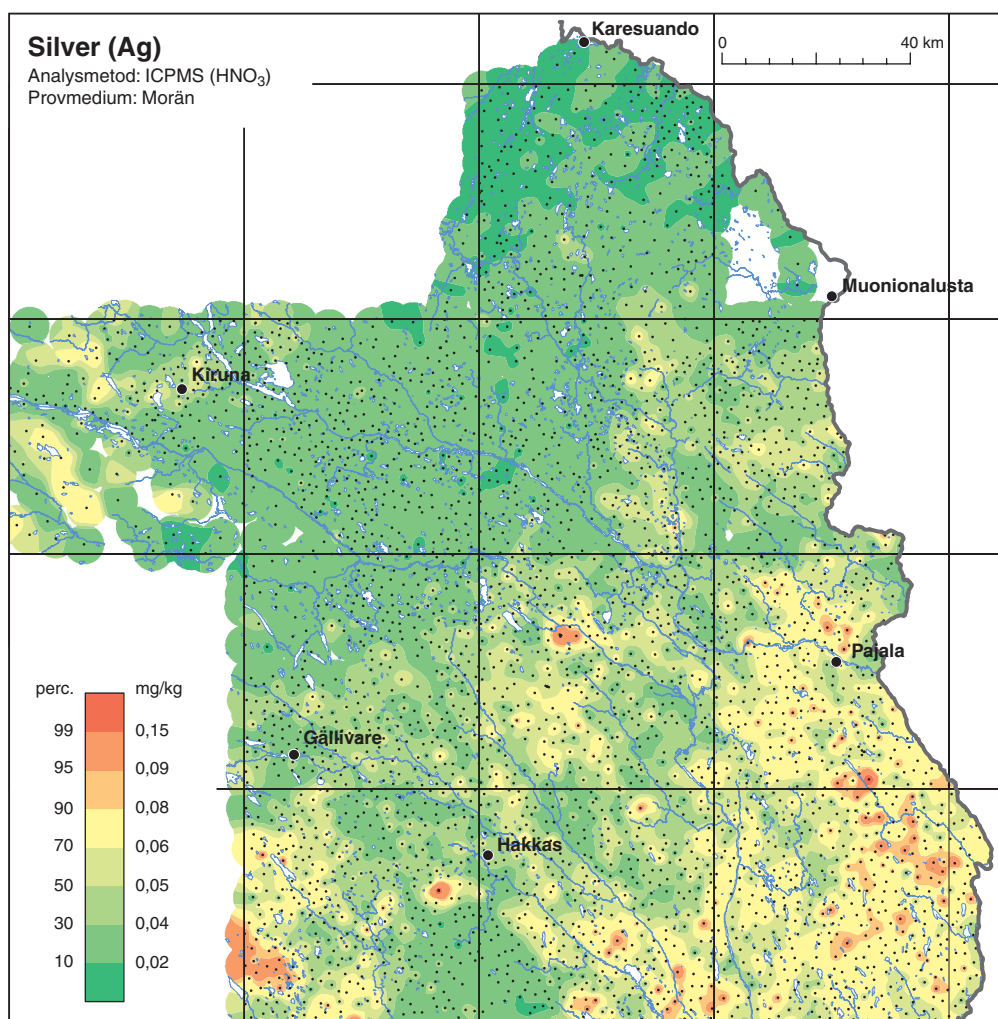
I undersökningsområdet har prov samlats in från ca 3 400 moränlokaler. Huvuddragen i moränens geokemi styrs av berggrundsgeologin. Till detta kommer variationer som beror på rörelseriktning och karaktär hos isen som avsatt moränen. I överensstämmelse med beskrivningen av berggrunden, är det karaktäristiska för moränens geokemiska egenskaper i området höga koncentrationer av element associerade främst med basiska bergarter. Detta gäller bland annat Cl, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Ti och V. För andra element, exempelvis As, Bi, K, Pb, Si, Sn, Tl och Zr och i viss mån Rb, Th och U, vilka förekommer i höga koncentrationer i sura bergarter, är koncentrationerna istället i allmänhet lägre än genomsnittet för riket.

Många kända mineraliseringar finns i området. För de flesta basmetaller är överensstämmelsen mellan kartbilden och kända mineraliseringar relativt god.

Ibland lyfts anomalier fram i texten som inte framgår klart av kartbilderna. Förklaringen är skillnader mellan kartbilder som används för bearbetning och tolkning av elementmönster och kartorna i rapporten som framställs mer rutinmässigt. De senare har klassindelning grundad på rikets percentiler (tabell 2). För undersökningsområdet kan anomalier visa relevanta elementmönster även om dessa är svaga i ett riksperspektiv.

Silver (Ag)

Silver är en av åtta ädelmetaller. Bland de övriga finns guld, platina och palladium. I den del av jordskorpan som är tillgänglig för gruvdrift förekommer silver i en uppskattad medelhalt av 50–100 mg/kg. Huvuddelen av jordskorpan silvermineral utgörs av sulfidföreningar av enbart silver och andra metaller, men även föreningar med tyngre kalkogener samt halogenider finns representerade. Däremot förekommer silver inte i syrehaltiga mineral (oxider, silikater etc.) i någon nämnvärd utsträckning.



Silver uppträder främst i sedimentära och i basiska bergarter medan innehållet i graniter, vulkaniter och gnejser oftast är lägre. Silver kan uppträda i hydrotermala gångar, i kambrisk sandsten och i skiffer. I naturen förekommer silver ofta bundet till sulfidmineral som blyglans, zinkblände och kopparkis eller arsenider med kobolt och nickel. Silver förekommer sällsynt också i gedigen form, som argenit (Ag₂S) och som hornsilver (AgCl). Gediget silver ingår bl.a. i Harmsarvets malmer. Svenska fyndigheter med silver är kända från i stort sett hela landet och metallen kan ingå i många olika typer av malmer. Vid vittring är silver lätt rörligt, men fastläggs och bildar stabila komplex eller adsorberas av markpartiklar med järn och mangan eller lerpartiklar.

Ädelmetallen silver är känd av människan och brukad i över 5 000 år. Redan för 4 500 år sedan exporterades silver från förekomster i Anatolien till Mesopotamiens skickliga yrkesmän som kunde bearbeta metallen och utveckla användningen. Sveriges äldsta silvergruva är Östra Silvberg i Dalarna, där gruvdriften började i mitten av 1300-talet. I industriell användning nyttjas rent silver och legeringar med koppar, nickel, wolfram och molybden. Stora mängder silver används numera för tillverkning av alkaliska silveroxid-zinkbatterier. Metalliskt silver används även som katalysator för industriella oxidationsprocesser, t.ex. framställning av etenoxid, vid tillverkning av lödmetall och som beläggning på bordsbestick, smycken, elektronikdetaljer och speglar. Silver används också i tandamalgam.

Silver har ingen känd essentiell biologisk funktion. Föreningar har en mycket låg akut och kronisk toxicitet för människan. Både metalliskt silver och dess salter har en bakteriedödande effekt, vilket utnyttjas bl.a. för vattenrening och sårbehandling. Den farmaceutiska benämningen på silverniträt är lapis. I profylaktiskt syfte har silvernitratlösning droppats i nyfödda barns ögon för att förhindra

bindhinneinflammation av från modern överförda gonokocker. Globalt minskar den medicinska användningen av silverpreparat i takt med att andra baktericider utvecklas. Den bakteriedödande effekten gör dock att silver används i allt fler av det moderna samhällets produkter. Spridningen till miljön ökar och sker bl.a. via hushållsvatten, genom förbränning och användning av rötslam.

Medianhalten av silver i kartområdets moräner är lägre än i övriga riket. I kartområdet förekommer måttligt silverhaltig morän i sydväst, i sydöstra halvan av kartområdet samt väster, norr och söder om Kiruna. Ett flertal sulfidmineraliseringar är kända, varav ett antal innehåller silver. Några av dem återfinns i områden där moränen har förhöjd silverhalt, exempelvis Lieteksavo och Pärkajaure fyra mil sydväst om Kiruna, och Viscaria som är beläget väster om Kiruna. Silverfyndigheter i moränområden utan förhöjd silverhalt återfinns bland annat vid Kalixfors söder om Kiruna och nära Leppäsuaunto några mil öster om och sydost om Soppero. Frapperande är avsaknaden av förhöjd silverhalt i den Norrlandsterräng där torv- och våtmarker dominerar i landskapet. Österut förekommer mer silverhaltig morän och där är det Lainiobågen som generellt sett utgör gränsen mellan områdena.

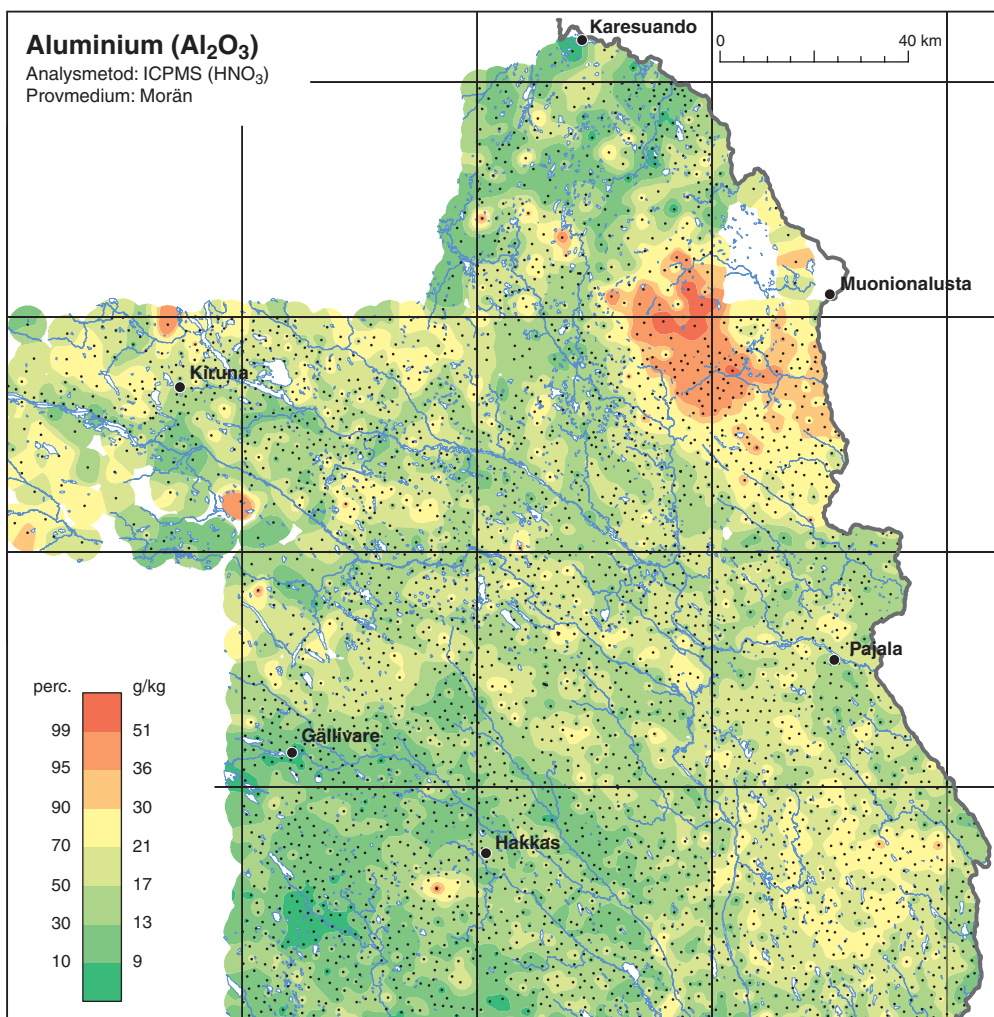
Utanför kartområdet i sydväst (tre mil väster om Nattavaara) ligger Måskoskärso sulfidförekomst, en fyndighet med bly och silver. Höga silverkoncentrationer i morän återfinns i isrörelseriktningen från sulfidförekomsten i den sydvästra delen av kartområdet. Nordost om Nattavaara återfinns kartområdets näst högsta silverhalt (0,24 mg/kg) i anslutning till fyndigheten Puolalaki. Några mil norrut ligger Aitik, gruvan som idag är Sveriges största silverproducent. Morängeokemin med avseende på silver ger i detta område inga ledtrådar om några mineraliseringar, åtminstone inte på det aktuella provtagningsdjupet. Morän med måttligt förhöjd silverhalt återfinns däremot såväl väster som öster om Suorravaara, och även 25 km öster om Aitik. Någon mil norr om Aitik finns fyndigheter med koppar, silver och guld (t.ex. Liikavare). Även i detta område har moränerna generellt sett låg silverhalt. Mot nordost ändrar terrängen karaktär och andelen våtmarker är betydligt färre. Här finns silverhaltig morän och fyndigheter som Kurkkionvaara, Oriasvaara och Maunuvaara. Ett moränprov från Kurkkionvaara visar kartområdets högsta silverhalt på 0,26 mg/kg.

Aluminium (Al)

Aluminium är den vanligast förekommande metallen i jordskorpan men uppträder aldrig i ren form. 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. Bergarter som omvandlats, t.ex. gnejser och kvartsiter, innehåller ofta jämförelsevis höga aluminiumhalter. Basiska bergarter, skifferar, diabaser och graniter innehåller också elementet, medan ultrabasiska bergarter har mycket lågt aluminiuminnehåll liksom kalkstenar och sandstenar. Även om aluminium frigörs vid vittring är det skillnad på hur lätt detta sker. Exempelvis är aluminium hårdare bundet i svärvittrade kalifältspater än i plagioklaser och järn- och magnesiumsilikater. Löst aluminium binds åter bland annat i sekundära lermineral, exempelvis kaolinleror. Värt att notera är att mineralen i leror till stor utsträckning består av olika aluminiumsilikat. Lerfraktionens (material som är mindre än 0,002 mm i kornstorlek) halt av aluminium kan uppgå till 20 viktprocent Al_2O_3 .

Aluminium är en lättmetall och är inte lika giftig för människan som en del tungmetaller. Det har ingen känd funktion i kroppen och i normala doser tar kroppen heller inte skada, förutom i de fall en allergisk reaktion inträffar. Det finns dock epidemiologiska studier som antyder att det finns ett samband mellan hög aluminiumhalt i dricksvatten och en ökad förekomst av Mb Alzheimer (Perl & Moalem 2006). Det har tidigare förekommit indicier på att aluminium orsakar Alzheimers sjukdom, då man funnit förhöjda aluminiumvärden hos drabbade individer, men andra studier avfärdar aluminium som orsak och ser istället ackumuleringen som en verkan av sjukdomen. Den egentliga orsaken är ännu inte klarlagd.

Aluminium är mycket svårslösligt i naturliga vatten och intag i samband med mat och dryck passerar ut med urinen. Det måste noteras att endast det aluminium som är mobilt och lösligt kan utgöra en



risk för levande organismer. En risk kan då vara att aluminium binder fosfor, vilket försvårar upptaget av fosfor i kroppen. Det är främst i samband med försurande miljö som aluminium kan lösa ut ur jordar och nå vattendrag och sjöar. I vissa fall kan detta orsaka skador på fisk, då aluminiumhydroxid fälls ut och sätter sig på fiskgälar vilket försvårar syreupptaget.

Jämfört med övriga landet har kartområdets moräner något högre medianvärde för totalhalten av aluminium (143 g/kg mot rikets 136 g/kg), medan syralakbart aluminium ligger något lägre än medianvärdet för riket (16 g/kg mot rikets 17 g/kg).

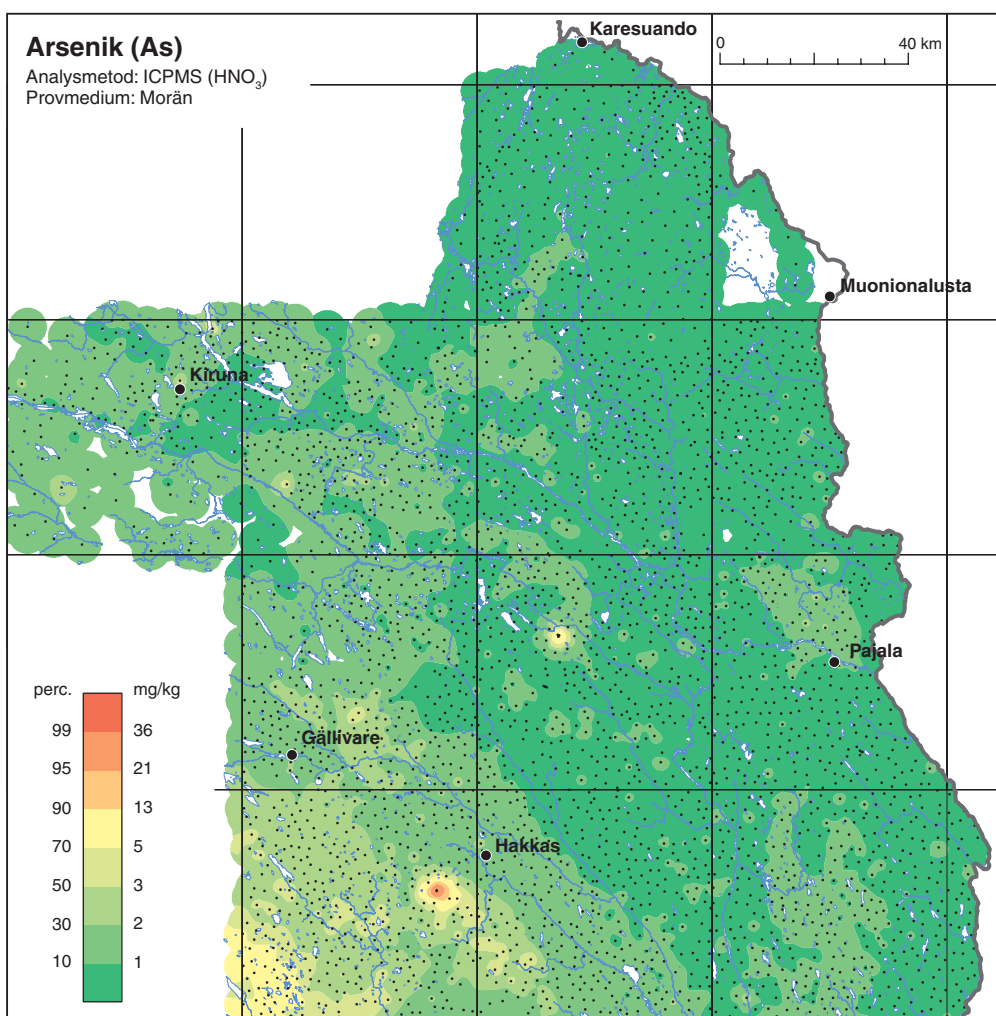
Det karterade området visar två huvudtrender för syralakat aluminium i morän: en nordostlig med höga aluminiumhalter och en nordvästlig–sydostlig med diffusa medelhöga aluminiumhalter. I nordvästra delen av området visar ytterligare aluminiumanomalier runt Kiruna (speciellt sydväst om Kiruna) och väster om Svappavaara att aluminium anknyter till förekomster av sura metavulkaniter (metaryoliter), intrusiva graniter och metagråvackor av karelsk och svekofennisk ålder. Förhöjda halter norrut från Parkalompolo och längs med finska gränsen anknyter till paleoproterozoiska graniter och pegmatiter som förekommer i ett bälte med nordvästlig–sydostlig riktning. Moräner från Korpilombolo till finska gränsen i öster visar medelhalter för aluminium och kan sannolikt kopplas till de metaareniter och gråvackor som dominerar i området, samt till graniter och granodioriter av paleoproterozoisk ålder.

Bäst korrelation visar aluminium med barium (och rubidium), vilket tyder på att huvudkällan till aluminium är fältspatrika bergarter.

Arsenik (As)

Arsenik är en metalloid (halvmetall) som förekommer naturligt i jord och berg, vanligen med halter på 1–40 mg/kg. Medelhalten i jordskorpan är 1,5–2 mg/kg och i jord 6 mg/kg. Bly-, koppar- och guldmalmer kan innehålla upp till 3 % arsenik. Geokemiska följeslagare till arsenik är antimon och vismut, och alla tre elementen används ibland som indikatorelement vid guldprospektering. Måttlig förekomst av arsenik finns i sura vulkaniska bergarter och stor förekomst av arsenik finns i sulfidmalmer och svartskiffrar. Ett antal mineral innehåller arsenik, viktigast är arsenikkis (FeAsS). I Sverige finns arsenikkis i vissa malmer och Bolidengruvan var en gång i tiden världens största fyndighet av arsenikkis. Vid brytningen av dessa malmer kan en lokal spridning av arsenik ske. Vid vittring är arsenik lösligt, men dess rörlighet är ganska begränsad då arsenik binds till leror, metallhydroxider (järn, aluminium och mangan) och organiskt material. De vanligaste förekomstformerna för arsenikjoner under oxiderande förhållanden är som arsenat och under reducerande förhållanden som arsenit. 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 (SGU 2005).

I områden med höga halter kan arseniken lösas ut till grundvattnet. Dricksvattnet kan därför vara en källa till arsenikexponering. Globalt sett använder flera miljoner människor dricksvatten med så hög arsenikhalt, ofta flera hundra milligram per liter, att det finns risk för allvarliga hälsoeffekter (Selinus m.fl. 2005). I Sverige finns ett antal regioner där arsenikhalterna i dricksvatten klart överstiger



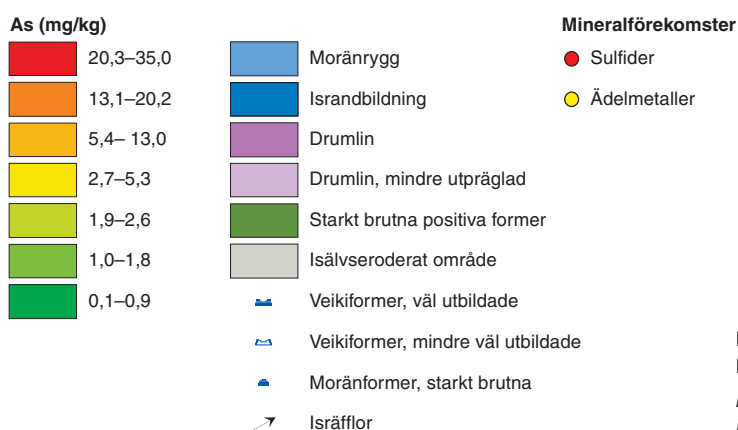
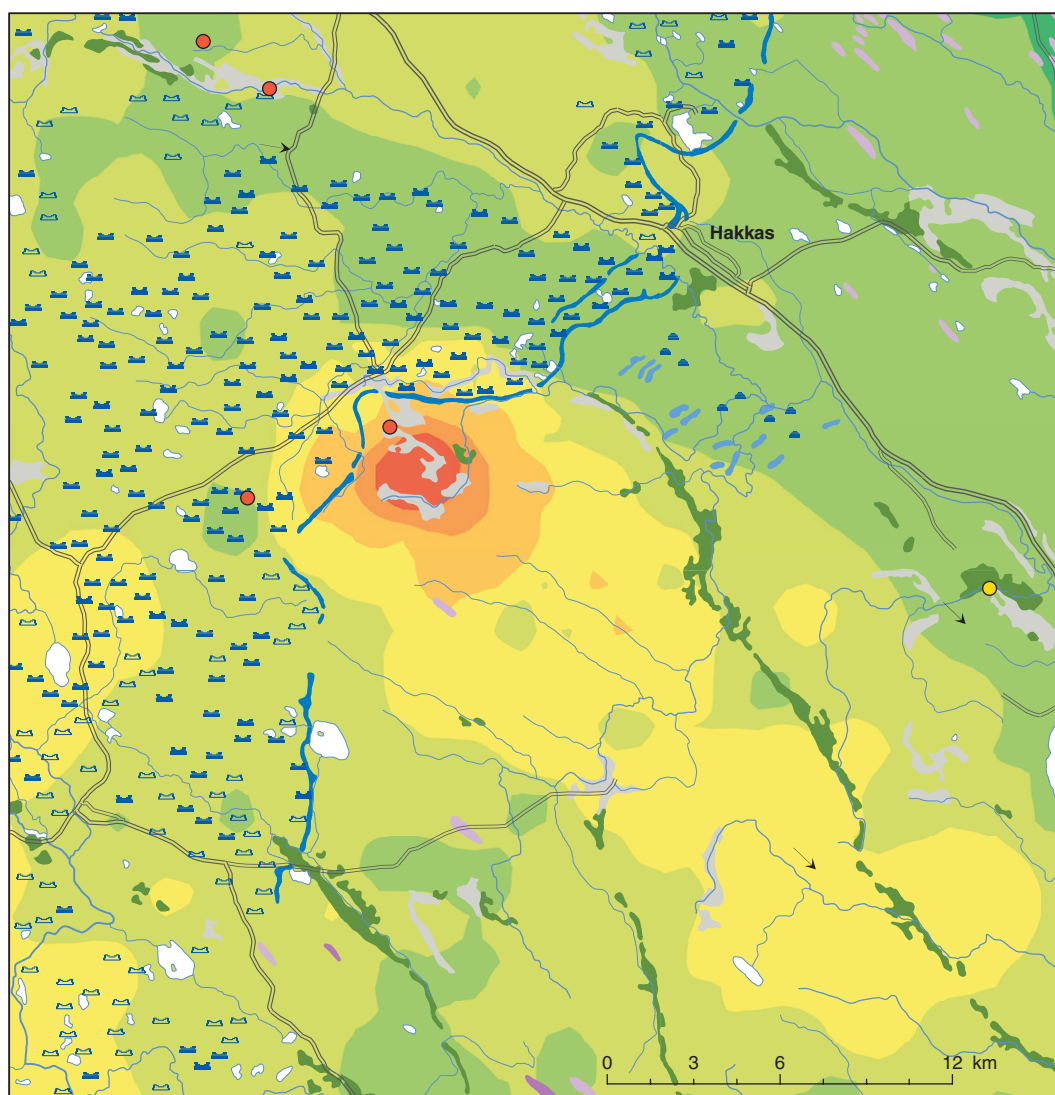
gränsvärdet 10 µg/l. Samtliga arsenikföreningar är giftiga och orsakar miljö- och hälsoproblem för miljontals människor världen över. Allra giftigast är enkla oorganiska föreningar såsom arsenat och arsenit. Arsenat är till förväxling likt det viktiga näringsämnet fosfat och kommer därför in i cellen av misstag genom fosfattransportörer. Arsenik är cancerframkallande och kan efter många års exponering ge tumörer i hud, lunga, urinblåsa och njure. De tidigaste symtomen på kronisk arsenikförgiftning är pigmenteringsförändringar i huden och hyperkeratos, dvs. förtjockning av hudens hornlager, framför allt på handflator och fotsulor. Experimentella studier tyder på att barn kan vara känsligare än vuxna. Arsenik kan ge upphov till hudcancer. I likhet med andra spårämnen förefaller arsenik också ha en positiv biologisk roll, sannolikt vid proteinsyntesen. Behovet täcks av de låga halter som finns i dricksvattnet. Brist kan ge dålig tillväxt och förhöjd fosterdödlighet. Eftersom arsenik befrämjar tillväxten kan det tillsättas i foder som används för uppfödning av grisar och fjäderfä (Reimann m.fl. 2003).

Till skillnad från i Skelleftefältet (Lax 2005) är innehållet av arsenik genomgående mycket lågt i undersökningsområdets moräner, framför allt i den nordostliga delen. En regional förhöjning med halter över 5 mg/kg löper dock över det sydvästra hörnet av området och av SGAB- och NSG-data utanför undersökningsområdet framgår att denna förhöjning utgör del av en större förhöjning med maximum i fjällkedjan. I övrigt finns endast två punkter med halter över 10 mg/kg. Båda ligger ca 1,7 km sydost om Puolalakimineraliseringen, en sulfidmineralisering med arsenik, guld, koppar, och wolfram. Den ena av de två punkterna provtogs 2001, och omprovtagning skedde året därpå ca 50 m norrut eftersom halterna av många element var så höga att kontaminering inte kunde uteslutas. Omprovtagningen verifierade dock att halterna av bl.a. arsenik, vismut, krom, koppar, molybden, järn, magnesium, vanadin och svavel var förhöjda. Det är inte omöjligt att mineraliseringen vid Puolalaki och eventuellt den västerut liggande Artuvaara kan spåras mer än en mil nedåt i isrörelseriktningen; 12 km mot sydost är halten fortfarande dubbelt så hög som "normal" bakgrundshalt i området (ca 2 mg/kg). Morän-genetiskt ligger Puolalaki med sin elementförhöjda morän utanför (öster om) en ändmoränbåge som markerar skiljelinjen mellan ett ackumulationsområde med moränkullar i väster och morän som saknar sådana former i öster (fig. 14). Fyndigheten i Artuvaara med arsenik, koppar, bly och zink återfinns i ackumulationsområdet men moränen här saknar elementförhöjningar som relaterar till fyndigheten. Moränbågen är en sydlig del av den tidigare nämnda Lainiobågen.

Arsenikhalterna korrelerar starkt med svavel, relativt starkt med antimon och svagt med vismut. Korrelationen indikerar att arsenik huvudsakligen ingår i association med sulfider. Kartbilden visar också svaga förhöjningar i arsenikhalt i anslutning till kända mineraliseringar. Tilläggas kan att arsenik analyseras på SGU både med kungsvattenlakning och salpetersyralakning och metoderna ger nästan identiska resultat ($r = 0,99$), även om kungsvatten ger något högre halt.

Guld (Au)

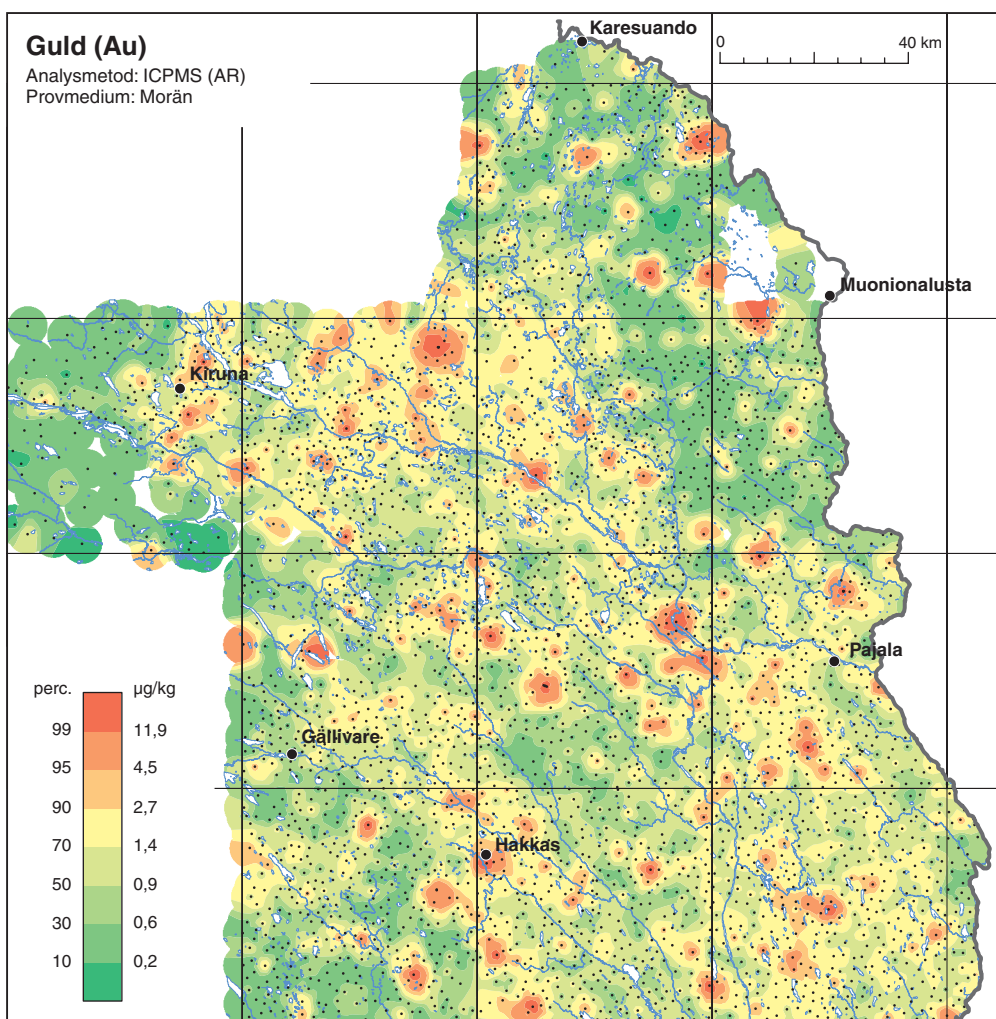
Guld är en ädelmetall som är en av de mest sällsynta i naturen. I jordskorpan finns i genomsnitt endast ca 0,004 mg/kg guld. Metallen är emellertid mycket ojämnt fördelad, huvudsakligen beroende på de anrikningsprocesser som ägt rum på jordytan eller i jordskorpan. Geologiska processer har anrikat guld till halter och mängder som kan brytas och utvinna, ibland i form av rena guldmalmer, men lika ofta som biprodukt vid utvinning av andra metaller, t.ex. koppar, zink, nickel, platina och palladium. Ingen speciell bergart är känd för att innehålla guld, men i kontaktzoner, i hydrotermala gångar ofta tillsammans med kvarts eller där berggrunden är störd av deformation kan miljön vara gynnsam för guldmineralisering. Kemiskt är guld en ädelmetall och den reagerar inte nämnvärt med vatten, luft, syre, ozon, kväve, väte, fluor, jod, svavel och svavelväte vid vanliga förhållanden. Mineralsyror och organiska syror har ingen effekt på metallen, varken i utspädd eller koncentrerad form eller vid höga temperaturer. Kungsvatten (saltsyra/salpetersyra = 3/1) är det klassiska lösningsmedlet. Alkalimetallcyanider i närvaro av syre eller andra oxidationsmedel, vilket är grunden för cyanidlakning, löser också metallen. Guld reagerar även med torr klorgas. Kolloidalt guld i vatten ger lösningar med intensivt röda, blå eller violetta färger.



Figur 14. Arsenikanomali i morän i Hakkasområdet (7M HNO₃/ICP MS).

Figure 14. Arsenic anomaly in till near Hakkas (7M HNO₃/ICP MS).

Tidigare var guld svårt att analysera på grund av de ytterst låga halterna i marken. Idag finns snabba och säkra metoder för de låga guldhaltarna. Problem ligger istället i provtagningen eftersom guld, till skillnad från många andra element, inte ligger jämnt utspritt i moränen utan ofta uppträder med s.k. nuggeteffekt – som små korn. Detta gör det vanskligt att bedöma ett område som har en punktvis förhöjd guldhalt. Vid vittring är metallen ganska stabil, men kan under vissa förutsättningar bilda olika föreningar som har högre rörlighet. I lösform tas guld lätt upp av växter; en del är kända för



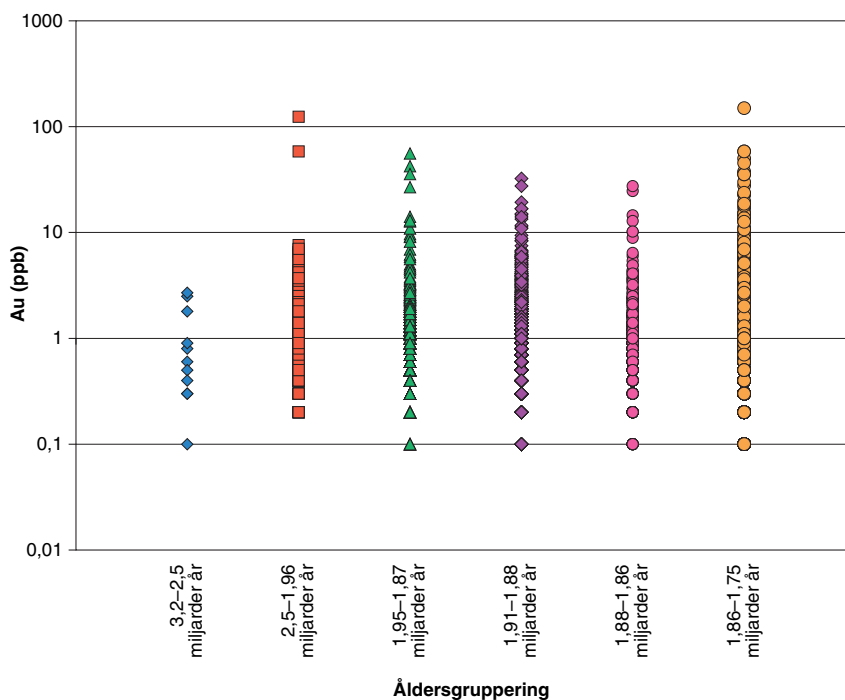
att ackumulera metallen. Associerat med organiskt innehåll är transporterat guld ofta anrikat i en markprofils övre delar. Guldhalterna i mark är därför vanligtvis högre i humus än i djupare marklager.

Guld används oftast legerat och det bildar legeringar med de flesta andra metaller, t.ex. zink, bly, koppar, silver, kvicksilver, nickel, palladium och platina. Guldlegeringar har, liksom rent guld, mycket goda korrosionsegenskaper. Legeringen ökar hårdheten och förbättrar motståndskraften mot nötning men försämrar ibland formbarheten. Legeringar innehållande två eller flera andra metaller förutom guld är vanligast. För guldsmycken används oftast guld-silver-kopparlegeringar (ofta kallade rött, gult eller grönt guld), guld-nickel-kopparlegeringar (vitt guld) och guld-silver-palladiumlegeringar. Guld-kopparlegeringar används som hårdlod i speciella applikationer då hållfasthet även över 500 °C efterfrågas, t.ex. till komponenter i jetmotorer. Ädelmetallen används också som dentalguld, och för medicinska ändamål har exempelvis injektioner av guld använts vid behandling av reumatiska sjukdomar.

Det geokemiska mönstret för guld i undersökningsområdet visar en hel del fläckvisa förhöjningar ibland tillsammans med andra element såsom arsenik, koppar, svavel, antimon och vismut.

För närvarande är cirka 64 guldmineraliseringar kända i undersökningsområdet enligt SGUs databas. Ungefär två tredjedelar av dessa är angivna som guld-koppar-mineraliseringar. En viss trend kan eventuellt ses på kartbilden för guld i morän. I området från Kiruna mot sydost uppträder flertalet guldanomalier som förhöjda guldhalter omgivna av något gulfattigare punkter. I nordost och i sydväst uppträder i stället lokalt enstaka förhöjda guldhalter.

Guldanomalier följer ofta mineraliseringar som till exempel vid Laukajärvi, ca 30 km väster om Kiruna, och Kallosalmi som är beläget norr om Kiruna. I en region nordväst om Svappavaara inne-



Figur 15. Jämförelse av guldhalter i morän (logaritmisk skala) med relevanta åldersgrupper i berggrund. Diagrammet visar att högst halter förekommer i den yngsta gruppen av svekokarelska bergarter.

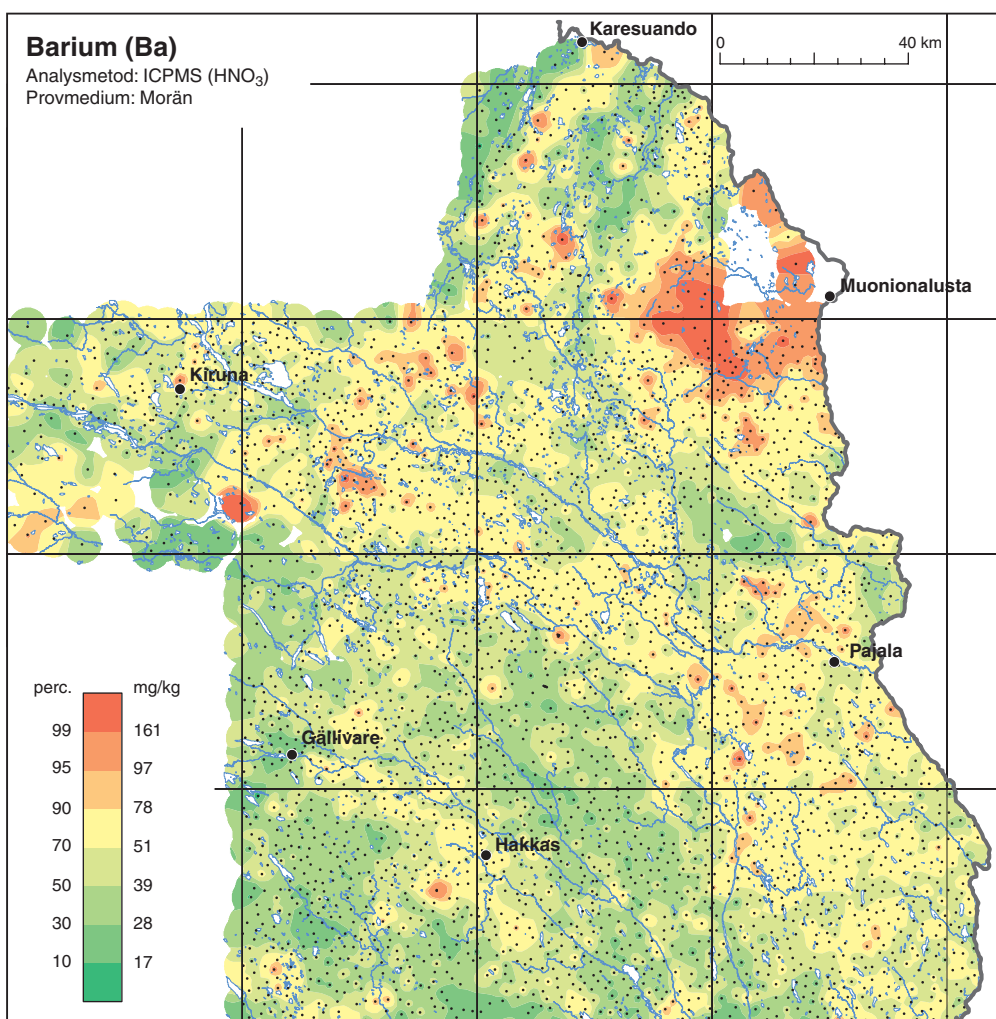
Figure 15. A comparison of gold concentrations in till with respective age groups in the bedrock shows that the highest values of gold occur in the younger sveco-karelian rocks..

håller flera prov anomala halter. I anslutning till denna region ligger Särkivaara, en guld-koppar-molybdenfyndighet som tidigare har brutits. I kartområdet 29K Vittangi NV ligger även mineraliseringen Leppäkoski i anslutning till flera prov med anomal guldhalt. I den södra och sydöstra delen av det karterade området finns flera guld-anomalier som är svåra att förklara eftersom de inte följer en speciell litologi och det inte heller finns några kända mineralfyndigheter. En jämförelse med berggrundsgeologin i området (fig. 15) visar att högst guldhalter i morän förekommer där svekokarelska bergarter (1,86–1,75 miljarder år gamla) underlagrar moränen. Exempel på dessa bergarter är graniter, pegmatiter, granodioriter, metavulkaniter och sedimentära bergarter. Guld uppvisar inga nämnvärda korrelationer med andra analyserade parametrar.

Barium (Ba)

Bariuminnehållet är generellt högst i finkorniga yngre graniter, något lägre i gnejsgranit och lägst i basiska bergarter. Geokemiskt associeras barium med kalium och rubidium. 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 eller i gångar och håligheter i sedimentära bergarter. Metallen kan ersätta kalium i bergartsbildande mineral, men också kalcium i t.ex. plagioklaser. Barium kan också ersättas av t.ex. strontium. Elementet är inte särskilt mobilt och vid vittring adsorberas barium effektivt till järn- och manganhydroxider och -oxider, fälls ut som sulfat eller karbonat eller binds till lermineral.

Spridning av barium till miljön kan ske genom gruvbrytning, anrikning och produktion av metallen. Metalliskt barium har relativt liten praktisk betydelse. På grund av den höga reaktionsbenägenheten med syre, väte, kväve, koldioxid och vattenånga har barium dock fått teknisk användning som uppsamlare av dessa gaser i olika typer av vakuumsystem, t.ex. i bildrör till tv-mottagare. Bariumsulfat är synnerligen svårslösligt i vatten och har bl.a. fått användning inom den medicinska röntgenologin som kontrastmedel. Vattenlösliga bariumföreningar är giftiga och har vållat åtskilliga förgiftningsfall. Industriella och metallurgiska processer kan föra ut barium i spillvatten. Vid eldning av fossila bränslen och sopor sprids barium till atmosfären och användning av flygaska och rötslam sprider också metallen. Barium kan även återfinnas i konstgödning.

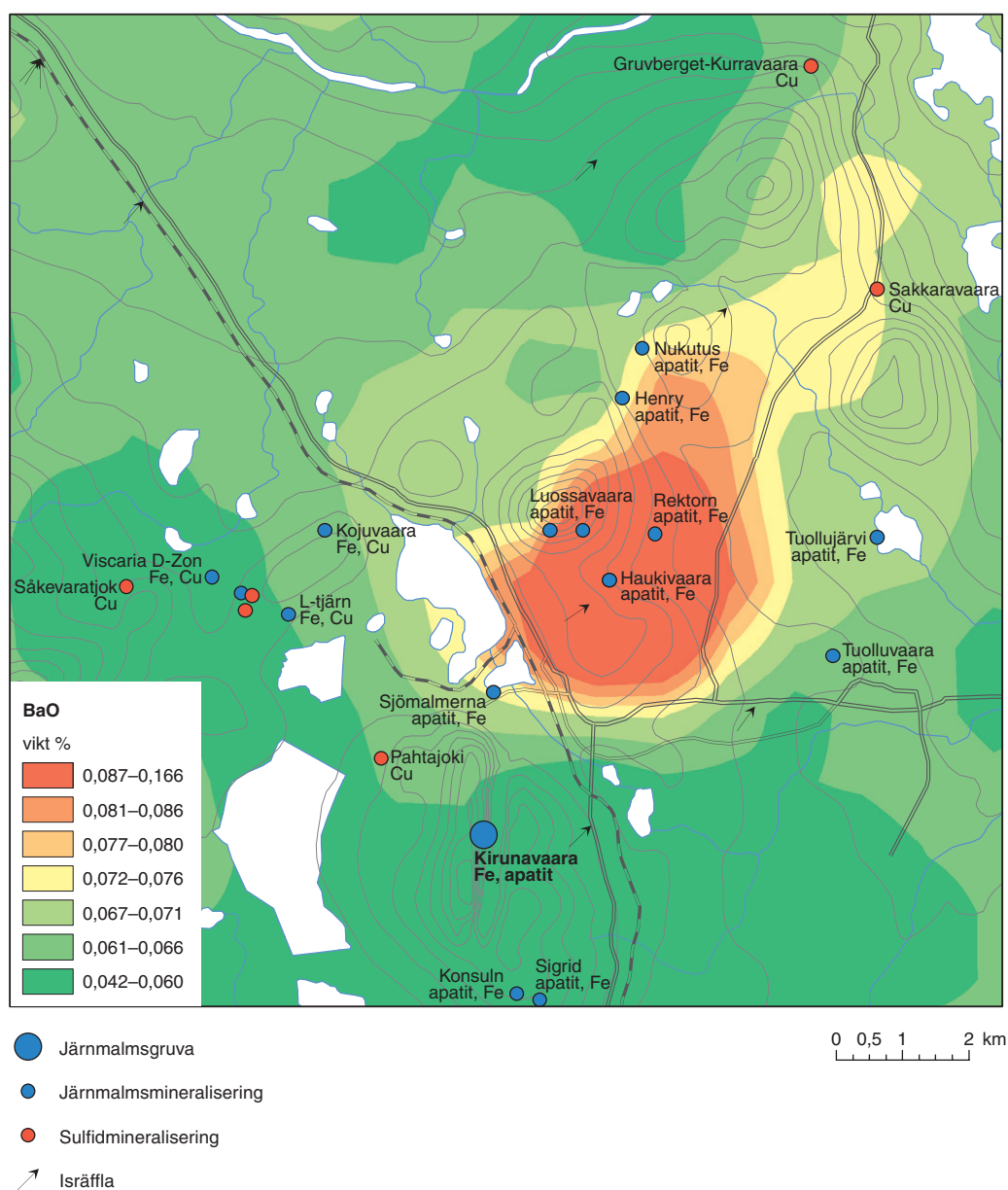


Metallen bariums uppträdande är ofta associerat med specifika mineraliseringar och hydrotermala omvandlingar. Det bariumhaltiga mineralet baryt förekommer ofta bland några av norra Norrbottens metasomatiska bergarter såsom sericitskiffrar och sericitkvartsiter, exempelvis i närheten av Gruvberget, Per Geijers järnmalm, i anslutning till Undre Haukiserien samt i hydrotermala kvartsiter (sillimanit-korund-andalusitgnejser) i närheten av Malmberget. Dessa barytförande omvandlingsbergarter har rumsliga samband med vissa mineraliseringar, vilket gör dem intressanta ur prospekteringsynpunkt. Det är fortfarande oklart om de omvandlade bergarterna har en genetisk koppling till malmförekomsterna som sitter i dem.

Medianhalterna för såväl totalhalter som syralakbart barium är högre än i landet i övrigt. Den totala bariumhalten i moränproven varierar mellan 349 och 1 506 mg/kg, med den högsta totalhalten i Pessinkiområdet. Halten syralakbart barium varierar mellan 10 och 707 mg/kg, varav det högsta värdet även det återfinns i Pessinki, väster om sjön Aljujärvi. Det förekommer inga kända mineraliseringar i närheten av de två moränprovtagningsplatserna. För övrigt är det i de nordöstra delarna av undersökningsområdet som man främst hittar de högsta bariumvärdena i moränen. En stor positiv anomali täcker regionen mellan Huuki, Karesuando och Övre Soppero. Den begränsas i sydväst av den stora regionala förkastningen som sträcker sig mellan Tulinkivaara och Kangos. Fler förhöjda bariumhalter kan observeras längs den finska gränsen. I linjen mellan Svappavaara och Ertsjärv uppträder en del mindre, positiva bariumanomalier. Dessa är mer sammanhängande jämfört med exempelvis de utanför Kiruna. Det finns också ett antal fläckvisa anomalier i de östra, centrala och norra delarna av undersökningsområdet samt sydost om Gällivare, i Nautanenområdet och i Pumutrakten.

Den låga lakbarheten (ca 7 %) innebär att den största andelen barium som finns i området normalt är knuten till relativt svårlakade mineral, såsom fältspater. I en ca 60 km lång zon från Saivo till öster om vägen mellan Vittangi och Soppero påträffas en lakbarhet högre än 15 % i de lokala moränerna. Högst procentuell lakbarhet (46 %) har uppmätts strax norr om Svappavaara. Denna lokal är belägen ca 2,2 km ostnordost om Gruvberget. Såväl totalhalter som syralakbara halter och procentuell lakbarhet tenderar att öka i närheten av sulfidmineraliseringar. I området kan det således iakttas en svag korrelation mellan sulfidförekomsternas geografiska placering och de anomala halterna för syralakbart barium.

I området strax norr om Kirunavaara järnmalm finns en positiv bariumanomali (fig. 16). Isrörelse-riktningen antyder att materialet kan ha haft sitt ursprung i kopparmineraliseringen Pahtajoki. Samtidigt utbreder sig anomalin i ett område som domineras av barytförande hydrotermalomvandlade bergarter av den så kallade Undre Haukiserien (sericitskiffrar och sericitkvartsiter) som byggs upp främst av kvarts och sericit med underordnade mängder av klorit och kalcit.



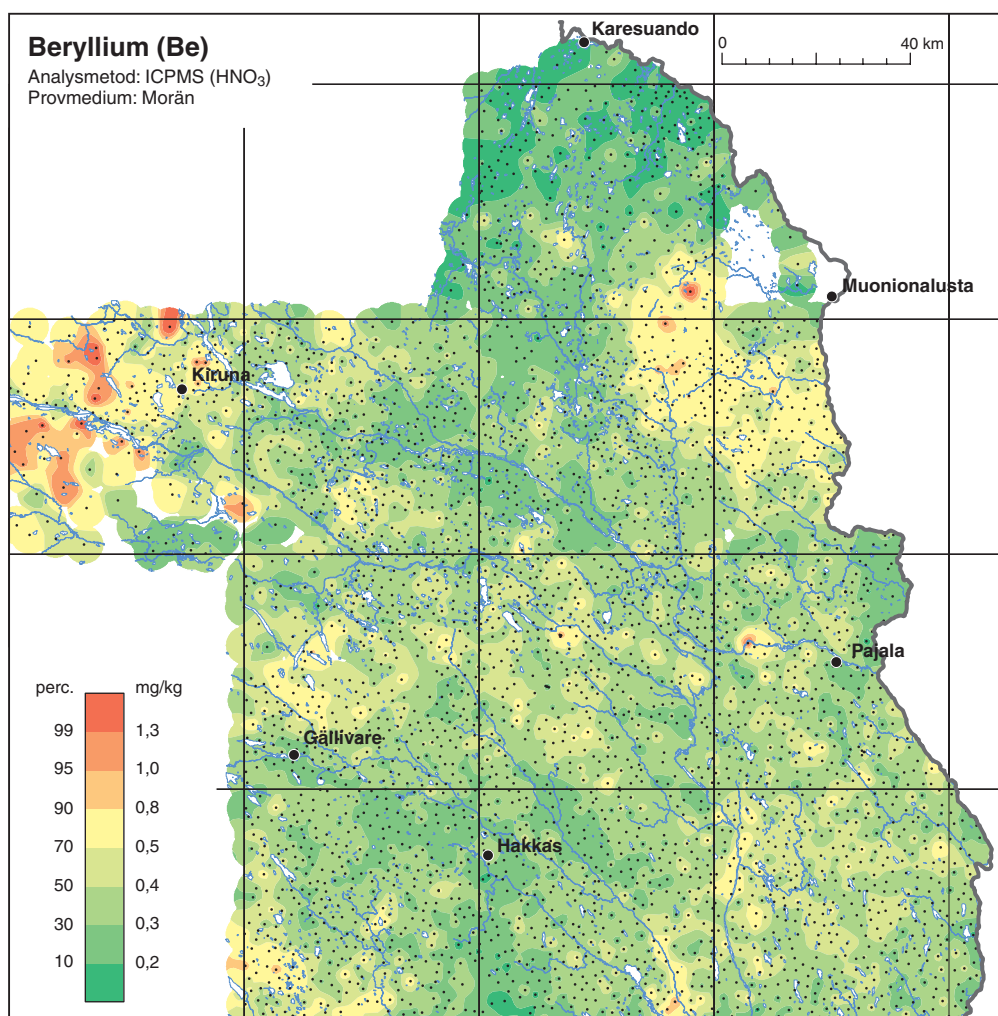
Figur 16. Bariumanomali (XRF) i morän och malmförekomster i Kirunaområdet.

Figure 16. Barium anomaly (XRF) in till and mineralisations in the Kiruna region.

Beryllium (Be)

Beryllium är ett sällsynt grundämne. Det förekommer dock i ca 45 olika mineral av vilka endast beryll ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$) och bertrandit ($\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$) är av betydelse för framställning av metallen och dess föreningar. Beryllium finns bland annat i graniter, granodioriter och skiffrar. Berylliums förmåga att bindas till organiska föreningar gör att kol också innehåller metallen. Beryllium kan vara associerat med litium och rubidium i pegmatiter samt uppträda tillsammans med koppar, bly, zink, molybden, wolfram m.fl. i skarnbildningar. Beryllium ingår också i mineral som amfiboler, pyroxener, glimrar, plagioklaser och lermineral. Den vanligaste förekomstformen är i mineralet beryll, men beryllium kan även substituera för kisel och därmed uppträda i olika fältspater. Mineralet beryll kan påträffas i pegmatiter, och svenska fyndigheter finns bland annat i Västmanland. Mer exotiska former av beryll är bl.a. smaragd och akvamarin. Vid vittring är beryllium inte särskilt rörligt, undantaget i sur skogsjord. Väl löst, binds beryllium lätt till organiskt material samt till lermineral där det kan ersätta bland annat aluminium.

Beryllium anses inte vara ett essentiellt spårämne. Beryllium och dess föreningar är mycket giftiga, troligen på grund av att metallen kan tränga ut magnesium ur vissa enzymer. Särskilt inandning av damm från metallen, dess legeringar eller berylliumoxid kan ge upphov till kronisk berylliumförgiftning med astmaliknande symtom och reduktion av lungkapaciteten. Det finns också statistiskt belagda samband mellan höga och långvariga exponeringar och lungcancer. Därför klassas beryllium och dess föreningar som cancerogena. En del växter, exempelvis tobak, har förmåga att ackumulera metallen.

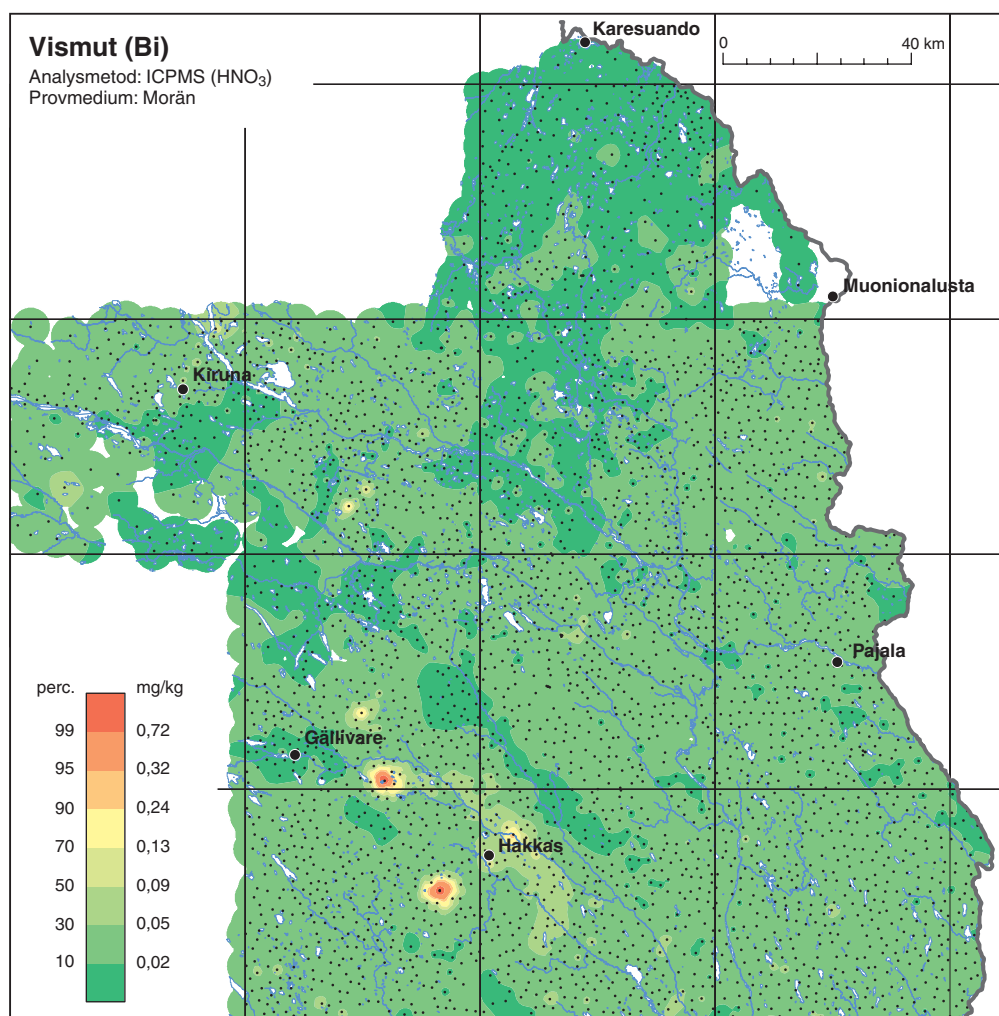


Medianhalten av beryllium i kartområdets moräner är lägre än för landet i övrigt. Beryllium förekommer dock med förhöjda halter i morän nästan uteslutande knutet till underliggande sura till intermediära djupbergarter som graniter och syeniter, t.ex. norr och nordväst om Parkalompolo. Där återfinns en uthållig förhöjning som anknyter till underliggande graniter, pegmatiter och granodioriter. Även vulkaniska motsvarigheter till dessa bergarter ger upphov till förhöjda halter liksom vissa basiska vulkaniter. Generellt finns förhöjda berylliumhalter i nordväst i Kirunaområdet samt måttligt förhöjda halter norr och öster om Gällivare, i sydväst och i öster.

Beryllium korrelerar med salpetersyralakat aluminium, järn, litium och zink samt svagare med lantan, magnesium, rubidium, syralakat titan, tallium samt yttrium. Associationen kopplas till olika skiktssilikater och till pegmatitiska bergarter.

Vismut (Bi)

Vismut är det minst vanliga av kvävegruppens element. Sedimentära och magmatiska bergarter kan innehålla vismut och metallen förekommer vanligtvis anrikad i glimmerrika bergarter och i kol. Skifferar och graniter har ofta högre vismutinnehåll än kalkstenar, sandstenar och basiska bergarter. Världmineral för vismut kan vara apatit, blyglans, zinkblände m.fl. Vismut kan ersätta bly och yttrium i magmatiska processer och kan också ersätta kalcium i apatit. Vismutmineral är inte särskilt vanligt förekommande, men några exempel är vismutglans, Bi_2S_3 , bismut, Bi_2O_3 och vismutpat, $(\text{BiO})_2\text{CO}_3$. I mineraliseringar är vismutglans ofta associerad med magnetit, pyrit, kopparkis, zinkblände och bly-



glans. Vismut kan påträffas i tenn- och wolframmalmer och i hydrotermala gångar tillsammans med guld, silver, nickel, kobolt och bly.

Vismut används som indikatorelement för guld och återfinns ofta associerad med de flesta typer av guldmineraliseringar, sulfidförekomster, porfyrkopparmalmer, guldförande kvartsgångar och VMS-mineraliseringar. I Europa finns de största vismutfyndigheterna i Tyskland och Spanien. Geokemiskt liknar vismut fosfor, arsenik och antimon. Vismut är inte särskilt mobilt och som karbonat relativt stabil. Vid vittring oxideras metallen snabbt, men väl i lösning kan vismut åter bindas till järn- och manganhydroxider och till organiskt material. Vismut är ganska mobilt och finns i vatten och i biotillgänglig form. Vismut räknas inte som essentiell för människan. Inte heller anses det vara toxiskt, även om det finns enstaka rapporter om motsatsen.

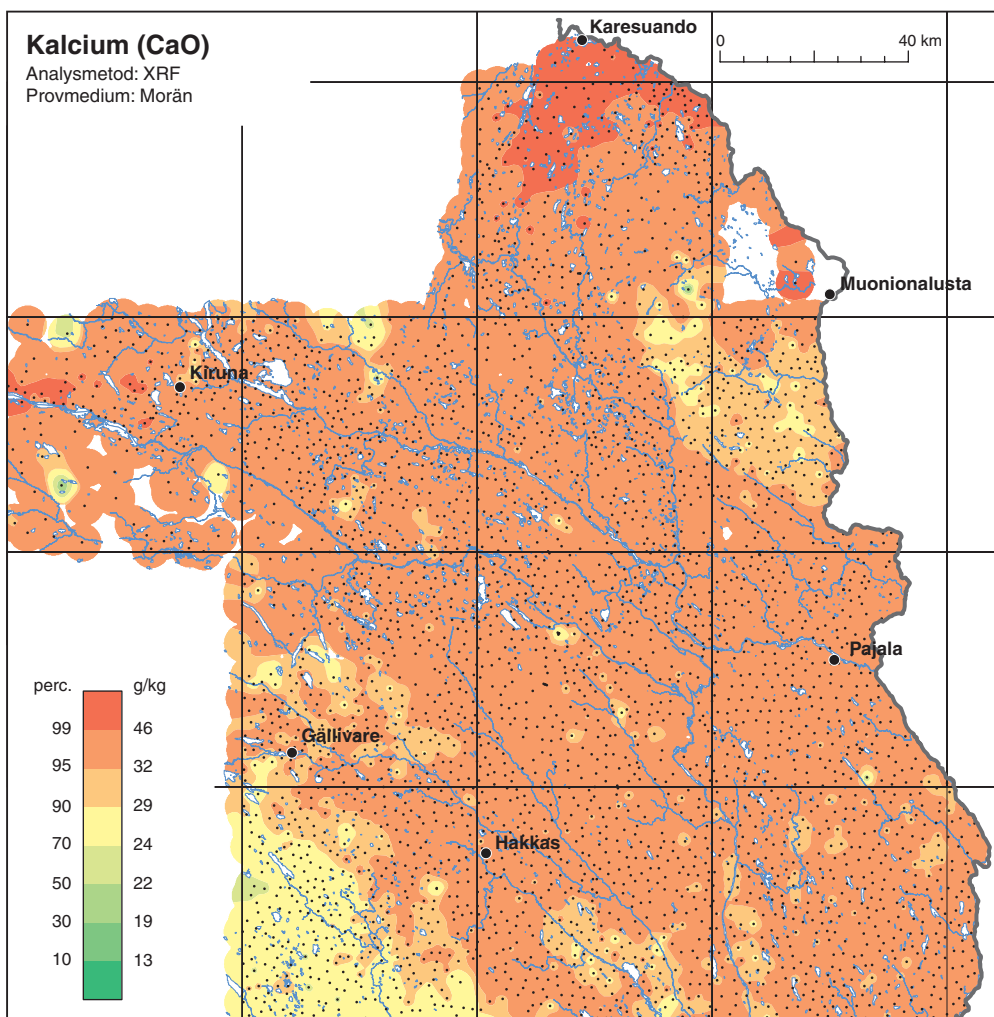
Vismut används i form av lättsmälta legeringar som utnyttjas för t.ex. elektriska säkringar, sprinklersystem och andra automatiska anordningar för brandsläckning samt vid lödning. Legeringarna används också i tillämpningar där man utnyttjar deras egenskap att utvidgas vid stelning. En del av vismutproduktionen används för framställning av kemikalier för läkemedel, kosmetika, katalysatorer, termoelektrisk utrustning och pigment. Vismutföreningar har sedan flera hundra år använts medicinskt både för ut- och invärtes bruk och har brukats mot syfilis och gonorré. Den medicinska användningen har gått starkt tillbaka på grund av att vissa preparat också har giftverkningar. Läkemedel innehållande vismut har tidigare använts i Sverige mot vissa mag-tarmsjukdomar, men på grund av risken för biverkningar på framför allt nervsystemet är inget sådant preparat numera godkänt. Till miljön sprids vismut i samband med gruvbrytning, vid smältverk och skrotförbränningsanläggningar. Vismut påträffas också i rötslam. En trolig orsak är hushållens användning av läkemedel och kosmetika som transporteras ut av spillvatten.

Vismuthalterna i kartområdet är genomgående låga eller mycket låga. Salpetersyralakning visar att endast ett tiotal prov innehåller halter högre än medianhalten för riket (0,1 mg/kg). Flera av dessa prov med hög vismuthalt kan knytas till moräner nedströms isriktningen från kända sulfidmineraliseringar (t.ex. Liikavaara, Puolalaki, Mourjevaara) och norr om Kiruna (Kurravaara). Högst halter (1,8 mg/kg) hittas 2 km öster om Liikavaara och 5,5 km öster om Aitikgruvan. Mellan Ullatti och Hakkas återfinns ett område där många prov visar relativt förhöjda halter, varav tre prov överstiger 0,1 mg/kg. Dessa prov bygger upp en anomali som sträcker sig i nordvästlig–sydöstlig riktning och som kan knytas till flera förekomster med guld, silver, koppar och molybden (t.ex. Suorravaara). På kartan ansluter vismutanomalier bra till järnmalm, speciellt de som förekommer tillsammans med apatiter, såsom Tjaskajäkk (väster om Kiruna), Renhagen-Harrejaure (sydväst om Kiruna) samt Kulleri och Koivujärvi i Svappavaaraområdet. Sydväst om Junosuando kopplas förhöjda vismuthalter till förekomster av bly, zink, koppar, silver och guld (t.ex. Kurkkionvaara och Oriasvaara). Förhöjda halter i öster mellan Kitkiöjoki och Kihlanki kan knytas till intrusiva bergarter från granit-pegmatitserien.

Det geokemiska mönstret är snarlikt de för arsenik och tenn. Samma elementassociation återfinns också i en svag korrelation med dessa element. Vismut korrelerar bäst med silver, arsenik, beryllium, järn, litium, molybden, bly, tallium och zink ($r=0,5-0,6$). Korrelationen mellan salpetersyra- och kungsvattenlakning för vismut är mycket god, den senare är dock ca 25 % effektivare.

Kalcium (Ca)

I Sveriges berggrund och jordarter uppträder kalcium i huvudsak som föreningar med kisel (silikater). Huvudelementet kalcium ingår i ett flertal bergartsbildande mineral, exempelvis karbonater, amfiboler, pyroxener, apatit och kalciumrika varianter av fältspat. Generellt kan sägas att basiska bergarter eller grönstenar oftast uppvisar förhöjda kalciumhalter i jämförelse med gnejser och graniter. De vanligaste exemplen på grönstenar är gabbro, hyperit, diorit, diabas, basalt och amfibolit. I urberget förekommer sporadiskt förhöjda halter av kalcium i kristallina kalkstenar eller dolomitstenar (marmor). Kalciuminnehållet i kalkstenar är naturligtvis mycket högt, mer än 50 % av bergarten byggs upp av mineralet kalcit.



Om man studerar ett histogram över kalciumhalter i svenska skogsjordar kan möjligen två populationer urskiljas, dvs. kalcium visar tendenser till binomial fördelning. Den ena, huvudpopulationen, emanerar sannolikt ur gnejs- och granitdominerade jordarter. Den andra är mindre till storleken men uppvisar ungefär tre gånger så höga halter som huvudpopulationen och förmodas vara påverkad av kalkstenar. Vid vittring är kalcium mycket lättlost ur karbonater och i kalkstensområden har markprocesser bidragit till att de lättlösliga kalcitmineralen lakats ur de övre delarna i en markhorisont. Lösligheten i andra mineral varierar men är betydligt lägre än i karbonater. Kalcium i lösning kan åter bindas i olika lermineral, exempelvis i illit och klorit. Kalkstenar uppträder huvudsakligen i nära anslutning till områden där kambrosilurisk sedimentär berggrund bevarats från erosion. Sådana kalkstensområden finns inte bara på Öland, Gotland, Skåne och i Jämtland utan också på havsbotten mellan Sverige och Finland.

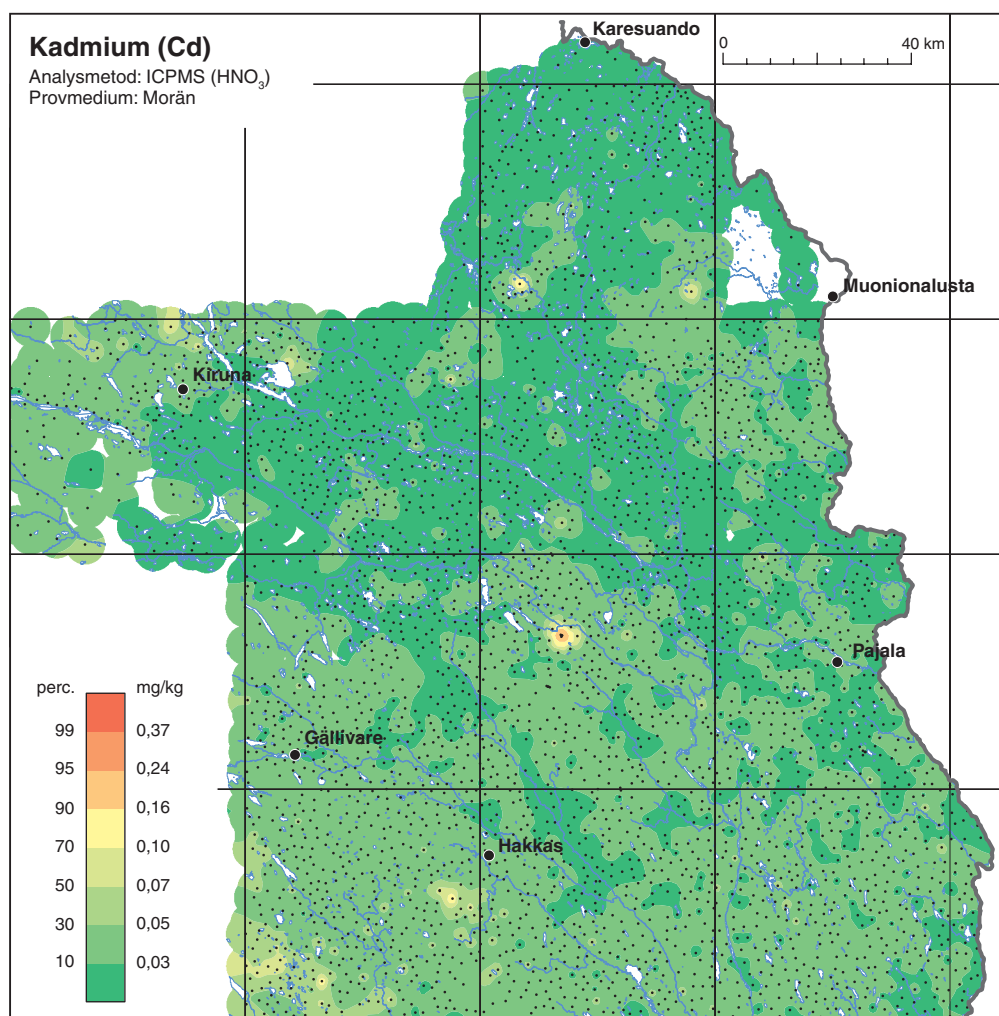
Kalcium är ett livsnödvändigt ämne för växter, djur och människor. Kalciumfosfat ingår i benstomme och tänder. Kalciumjonen är viktig för hormonella aktiviteter och väsentlig vid celledelning.

Kalciuminnehållet i undersökningsområdets moräner är högt och generellt högst i de norra och nordvästra delarna. Även i territoriets centrala delar finns utspridda förhöjningar. Medianvärdena är högre för såväl kalciums totalhalter som den syralakbara delen jämfört med övriga landet. Medianvärdet på totalhalten ligger på 35 g/kg medan halten av syralakbart kalcium är 4,5 g/kg. Lakbarheten är således cirka 12 %. Det högsta kalciuminnehållet i morän återfinns i Kallokkamarastoområdet sydost om Sautusjärvisjön. Totalhalten är där 59,5 g/kg medan syralakbar kalciumhalt är 8,8 g/kg vilket ger en lakbarhet i moränen på 15 %. De fläckvisa kalciumförhöjningarna i morän som finns i områdets

centrala och sydöstra delar är orienterade i nordväst–sydost och sammanfaller med vissa geologiska strukturer men det är omöjligt att knyta dem till konkreta bergartstyper. Kartan som visar det syralakbara kalciumet uppvisar ett något annorlunda mönster. De högsta syralakade halterna sammanfaller med de totala värdena beskrivna ovan. Däremot uppträder anomala syralakade kalciumhalter i de sydvästra delarna av undersökningsområdet där det finns basiska metavulkaniska bergarter. Den totala kalciumhalten korrelerar väl med element såsom magnesium, natrium, klor, strontium och vanadin, som för övrigt ingår i basiska och ultrabasiska bergarter. Klor och natrium utgör ett undantag i den här gruppen. Samtidigt är det välkänt att norra Norrbottens bergarter drabbats av regional skapolitisering och albitisering. Plagioklaser från områdets basiska bergarter har omvandlats till klor- och natriumhaltig skapolit eller till natriumhaltig albit, vilket kan förklara korrelationen i morän. Det syralakade kalciumet korrelerar positivt med fosfor, natrium och strontium som kan indikera apatitrik berggrund till exempel i Kirunatrakten.

Kadmium (Cd)

Kadmium förekommer vanligen med högsta halter i skiffrar och basiska bergarter. Kalkstenar kan också innehålla metallen medan sandstenar vanligen har låga eller mycket låga halter (undantaget är mineraliseringar i kambrisk sandsten som i Skåne). Metallen återfinns i bergartsbildande mineral som amfiboler och biotit men finns också i sulfider och kan ingå i zinkblände och andra zinkmineral. Kadmium uppträder också tillsammans med zinkblände i blyglansimpregnationer i vissa sandstenar. Kadmium följer i allmänhet zink i den geokemiska cykeln, beroende på att elementen tillhör samma



grupp i det periodiska systemet, deras joner har samma laddning (2+) och båda elementen är kalkofila (binds gärna till sulfider). Vid vittring mobiliseras kadmium snabbt, är mycket rörligt i sur miljö och kommer snabbt ut i vattensystemen. Metallen kan dock adsorberas till bland annat lermineral och järnföreningar.

Kadmium är giftigt och kan ge skador på njure och skelett och antas också vara ett carcinogent ämne. Grönsaks- och spannmålsprodukter har en viktig roll när det gäller vårt intag av kadmium. Metallen utgör en riskfaktor vid odling på grund av att förhöjda halter i marken kan medföra att kadmiumhalten i växterna och födan också ökar. Olika undersökningar har visat att de geologiska faktorerna dominerar den regionala fördelningen av metaller i svensk åkermark (Eriksson m.fl. 1997). I Skåne är den dominerade källan för kadmium i alv och matjord kadmiumförande mineral i berggrund och mineraljord (Kornfält m.fl. 1996).

Halterna av kadmium är överlag mycket låga i undersökningsområdet. Mindre än 1 % (28 prov) av områdets moränprov har högre kadmiumhalt än rikets medianhalt (0,07 mg/kg). Den högsta halten (0,31 mg/kg) påträffades i moränen vid fyndigheten Kurkkionvaara söder om Masugnsbyn. Lika hög kadmiumhalt återfinns i moränområdet söder om Lannavaara där bland annat fyndigheten Huornaisenvuoma finns. Här är anomalin helt utdragen i isrörelsens nordostliga riktning. I övrigt återfinns relativt förhöjda halter i områden med kända mineraliseringar, samt i moränområden med positiva anomalier på flera andra sulfidelement. Kadmiummönstret i kartområdets moräner svarar väl mot kända mineraliseringar. Kadmiumhalterna korrelerar med bly och zink och något svagare med silver. I association med en zinkanomali indikerar vanligen en kadmiumanomali sulfidmineralisering.

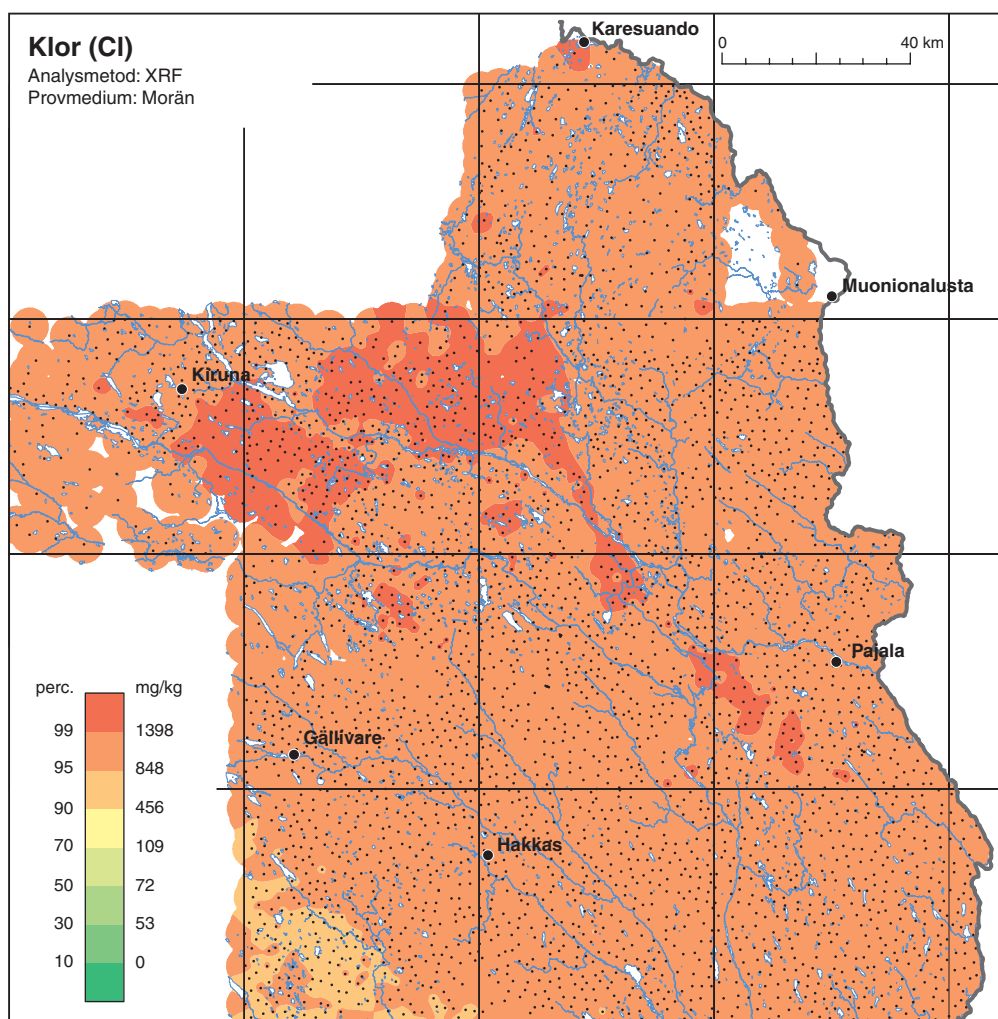
Klor (Cl)

Klor är ett av sjutton ämnen i den halogena gruppen och uppträder tillsammans med fluor, brom och jod. Grundämnet klor är ett av få element som undersökts som normalt uppträder som negativt laddad jon (anjon) i geokemiska system. Havsvatten innehåller stora mängder klor (i medeltal ca 2 %) i form av lösta klorider. Medelhalten av klor i jordskorpan är 244 mg/kg (Rudnick & Gao 2003). Förekomsterna i jordskorpan har till största delen bildats genom avdunstning av havsvatten och består bl.a. av kloriderna stensalt (NaCl), sylvin (KCl) och carnallit ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Klor förekommer i såväl sura som basiska bergarter. Graniter, granodioriter och skifferar har vanligen högre klorhalter än kalkstenar och basiska bergarter. Mineral som apatit och silikatet sodalit kan vara bärare av elementet, liksom glimrar och hornblände. I vissa fall kan klor också vara associerat med bly-, silver- och kopparmineral.

Klor, som en av huvudbeståndsdelarna i havsvatten, har impregnerat bergarter bildade i havsmiljö, och klorjoner från havsvatten förs alltså in och sprids över land med havsvindar. Lösta klorjoner adsorberas inte till humus eller markpartiklar och bildar inte heller några komplex utan förs i princip med ytavrinning samt mark- och grundvatten åter till havet. Klor är ett mycket reaktivt grundämne och finns därför vanligen inte fritt i naturen utan huvudsakligen i jonform som klorid. Klor är tillsammans med svavel och brom några av de få element som naturligt uppvisar drag som inte alltid är knutna till geologin.

Klor är en av de viktigaste baskemikalierna i den kemiska industrin. Elementärt klor används för desinfektion. Av mer kända klorföreningar kan nämnas en del antibiotika med medicinsk användning: kloramfenikol och klortetracyklin. Eftersom organiska klorföreningar normalt inte omsätts av organismer bryts de inte lätt ned. Sådana föreningar som uppstår genom olika mänskliga aktiviteter utgör därför en stor miljöfara när de sprids i naturen. Polyvinylklorid (PVC), freoner och klorerade kolväten är några exempel.

Trots sin starka giftighet är klor i reducerad form ett livsnödvärdigt grundämne och finns i växter och djur huvudsakligen som neutrala klorider eller som saltsyra. En människa på 70 kg innehåller ca 100 g klor i dessa former. Kloridjoner har i levande organismer betydelse i huvudsak som laddningsbärare, som "motjoner" till viktiga katjoner. Dessutom är kloridjoner nödvändiga för funktionen av



syrgasutvecklingssystemet vid fotosyntesen hos växterna. Somliga växter är känsliga för kloridöverskott, varför det framställs klorfria gödselmedel för sådana växter.

Klorhalten i morän är i hela området extremt förhöjd i relation till övriga riket. Endast ett fåtal prov i den sydligaste delen understiger medianhalten för riket (64 mg/kg), och i norr överstigs medianhalten mer än 20 gånger över relativt stora områden. Högst klorhalter återfinns i området mellan Kiruna, Övre Soppero och Kimujärvi. På grund av de extremt höga klorhalterna används lokal percentilindelning på kartan.

Statistiskt korrelerar klor bäst med kobolt, järn, magnesium, natrium, nickel och vanadin ($r > 0,6$). De allmänt höga klorhalterna beror sannolikt på den utbredda förekomsten av skapolit, ett mineral som i norra Sverige och Finland förekommer dels i anslutning till omvandlingar vid mineraliseringar, dels mer allmänt i de prekambrisk bergarterna. Skapolit är en produkt av plagioklasomvandling, ofta i basiska bergarter som gabbro, dioriter och diabaser vilka är rika på plagioklas och pyroxen. Klorhalten i skapoliten ligger generellt inom intervallet 1–4 % (Frietsch m.fl. 1997). Detta innebär att om den största mängden av klor i moränen härstammar från skapolit så kan den analyserade finfraktionen antas bestå av några procent skapolit i de prov där klorhalten överstiger 1 000 mg/kg. Höga klorhalter kan också knytas till natriumomvandlingar som yttrat sig i form av betydande spilitisering och albitisering av berggrunden.

I slutet av 1990-talet presenterades hypotesen om att den omfattande skapolititiserings som finns i vissa enheter av grönstensgruppens bergarter kan indikera idag försvunna evaporitlager. Den höga geotermiska gradienten som uppstod under den Svekokarelska orogenesisen (kopplad till magmatism,

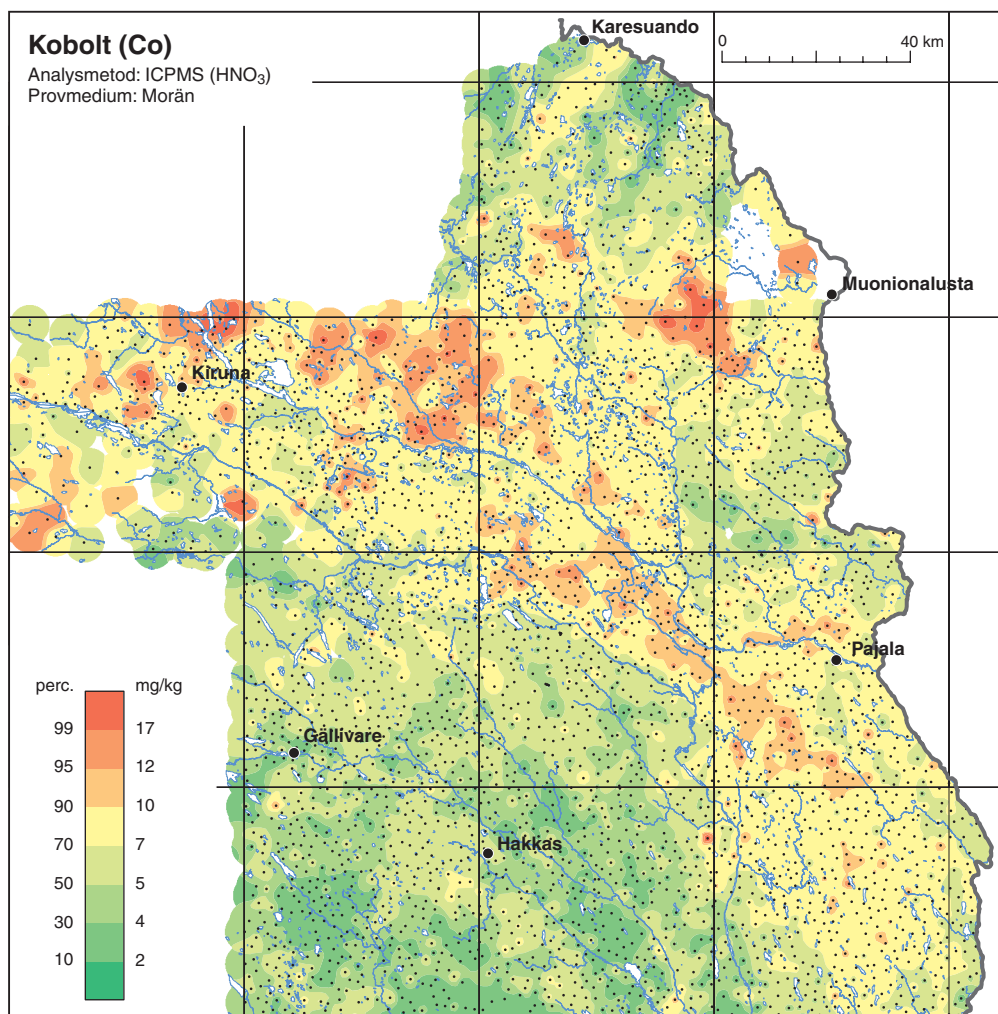
deformation och metamorfos) tros ha bidragit till upplösningen av dessa salthaltiga lager. För inte länge sedan uppdagades välbevarade evaporitsekvenser i Onegaområdet i ryska Karelen (Melezhik m.fl. 2005), vilket bekräftar hypotesen om att evaporitsönderdelning till stor del kan förklara den betydande natriumomvandlingen och den enorma kloranomalin i Norrbotten.

Ett annat mineral som innehåller klor är apatit. Kartbildens kloranomali, som sträcker sig från Kirunas järn-apatitområde diagonalt mot sydost, kan relateras till högt inslag av apatit i moränerna. Anomalins form kan kopplas till den äldre isrörelseriktningen från nordväst.

Kobolt (Co)

Kobolt förekommer i basiska bergarter som gabbro, amfibolit och diabas och kan uppträda med mycket höga halter i ultrabasiska bergarter. Graniter, pegmatiter, vulkaniter och en del gnejser har lägre innehåll av metallen. Mineralogiskt sett är den mest spridda förekomsten för kobolt mörka järn- och magnesiumsilikater, och metallen associeras därför ofta med järn och magnesium tillsammans med nickel. Kobolt kan även förekomma tillsammans med järn, koppar och nickel i sulfidform. Koboltglans (CoAsS) är det viktigaste malmmineralet. Vid vittring är rörligheten för kobolt tämligen låg, men under sura förhållanden är metallen mobil och kan bindas till järn- och manganoxider och till lermineral.

Kobolt finns i varierande halter i jordskorpan och räknas till de essentiella spårmetallerna. För gräsätande djur är kobolt i fri form nödvändig för syntesen av vitamin B₁₂ i tarmfloran. För människan är kobolt essentiell då den ingår i vitamin B₁₂. Kobolt används vid blodbrist hos gravida kvinnor då den



kan öka produktionen av röda blodkroppar. De största källorna till kobolt för människan är mat och dricksvatten. Alltför höga doser kan dock vara skadliga och påverka lungor och hjärta.

En viktig användning av kobolt är som legeringsämne i hårdmetall som t.ex. används inom flygindustrin och i malande och skärande verktyg. Inom sjukvård används kobolt som metall i implantat i höftleder och knän, men också som radioaktiv kobolt vid strålningsterapi för behandling av cancer. En annan användning är som torkmedel i svart tryckfärg, vilket kan medföra spridningsrisk av kobolt via pappersavfall. Man har även sett spridning av kobolt vid tillverkning av syntetiska diamanter samt vid förbränning av fossila bränslen.

I samband med industriell verktygstillverkning exponeras människan för kobolt. Allergi för krom, nickel och kobolt förekommer ofta samtidigt och står för ca 60 % av alla yrkesbetingade, allergiska eksem. Vid strålning med radioaktiv kobolt kan bieffekter uppträda, t.ex. sterilitet, håravfall, illamående, diarréer m.m.

Kobolthalterna är mest förhöjda i undersökningsområdets nordliga moräner. Området norr om linjen Vittangi–Kiruna omfattar flera stora koboltanomalier med avseende både på totalhalter och syralakbara halter. I regel innehåller morän belägen över eller i närheten av olika typer av basiska bergarter (intrusiva, vulkaniska eller metamorfa) mer än 13 mg/kg kobolt (syralakat). De basiska bergarter som återfinns i södra delen av kartområdet (t.ex. i Gällivaretrakten) ger inte alls upphov till lika höga halter. Om detta beror på ett lägre innehåll i själva bergarterna eller en starkare inblandning av t.ex. sura intrusivbergarter i moränen är oklart.

Det finns några koboltförekomster i det karterade området, bland annat Sierkavare (sydväst om Kiruna), Kiskamavaara och Paurankilantto (nordväst om Vittangi) och Louheankorvenmaa (5 km väster om Vittangi). De är alla mineraliseringar som följer kopparförekomster i vulkaniska bergarter. Höga kobolthalter i morän noteras runt alla förekomsterna, med de största anomalierna runt Kiskamavaara. Koboltanomalin i Louheankorvenmaas närhet finns norr om mineraliseringen och ansluter helt till isrörelseriktningen åt nordost.

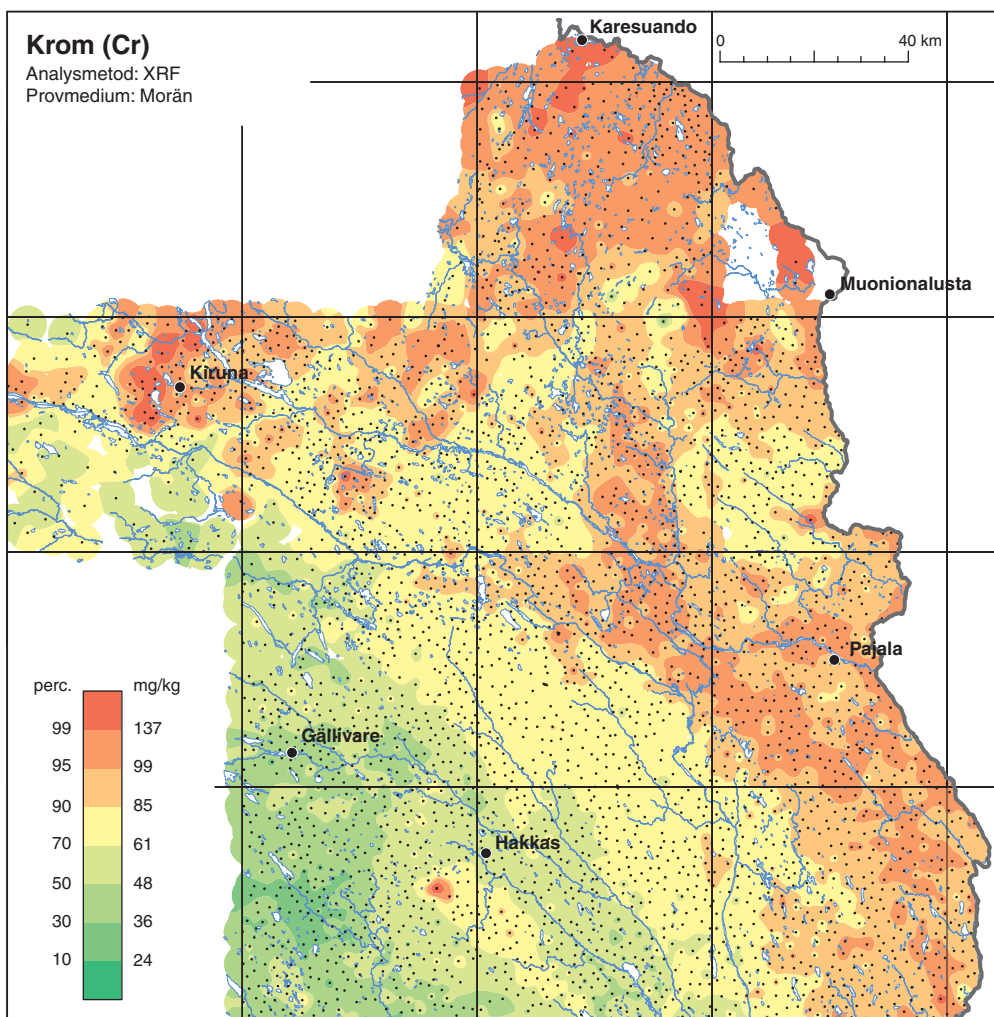
Kobolt ingår i en grupp element med sinsemellan starka eller relativt starka korrelationer (aluminium, barium, krom, koppar, järn, magnesium, mangan, nickel, titan och vanadin), vilket gäller oberoende av analysmetod. Elementen är typiska för mörka mineral och utgör en vanlig association vid morängeokemiska undersökningar. Korrelationen mellan totalhalter och syralakbara halter för kobolt är stark ($r=0,9$) och den procentuella lakbarheten ligger generellt mellan 20 och 50 %. Den senare gäller även för magnesium, vilket indikerar att framför allt magnesiumförande mineral är nära förknippade med kobolt. Negativa korrelationer finns med kiseldioxid och zirkonium, vilka är utmärkande för sura (kiselrika) bergarter.

Krom (Cr)

Krom kan förekomma med mycket höga halter i ultrabasiska bergarter men finns också i basiska bergarter som gabbro, amfibolit, och diabas. Sandstenar kan innehålla en del krom medan granitiska bergarter har lågt innehåll av metallen. Krom uppträder i mineral som pyroxen, amfibol och glimmer, men också i svårvittrade mineral som ilmenit och magnetit. Krom är vida spritt men är relativt sällan koncentrerat till brytvärda förekomster. Metallen förekommer inte i gedigen form. Det viktigaste mineralet är kromit (FeCr_2O_4). Vid vittring binds elementet lätt till järn- och manganoxider och till lermineral. Generellt har krom liknande geokemiska egenskaper som järn och aluminium.

Krom förekommer också som spårelement i järn- och manganoxider och -hydroxider och deras halter kan påverkas av närvaro av organiskt material. Krom bygger föreningar med organiska ämnen. Giftigt och lättlösligt fyrvärt krom kan reduceras av organiskt material till mer stabilt trevärt krom.

Krom förekommer i flera olika oxidationstal. De sexvärda föreningarna är de mest giftiga. Mobiliteten hos krom är ganska låg, men beror på med vilket oxidationstal (vanligaste är två-, tre- och sexvärt krom) metallen uppträder. Trevärt krom är svårslösligt i vatten med pH runt 7 och kromkoncentra-

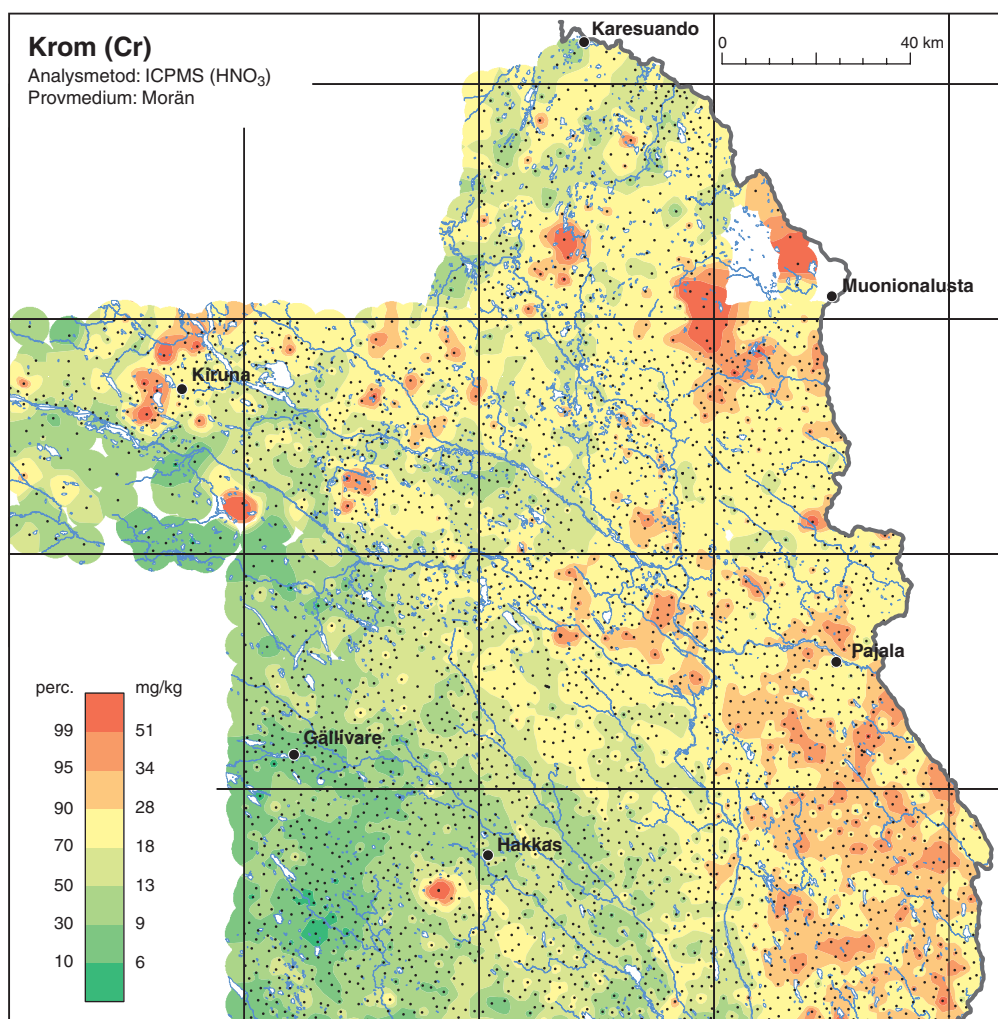


tionen i naturliga vatten är låg. Sexvärt krom är mer mobilt än trevärt. Normalt finns små mängder krom i dricksvatten och föda.

Rent krom används för framställning av legeringar baserade på nickel, molybden, niob, kobolt, wolfram, koppar och aluminium. Krom ingår i koboltbaserade legeringar för användning inom medicin och tandvård. Omkring 17 % av kromproduktionen används för framställning av kemiska föreningar innehållande krom. Dessa utnyttjas t.ex. för ytbehandling (förokromning, kromatering), textilfärgning, kromgarvning, träimpregnering samt för framställning av färgpigment, bläck och katalysatorer.

Hos människor och djur medverkar krom till omsättningen av blodsocker, kolhydratomsättning och cellernas insulinkänslighet. Krom reducerar blodfetterna och kontrollerar kolesterolhalten i blodet. Brist på krom är ovanlig. Symtom kan vara minskad insulinkänslighet (sämre utnyttjande av blodsockret), ändrad fettomsättning (sämre proteinsyntes) samt trötthet, nervösa besvär, koncentrations-svårigheter och ögonproblem.

I undersökningsområdets morän är halterna av krom förhöjda, liksom för många andra element typiska för basiska bergarter (basiska vulkaniter och djupbergarter). Detta framgår tydligt av höga totalhalter, speciellt i de norra och östra delarna av kartområdet. Kraftigt förhöjda halter av krom påträffas i en cirka 25 km lång zon som löper i nord-sydlig riktning strax väster om Kiruna. Inom denna zon återfinns de fyra högsta krom- och nickelhalterna varav den maximala totalhalten av krom uppgår till 455 mg/kg, vilket är sju gånger högre än medianhalten. Också salpetersyralakbara prov uppvisar höga halter i samma zon med anomala trender som sträcker sig nordväst-sydost genom det karterade området. De höga halterna följer förekomster av proterozoiska basiska och ultrabasiska bergarter.



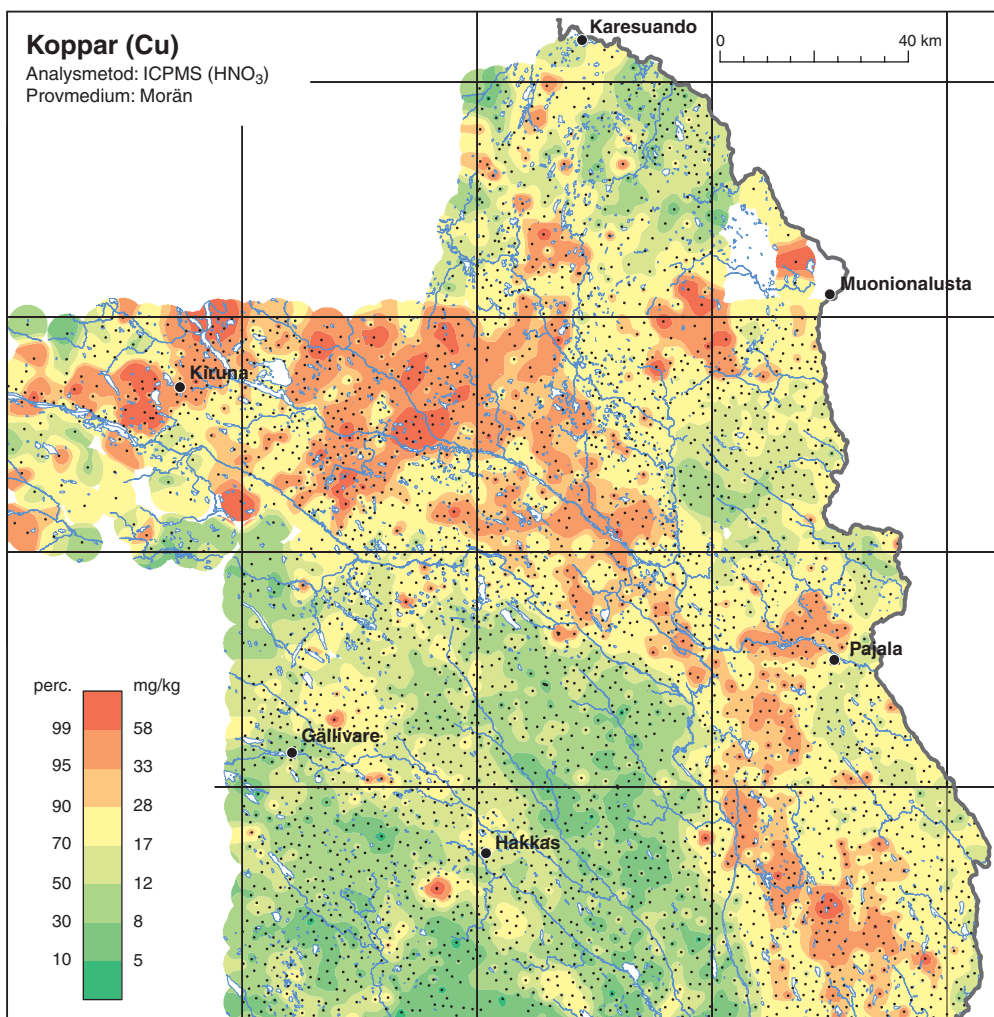
I södra delen av kartområdet korrelerar moränens förhöjda kromhalter väl med gabbroförekomster som är rika på magnesiumsilikater som t.ex. olivin (Purnu-Puolalaki). Även vid Svappavaara och ca 30 km västerut uppträder mindre anomalier där krom- och nickelhalterna är förhöjda och dessa kan kopplas till järn-kopparmineraliseringar i basiska bergarter.

Krom korrelerar starkt med koppar, magnesium, nickel och vanadin (element typiska för basiska mineral) vilket gäller oberoende av analysmetod. Korrelationen mellan totalhalter och syralakbara halter av krom är stark, vilket innebär att ursprunget till krom kommer från mineral som bygger upp basiska bergarter. De flesta är magnesium- och järnförande mineral. Krom och magnesium följer varandra, men den procentuella lakbarheten är lägre för krom än för magnesium.

Detta tolkas som att krominnehållet i moränerna beror på både förekomsten av lättlakade magnesiummineral (salpetersyralakad krom) och förekomsten av mer svårlakade kromförande mineral (totalhalter av krom). Som resultat fås att krom transporteras från lättvittrade basiska bergarter till lerpartiklar i morän, vilket leder till att dessa moräner får ytterligare förhöjd kromhalt.

Koppar (Cu)

Koppar förekommer som spårelement främst i basiska bergarter och i lägre grad i skifferar även om skifferar med högt organiskt innehåll (alunskiffer) kan ha betydande kopparhalter. Granitiska bergarter och sandstenar har normalt lågt kopparinnehåll. Koppar ingår i små kvantiteter i mineral som pyroxen, amfibol, magnetit och biotit. Elementet uppträder i såväl sulfider som karbonater och hydroxider och sällsynt även som elementärt koppar. Gedigen koppar förekommer i klumpar och ådror. Den brukar



också innehålla små mängder silver, vismut och bly. I förening med svavel förekommer koppar ofta. De vanligaste malmmineralen är kopparkis (CuFeS_2), bornit (Cu_5FeS_4), kopparglans (Cu_2S) och covellin (CuS). Koppar ingår i olika typer av mineraliseringar tillsammans med guld, silver, kobolt, nickel, bly och zink. Koppar är inte en särskilt mobil metall, och väl i lösning binds den ofta till olika organiska och organiska föreningar.

Befolkningen exponeras för koppar huvudsakligen med dricksvattnet. Vanligt är att dricksvattnet kontamineras med koppar från vattenledningar och varmvattenberedare. Vid sänkning av pH ökar urlakningen av koppar från ledningarna. Även vissa hårda vatten är aggressiva mot vattenledningarna.

Koppar är en essentiell metall för människan. Av det normala kopparintaget med födan absorberas 30 %. Efter absorptionen binds det mesta till ett protein. Utsöndringen sker nästan helt med gallan till avföringen.

Koppar finns normalt i både växt- och djurorganismer men dess fysiologiska funktion är i många fall inte helt känd. Man vet att koppar är nödvändig för järnomsättningen för människor och djur och för produktionen av melanin. Hos hästar är det väl känt att kopparbrist ger en blekning av färgen – t.ex. blir svarta hästar grådaskiga och rödbruna blir blekgula. Om kopparinnehållet i marken är lågt kan upptaget vara lågt och hämmas ytterligare om det finns överskott av en del andra metaller, bland annat zink. Teorier om Älvsborgssjukan hos älgar visar att kopparbrist i kombination med krombrist kan ha orsakats genom kalkning av älgaras miljö.

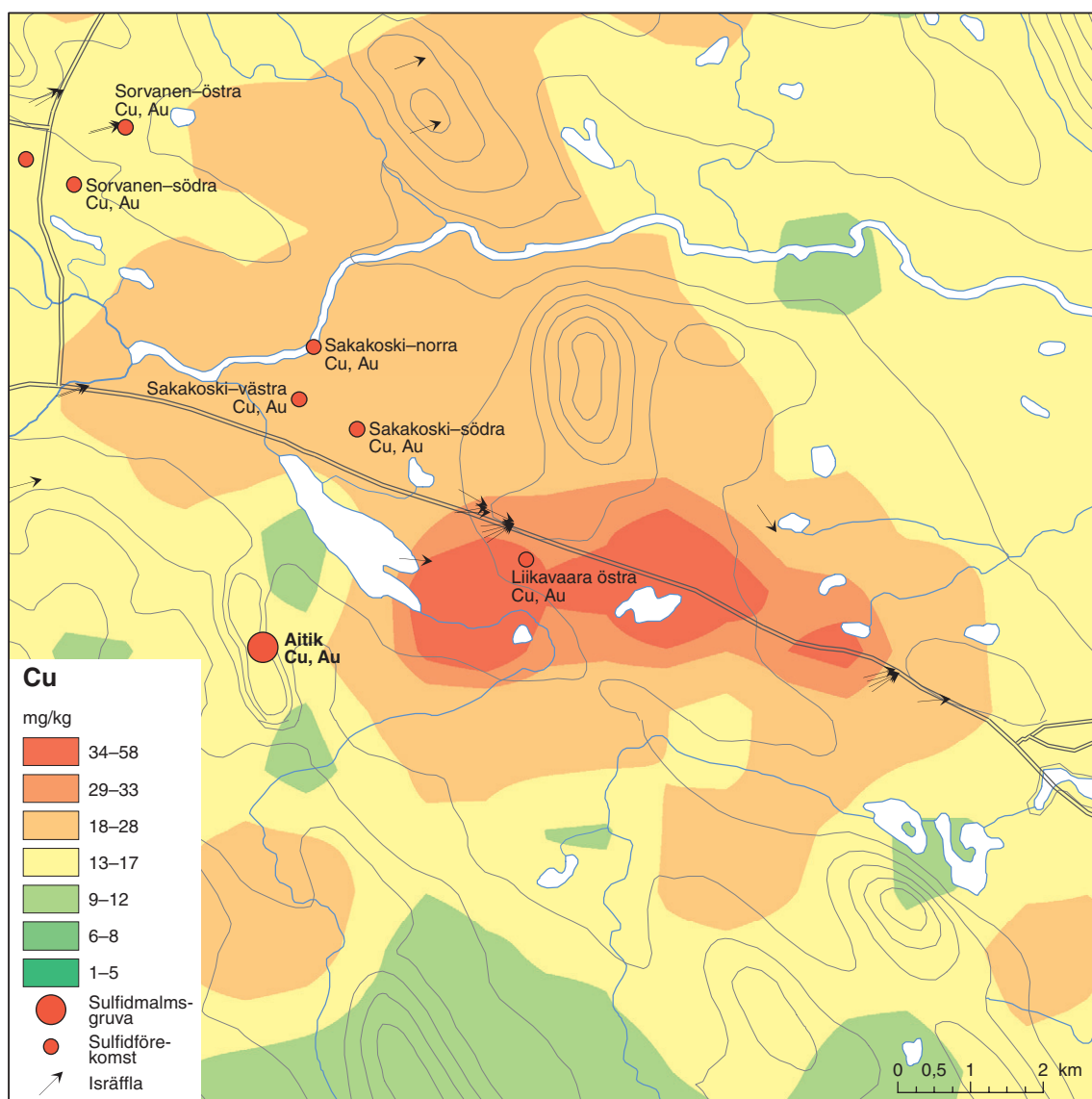
Undersökningsområdets högsta kopparhalter hittas i ett bälte av morän som löper i nordväst–sydöstlig riktning. Stora fält med förhöjda halter finns i området mellan Kiruna och Vittangi. Förhöjda

kopparhalter i morän uppmärksammas även strax väster om Pajala samt i Muonionalusta och Pessinki. Området mellan Tarendö och Svanstein kännetecknas också av förhöjda halter av koppar.

Medianvärdet för såväl totalhalten (21 mg/kg) som för syralakbart koppar (17 mg/kg) är högre än i riket i övrigt. Lakbarheten är också väldigt hög (83 %). Områdets högsta kopparhalt påträffas vid Kivijärvi. Det finns inga kända mineraliseringar i närheten av denna provtagningslokal. I allmänhet kan en svag relation mellan sulfidmineraliseringar och förhöjda kopparhalter i morän konstateras.

Aitik utgör Sveriges största kopparmineralisering och är en av Europas största kopparproducenter. Förekomsten har ett otvivelaktigt hydrotermalt ursprung och är genetiskt kopplad till mindre porfyrisk intrusioner av intermediär sammansättning. Förekomsten betraktas som en metamorfoserad ekvivalent av porfyrokopparmalm (Yngström m.fl. 1986, Monro 1988, Wanhainen m.fl. 2003, 2006). Den kopparanomali som återfinns i Aitik's moränområde är belägen österut, i rådande isrörelseriktning (fig. 17).

I korrelationsanalysen är koppar positivt associerad med kobolt, krom, järn, magnesium, nickel och vanadin. Alla dessa element är vanliga bland basiska och ultrabasiska bergarter.



Figur 17. Kopparanomali i morän i Aitikområdet (7M HNO₃/ICP MS).

Figure 17. Copper anomaly in till in the Aitik area (7M HNO₃/ICP MS).

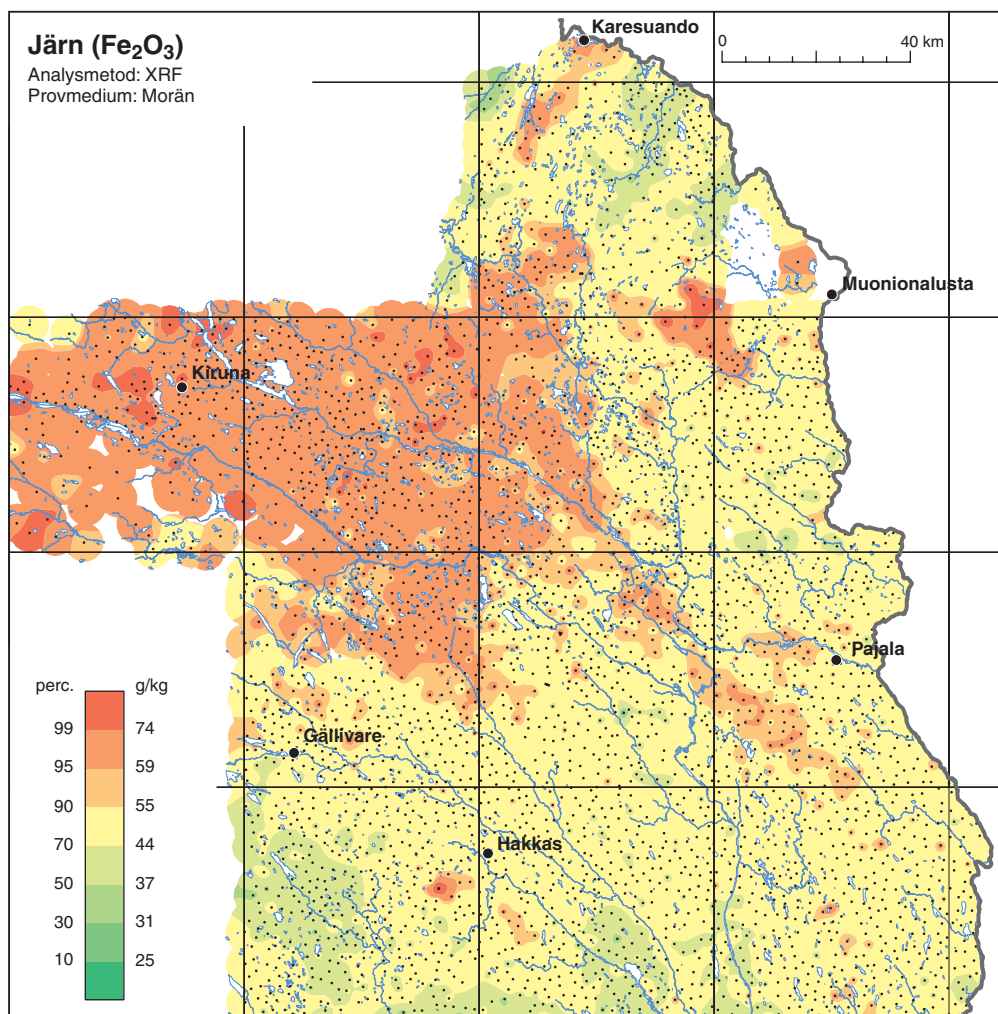
Järn (Fe)

I Sveriges berggrund och jordarter uppträder järn i de mörka bergartsbildande mineralen som silikat, t.ex. i amfiboler, pyroxener, biotit, olivin, epidot, cordierit, granat och klorit. Järn ingår även i sulfidmineral, t.ex. arsenikkis, kopparkis och pyrit (svavelkis), och i oxider, t.ex. järnmalmsmineralen magnetit, hematit och limonit. De högsta koncentrationerna i bergarter återfinns i ultrabasiska och basiska bergarter samt skiffrar medan järninnehållet är lågt i kalkstenar, sandstenar och graniter.

I markprocesser och vid vittring bildas olika komplexa järnföreningar där metallen sitter mer eller mindre löst bunden, och vid sådana järnoxider och -hydroxider kan adsorption ske av ett flertal andra lösta metaller. När olika järnföreningar vittrar i en markprofils sura, översta lager (blekjorden), förs metallen med nedåttransporterande markvatten och fastläggs åter vid ökande pH och Eh i underliggande markhorisont (rostjorden). Tillgängligheten av järn styrs av pH- och Eh-förhållanden och under sura och reducerande förhållanden har markvattnet högt innehåll av lösta Fe^{2+} -joner. Även element som adsorberats till järnföreningar mobiliseras, exempelvis arsenik, barium, kobolt, krom, koppar, nickel och zink. Järn är med andra ord en mycket viktig metall eftersom den styr geokemin för flera andra element.

Järn är essentiellt för alla organismer. Det sörjer för ett stabilt blodvärde och är nödvändigt för funktionerna hos kroppens organ. Halter högre än 200 mg/l i dricksvatten är giftiga för människor. Överskott av järn lagras i lever och mjälte, men kan ge förgiftningsskador. Det är vanligt med järnbrist på många ställen, men sällsynt i Sverige vid normalt födointag.

I ett europeiskt perspektiv har Sverige ganska lågt innehåll av järn i morän (Salminen m.fl. 2005), beroende på dominansen av sura magmatiska bergarter och relativt sett unga och ovittrade jordar, där

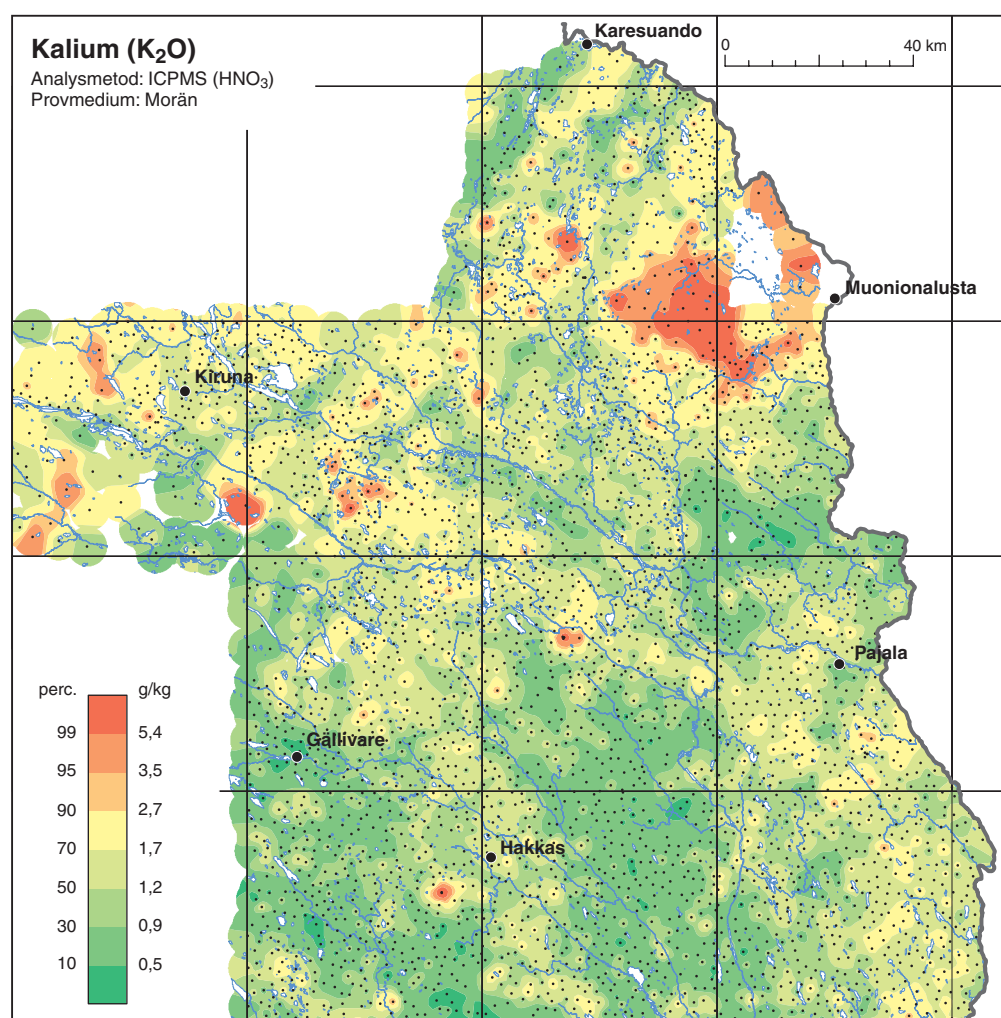


järn binds i de övre delarna i en podsolprofil. Däremot har åkermark i Mälardalen höga halter vilka precis som för aluminium relateras till högt innehåll av järnföreningar i lerorna (Reimann m.fl. 2003). Medelstora vattendrag har, förutom i fjällranden, högt innehåll av järn. Orsaken är, som nämnts ovan, sura och reducerande förhållanden.

De högsta totalhalterna av järn i morän hittas främst i områdena kring Kiruna, Malmberget, Svappavaara, Vittangi, Saarivaara, Pessinki och Muonionalusta. Fläckvisa positiva anomalier uppträder även i linjen mellan Junosuando, Tärendö och Kimujärvi, samt i området mellan Lannavaara och Iso Hämheenvaara. Anomalierna återspeglar i allra högsta grad järnmineraliseringarna. Totalhaltens medianvärde är något högre i undersökningsområdet (50 g/kg) jämfört med rikets (37 g/kg). Även den syralakade medianhalten (18 g/kg) är något högre. Lakbarheten är sålunda 33 %. Totalhalten av järn i morän korrelerar positivt med klor, kobolt, krom, koppar, magnesium, mangan, nickel och vanadin. Syralakat järn korrelerar starkt med aluminium, krom, magnesium, titan, tallium och vanadin, samt i något mindre grad med barium, beryllium, kobolt, koppar, kalium, lantan, litium, nickel, mangan, rubidium, titan och zink. Elementmönstret av syralakat järn ger en annorlunda kartbild jämfört med totalhalten. Kraftiga anomalier återfinns för syralakat järn i områdena kring Korpilombolo och Pessinki.

Magnetit (Fe_3O_4) och hematit (Fe_2O_3) utgör de vanligaste järnhaltiga malmmineral som finns i området. De förekommer tillsammans i många av mineraliseringarna. De största järnmalmsförekomsterna i undersökningsområdet är Kirunavaara och Malmberget, i vilka malmutvinning pågår. Höga järnhalter korresponderar med magnetfältsanomalier i området, speciellt i de nordöstra och östra delarna.

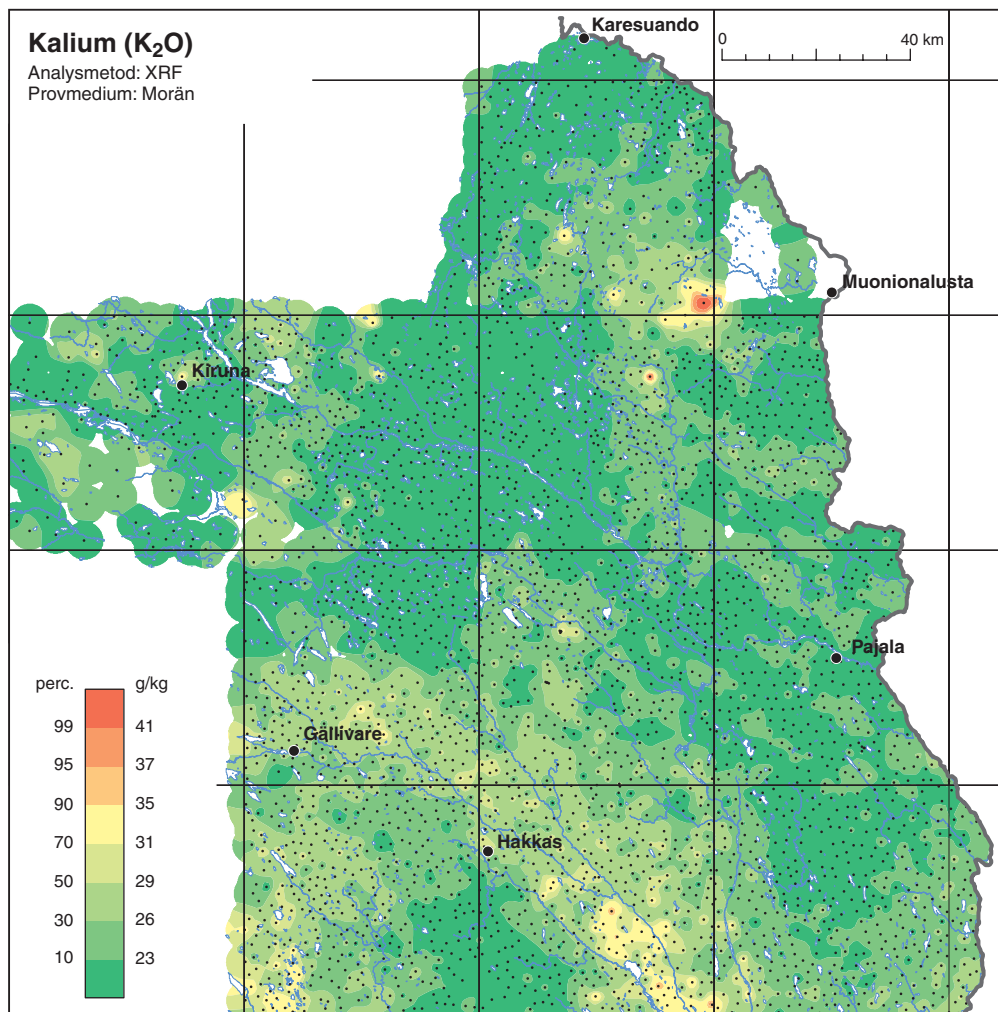
Kalium (K)



Kalium är en huvudbeståndsdel i ett flertal bergarter, framför allt i kiselrika varianter som graniter och pegmatiter. Även en del gnejser har ofta höga kaliumhalter. I Sverige uppträder kalium nästan uteslutande i fältspater (mikroklin och ortoklas) och kaliumförande glimrar (muskovit och biotit). Generellt sett är det främst i svårslösliga mineral som kalium ingår. Lättlösligt kalium förekommer dock frekvent i biotit. Geokemiskt är kalium associerat med rubidium och barium och särskilt rubidium kan ofta ersätta kalium i mineralens kristallgitter. Vid vittring har kalium en benägenhet att bindas till lermineral.

Kalium är ett essentiellt ämne för allt levande. För människor är ämnet nödvändigt för alla levande celler i kroppen, för nervsystem och muskelfunktion. Brist på kalium är inte särskilt vanlig, men kan bland annat uppstå vid sjukdomstillstånd med långvariga diarreer, njurproblem och anorexi. Överskott på kalium utsöndras med urinen. Kalium är antagonist till cesium, vilket gör att man kan ge betande djur ett kaliumtillskott för att minska cesiumupptaget efter radioaktivt nedfall.

På kartbilder av kaliumhalter i morän framgår att det finns markanta skillnader beroende på om totalhalt eller syralakbar halt beaktas. Korrelationen mellan de båda analysmetoderna saknas i stort sett. Kaliums procentuella lakbarhet är också låg vilket innebär att totalhalternas mönster domineras av förekomsten av svårakade fältspater. Förklaringen till detta är att syralakningen är starkt selektiv och att kalifältspat har starkt begränsad förmåga att lösas av salpetersyra. Lakningen av andra mineral (t.ex. biotit och lermineral) är istället mycket effektiv och en kartbild avslöjar därmed områden där huvudelementet är mer lättillgängligt.



Totalhalterna av kalium i undersökningsområdets morän är generellt låga. Endast ett par större områden med förhöjda halter uppträder i granitområdenas moräner i den södra respektive nordöstra delen av kartområdet. I motsats till detta visar kartan baserad på syralakning förhöjda halter i framför allt den norra delen och mellan Gällivare och Vittangi. Kalium i lättlöslig form i moränerna återfinns även i nordost, norr om Parkalompolo.

En tydlig gräns finns i kartområdet 29L Lainio mellan moräner med låg totalhalt kalium väster om samt högre halter öster om Lainiobågens norra delar. Väster om denna deglaciationslinje är totalhalterna mycket låga. Sannolikt har området med bland annat veikimorän rikligt inslag av transporterat bergartsmaterial från nordväst, med litet inslag av kalifältspat men desto större av lättlösliga mineral från basiska bergarter, inkluderande omvandlingsmineral från såväl prekvartära som kvartära processer.

Totalhalterna av kalium i moränen korrelerar med totalhalterna av barium och rubidium och i viss mån med zirkonium och salpetersyralakat tenn och yttrium, alla typiska för granitiskt bergartsmaterial. Generellt uppträder kalium härlett till fältspater i samma områden där också förhöjda zirkoniumhalter finns i moränen. Salpetersyralakade kaliumhalter korrelerar mycket starkt ($r = 0,9$) med syralakat rubidium men även med syralakade halter av aluminium, barium, krom, järn, litium, magnesium, mangan, nickel, titan, tallium och zink. Med faktoranalys placerar sig totalhalterna av kalium, barium, aluminium och strontium i en grupp vilket sannolikt kan härledas till hydrotermal omvandling av bergarter.

Lantan (La)

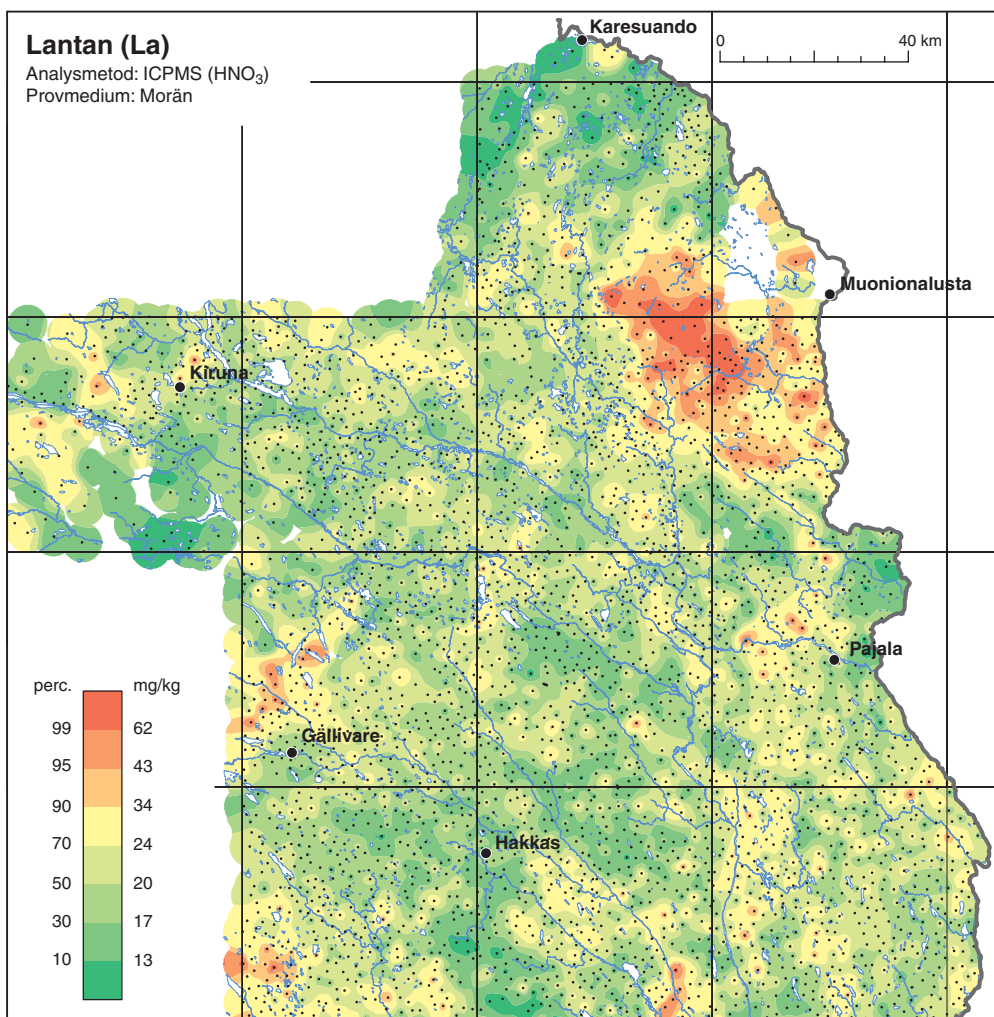
Lantan tillhör de s.k. sällsynta jordartsmetallerna (REE = rare earth elements) och uppträder framför allt i granitiska bergarter och då ofta i mineralet monazit, $(\text{Ce,La,Nd,Th})\text{PO}_4$, som är tämligen vitt-ringsresistent. Lantan är dock inte något sällsynt grundämne i jordskorpan, det är exempelvis betydligt vanligare än bly. Skiffrar kan ha höga halter av lantan, men i basiska bergarter och kalkstenar är innehållet betydligt lägre. Lantan finns i naturen alltid som jonen La^{3+} . Metallen förekommer ofta tillsammans med torium, yttrium, uran, beryllium och ett flertal sällsynta grundämnen, ofta anrikade i t.ex. pegmatiter. Som för de flesta lantanider är monazit (LnPO_4), bastnäsit (LnCO_3F) och cerit (ett lantanidsilikat) de viktigaste mineralen. Elementet lantan kan också ingå i allanit, fältspater, zirkon, hornblände, biotit och apatit. Exempelvis innehåller apatitjärnmalmerna i Kiruna, Malmberget och Grängesberg sällsynta jordartsmetaller. Metallen har låg mobilitet och blir vid vittring åter fastlagd antingen genom att fällas ut som karbonater och hydroxider, eller så adsorberas metalljonen till järnoxider och lermineral. Rörligheten för lantan är därmed ganska låg.

Lantan, liksom andra sällsynta jordartsmetaller, har en mångfald olika användningsområden. Bland annat används lantan som metallurgiskt legeringsämne. Det används också inom keramisk industri och glasindustri. Lantan ingår i gas- och cigarettändare, i katalysatorer, batterier och supraleddare.

Lantan räknas som ett icke essentiellt ämne, men alltför lite är känt om eventuella hälsoeffekter avseende lantan och sällsynta jordartsmetaller. Man vet dock att en del trädslag (t.ex. hickory) ackumulerar lantan.

Kartområdets medianhalt av lantan lakat med salpetersyra är jämförbar med landet i övrigt. Förhöjda halter i morän förekommer över hela kartområdet och kan kopplas till sura bergarter. Högst halter, upp till tio gånger medianvärdet, återfinns norr och nordväst om Parkalompolo i en uthållig lantanförhöjning i moräner med underliggande graniter, pegmatiter och granodioriter (Parkajoki-serien). Även mindre områden med förhöjda halter finns norr om Gällivare, norr och väster om Kiruna och i sydvästra hörnet av kartområdet. Dessa sammanfaller med graniter och pegmatiter.

Endast syralakade halter har analyserats för metallen, vilket sannolikt innebär att lantans geokemiska mönster i kartområdet främst knyts till bergartsbildande, relativt lättlösliga mineral. Det är också med syralakade halter av aluminium, barium, järn, kalium, magnesium, mangan m.fl. som lantan korrelerar, vilket antyder att biotiter, pyroxener och lermineral är värdmineral för metallen. Lantan korrelerar måttligt med bland annat beryllium, litium, rubidium, yttrium, torium och zink, vilket är



en association som är vanlig i pegmatiter. Ingen korrelation finns däremot med fosfor, en förväntad elementassociation i monazit och apatit.

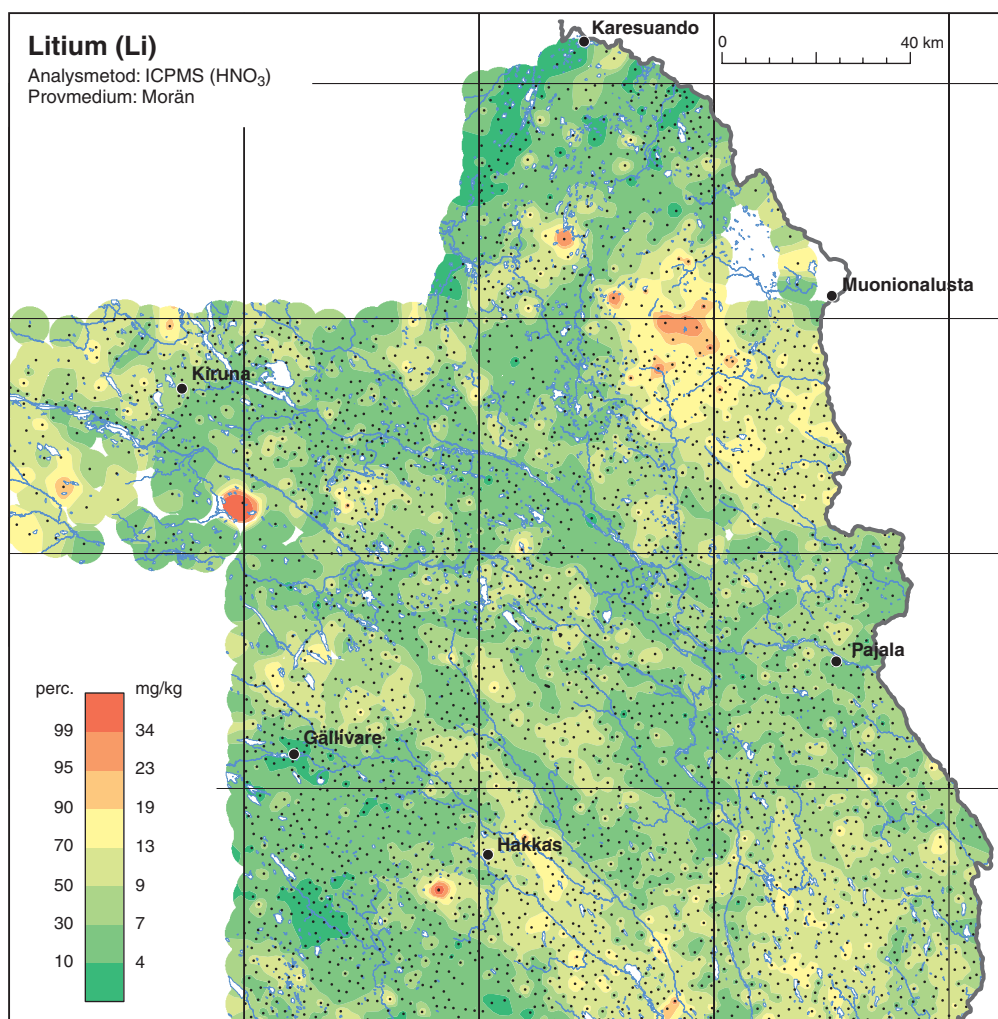
Litium (Li)

Litium är en alkalimetall som förekommer som spårämne i ett flertal mineral, exempelvis amfibol, pyroxen, turmalin och glimmer. Litiummineral som spodumen, petalit och lepidolit förekommer, men det är troligen glimmermineralet biotit som är det mest utbredda värdmineralet för litium. Metallen förekommer framför allt i pegmatiter, graniter och skifferar, medan basiska bergarter och sandsten har betydligt lägre innehåll. Vid vittring adsorberas litium lätt till lermineral och manganoxider.

Användningsområden för litium är bland annat i glasindustri och keramisk industri, som smörjmedel, i batterier, som legeringsmetall och i syntetiskt gummi. Litium har även medicinsk tillämpning.

Spårämnet litium anses numera som viktigt i människokroppen och brist kan eventuellt ge ökad benägenhet för magsår, mentala problem, artros, reumatism och hjärt- och kärlsjukdomar. Överdoser ger hämmad ämnesomsättning med trötthet, svullnader, viktökning, låg puls och lågt blodtryck som följd. Tack vare vårt relativt litiumfattiga dricksvatten (Rosborg m.fl. 2003) är överdoseringar i Sverige ovanliga. Litium har en reglerande inverkan på kalium-natriumbalansen, men dess funktion i övrigt är knapphändigt utforskad. I psykiatri används litium (i stora giftiga doser) för behandling av bipolära sjukdomar.

Medianhalten för syralakat litium i undersökningsområdets moräner är lägre än för landet i övrigt. Måttligt förhöjda litiumhalter i morän uppträder i stort sett i hela kartområdet, t.ex. norr och väster

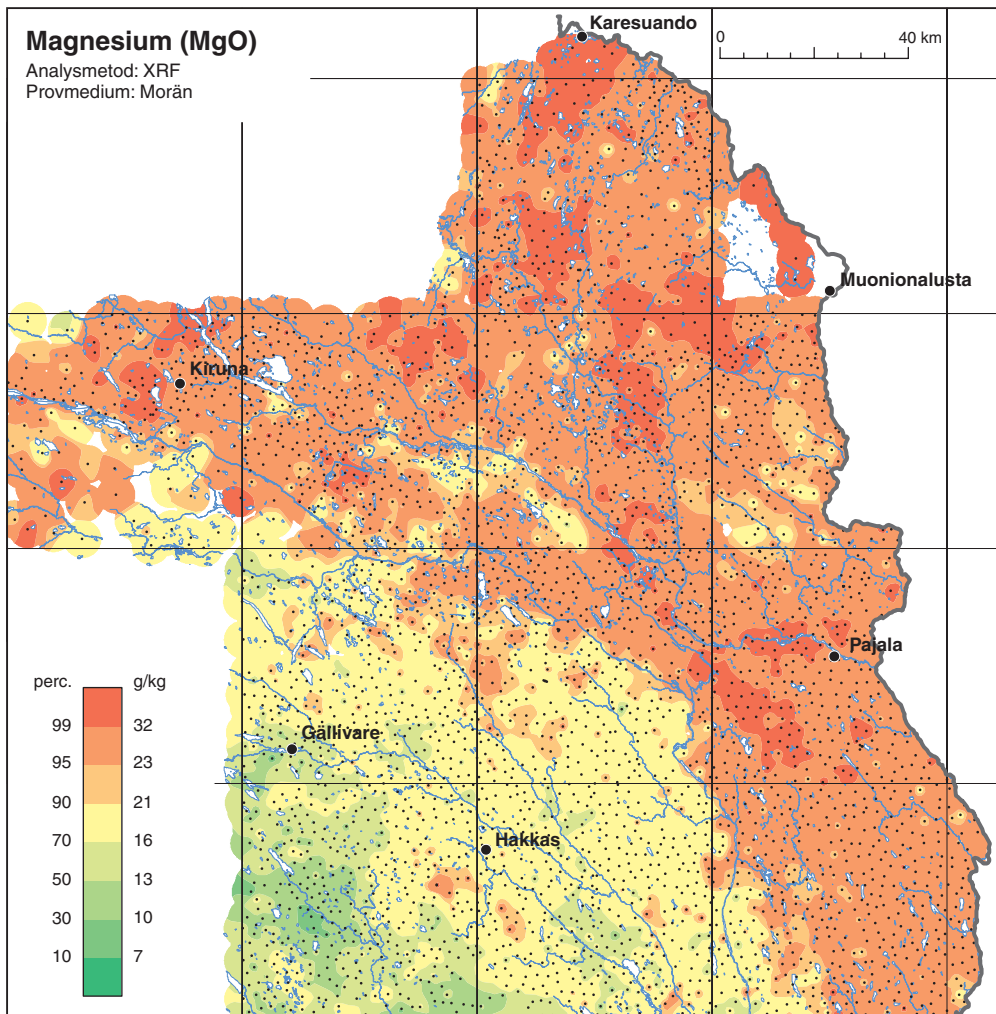


om Kiruna, norr om Gällivare, runt Lansjärv, i sydost och i nordost. Högst litiumhalt (54 ppm) återfinns nordost om Nattavaara, i moränområdet vid Purnu-Poulalaki. Positiva anomalier finns även i Saivoområdet sydost om Kiruna och öster om Soppero. Lakbarheten anses normalt vara relativt hög för litium, åtminstone med kungsvatten (ca 70 %, Koljonen 1992). Litium förekommer därmed främst i relativt lättlösliga mineral. Litium korrelerar med ett stort antal element: aluminium, barium, järn, magnesium, beryllium, tallium, vanadin, rubidium, kalium, zink och titan. Elementassociationen antyder litiums närvaro i flertalet bergartsbildande mineral, bland dem biotit och lermineral.

Magnesium (Mg)

Huvudelementet magnesium förekommer i basiska och ultrabasiska bergarter i högre halter än i de flesta andra bergarter, och normalt tillsammans med element såsom järn, krom, nickel m.fl. Mineralogiskt uppträder magnesium ofta tillsammans med järn i olika silikater, oxider m.m., men även ensamt i t.ex. karbonater (dolomit). I morän visar analyser av såväl totalt som syralakbart magnesium oftast en association med järn, aluminium, barium, vanadin, nickel, kobolt, koppar och krom. Vid syralakning ingår dessutom mangan, titan och rubidium. Associationen till mafiska element förstärks av en negativ korrelation till totalhalter av kisel och framför allt zirkonium.

Den övervägande delen av magnesium som finns i urberget uppträder i form av magnesiumsilikater såsom olivin, serpentin, enstatit, granater, talk, asbest, flogopit och biotit. Många ingår i pyroxen- och amfibolgrupperna. Dessa mineral karaktäriseras av varierande proportioner magnesium och järn men även kalcium är associerat med bildningsmiljön. I detta fall ger just järnet upphov till den mörka färgen



hos mineralen. Generellt kan sägas att basiska bergarter oftast uppvisar förhöjda magnesiumhalter i jämförelse med vanliga gnejser och graniter. Bergarter som gabbro, hyperit, diorit, diabas, basalt och amfibolit (metabasit) är magnesiumförande. I urberget förekommer sporadiskt förhöjda halter av magnesium i kristallina karbonater (magnesit, mycket sällsynt i Sverige) och dolomitstenar (dolomitmarmor) i anslutning till våra malmprovinser. I anslutning till viss malmbildning har magnesiumhaltiga lösningar påverkat omgivande berggrund och bidragit till omvandling genom magnesiummetasomatos av mineral varvid specifika magnesiumhaltiga mineral bildats. Sådana mineral omtalas vanligen som skarnmineral. Magnesium finns till största delen i mineral som vittrar lätt och löses därför lätt ut. Elementet kan ersätta järn och kalcium och lösta magnesiumjoner binds lätt till lermineral.

Elementet magnesium ingår i klorofyll, det gröna växtämnet i växter. Det är därför nödvändigt för alla gröna växter. Magnesium samverkar med kalcium och fosfor och 60–70 % av kroppens magnesium finns i skelettet. Magnesium aktiverar enzymer och är nödvändigt för cellandningen och viktigt vid hårt muskellarbete. En del magnesium förloras vid stark svettning. I vissa fall kan underskott av magnesium förekomma hos djur och människor.

Magnesiumhalten inom karteringsområdets moräner är högre än för övriga riket, vilket gäller såväl för lakbar halt som för totalhalt. I undersökningsområdet är framför allt totalhalterna markant förhöjda i den norra delen, där stora ytor upptas av basiska intrusiv- och ytbergarter. Kartbilden av magnesium liknar den för aluminium med höga halter i nordöstra och östra delen och lägre halter i sydvästra delen.

Syralakbart magnesium uppvisar ett starkt likartat mönster, men på grund av att halterna relativt riket i övrigt inte är lika höga som totalhalterna blir den procentuella lakbarheten ganska låg (ca 27 %), i jäm-

förelse med t.ex. Västerbotten. I genomsnitt lakas mindre än 40 % av magnesium vid syralakning (SGUs databas, beräkning baserad på 22 400 prov). Korrelationen för salpetersyralakade magnesiumhalter är god ($r > 0,7$) med huvudelementen aluminium, titan, mangan och järn, vilket visar på en likartad mineralogi.

I nordöstra och östra delen av kartområdet har förhöjda magnesiumhalter sitt ursprung i paleoproterozoiska basiska bergarter, till exempel gabbro, diorit, granodiorit och omvandlade typer av dessa, exempelvis amfiboliter. Huvudkälla till höga magnesiumhalter (samt nickel, krom, koppar, vanadin och aluminium) är således moränens innehåll av basiska bergarter. Eftersom mörka, magnesiumrika mineral vittrar ganska snabbt, bildas sekundära magnesium-aluminiumsilikater som ingår i argilliter. Detta ökar moränens magnesiuminnehåll.

I SGUs mineralfyndighetsdatabas finns sju magnesiumsilikatfyndigheter i kartområdet, varav två i den södra delen och fem i den norra. Dessa sammanfaller tydligt med förhöjda halter av magnesium i moränen, även om halterna för de södra fyndigheterna (Iso Sormus och Dundret) är mer blygsamma än för de norra. Moränens ökade magnesiuminnehåll kan i detalj studeras sydväst om Kiruna, där prov söder om magnesiumfyndigheterna Ailatisvaara och Pitkäjärvi innehåller mer än 5 g/kg. Norr om fyndigheterna, dvs. nedströms i den dominerande isrörelseriktningen, ligger halterna högre än 10 g/kg. Fyndigheterna som sådana bidrar sannolikt endast till en mindre del till de ökade halterna, det är istället berggrunden i fyndigheternas närhet som är lokalt magnesiumrik.

Mangan (Mn)

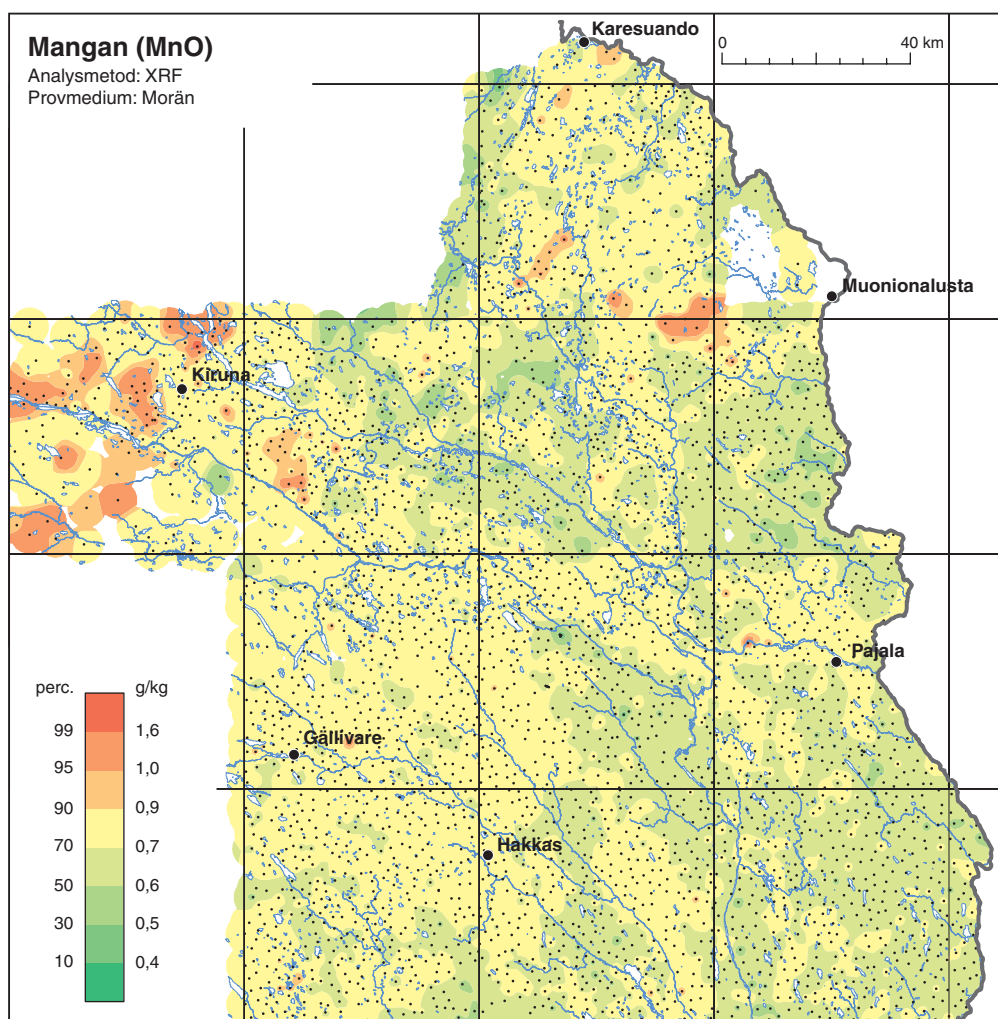
De högsta manganhalterna förekommer i basiska och ultrabasiska bergarter samt i skifferar och kalksten. Innehållet i graniter och sandstenar är betydligt lägre. Mangan kan uppträda i ett flertal bergartsbildande mineral, t.ex. pyroxener, amfiboler, glimrar, olivin, granat, calcit och dolomit, och kan ersätta bl.a. järn i kristallgittren. De ekonomiskt viktigaste manganmineralen utgörs av olika typer av oxider (hausmannit, pyrolusit), oxidhydroxider (manganit, psilomelan) och silikater (braunit). Mycket stora mängder mangan finns på djuphavsbottenarna i form av konkretioner eller s.k. mangannoduler. Ett flertal manganmineral är kända, t.ex. pyrolusit (MnO_2), och ekonomiskt brytvärda halter av metallen kan finnas tillsammans med järn och titan. Mangan ingår i många lättvittrade mineral, går lätt i lösning och bildar nya sekundära föreningar varav en del har förmåga att binda ett flertal andra metaller till sig. Det är välkänt från internationella geokemiska undersökningar att en kartbild över manganhalter ofta ter sig rörig på grund av att kartbilden reflekterar också sekundära processer i manganets spridningsmönster (Reimann m.fl. 2003).

Mangan är ett viktigt spårelement i levande organismer. Mest känd är dess roll i fotosyntesen. Mangan upptas av växterna i form av tvåvärt mangan. Denna form oxideras lättare ju mer basisk miljön är. På basiska jordar visar därför växterna tecken på manganbrist (ofta grå eller ljusa fläckar på bladen) vid långt högre manganhalt än på surare jordar. Manganupptaget hos betande djur är ganska lågt, men det är bete på sura jordar som ger det högsta upptaget. Kroppens innehåll av mangan är mycket litet, men nödvändigt för kolhydrat- och mineralomsättningen, fettmetabolismen, äggstocksfunktionen m.m.

Höga manganhalter i det undersökta området finns främst i de västra delarna, närmare bestämt väster om Kiruna. I norr finns en del fläckvisa anomalier med förhöjda manganhalter. I områdets sydvästra delar uppträder ett flertal små, positiva anomalier i ett generellt måttligt förhöjt område, vars manganhalt är märkbart lägre jämfört med de ovannämnda regionerna. På kartan iakttas de lägsta manganhalterna i sydöst.

Medianvärdet för totalhalten av mangan i undersökningsområdets moräner är 0,7 g/kg, vilket är högre än för riket i övrigt. Däremot är medianvärdet för den syralakbara halten lägre än i landet i övrigt och ligger på 0,2 g/kg. Sålunda är lakbarheten 27 %. Den högsta manganhalten (totalhalt 2,75 g/kg, syralakad halt 2,19 g/kg) med nästan 80 % lakbarhet återfinns strax norr om Kiruna vid berget Kurravaara.

Totalhalten för mangan korrelerar positivt med kobolt, järn, titan och zink. Den syralakade manganhalten korrelerar positivt med aluminium, barium, beryllium, kobolt, järn, kalium, lantan, litium, magnesium, rubidium, titan, tallium och zink.

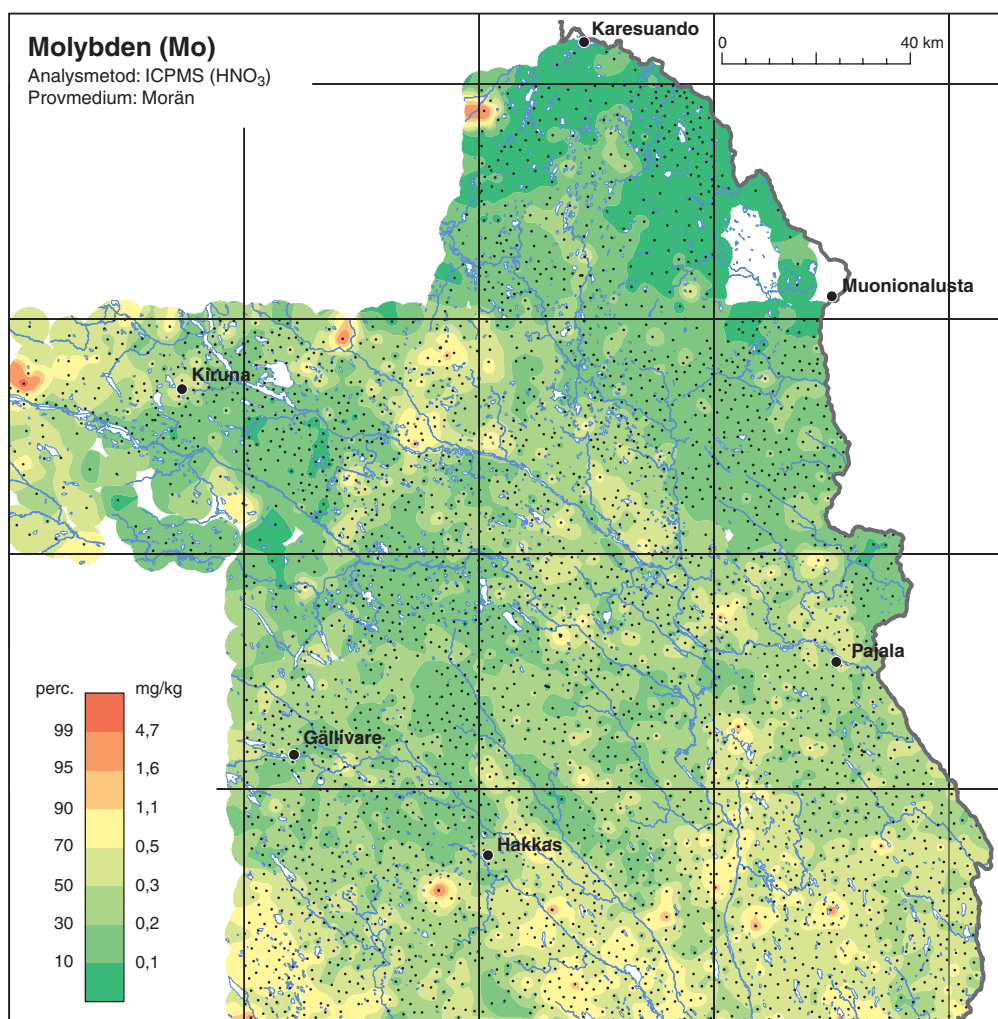


Mangan förekommer i fem mineraliseringar i undersökningsområdet: Teltaja, Sattavaara, Erkkekki, Käymjärvi och Kevus. De flesta utgör järnmalmsförekomster dominerade av magnetit eller magnetit och hematit. Vissa av dem är även sulfidförande. I Käymjärvi är mangan knutet till olivinvarianten fayalit där mangan har ersatt järnatomer i kristallstrukturen.

Molybden (Mo)

Spårelementet och metallen molybden uppträder normalt i de flesta bergarter i halter av 1–2 mg/kg. Den huvudsakliga förekomstformen är molybdenglans (MoS_2), men molybden kan även i låga koncentrationer uppträda bland annat i andra sulfider och i silikatmineral. Typiskt för mineralet är att det påträffas i kiselsyrarik miljö i anslutning till graniter, pegmatiter och skarn samt i kvartsgångar, ibland tillsammans med koppar, bly, arsenik eller tenn. Molybdenglans förekommer tämligen allmänt i Skandinavien berggrund, men de svenska fyndigheterna är normalt inte brytvärda. Geokemiskt följer molybden och wolfram samma mönster.

Vid vittring är molybden rörligt i alkalisk miljö och kan adsorberas till järn- och aluminiumföreningar. I motsats till de flesta andra metaller är molybden inte mobilt under sura förhållanden. Molybdenglansen vittrar under sura förhållanden endast marginellt, och frigjort molybden adsorberas snabbt på lermineral och organiska sediment. Den begränsade vittringen leder ibland till att urlakningshorisonten i podsolvjordar innehåller anomala mängder molybdenglans, såvida förutsättningarna (dvs. ett ursprungligt molybdenglansrikt modermaterial) är de rätta.



Molybden utgör mikronäringsämne för bakterier, svampar och gröna växter och förekommer i mark och vatten huvudsakligen i form av anjonen molybdat. Försurningen av miljön anses minska molybdenets biologiska tillgänglighet, bl.a. genom att det i sur miljö bildar svårslösliga aluminium- och järnmolybdat. pH-värdet i marken är därför av stor betydelse för tillgängligheten av molybden. Höga molybdenhalter kan minska koppars biologiska tillgänglighet och orsaka akut eller kronisk brist på detta mikronäringsämne hos både växter och djur. Detta anses vara en bidragande förklaring till den så kallade Älvsborgssjukan hos älgar.

Molybden antas vara ett essentiellt spårelement under fosterlivet och hos nyfödda. Stora mängder molybden är däremot toxiskt och det kan också orsaka brist på koppar och svavel. Även om molybdenbrist inte beskrivits hos människa anses för små mängder av elementet ge bristtillstånd.

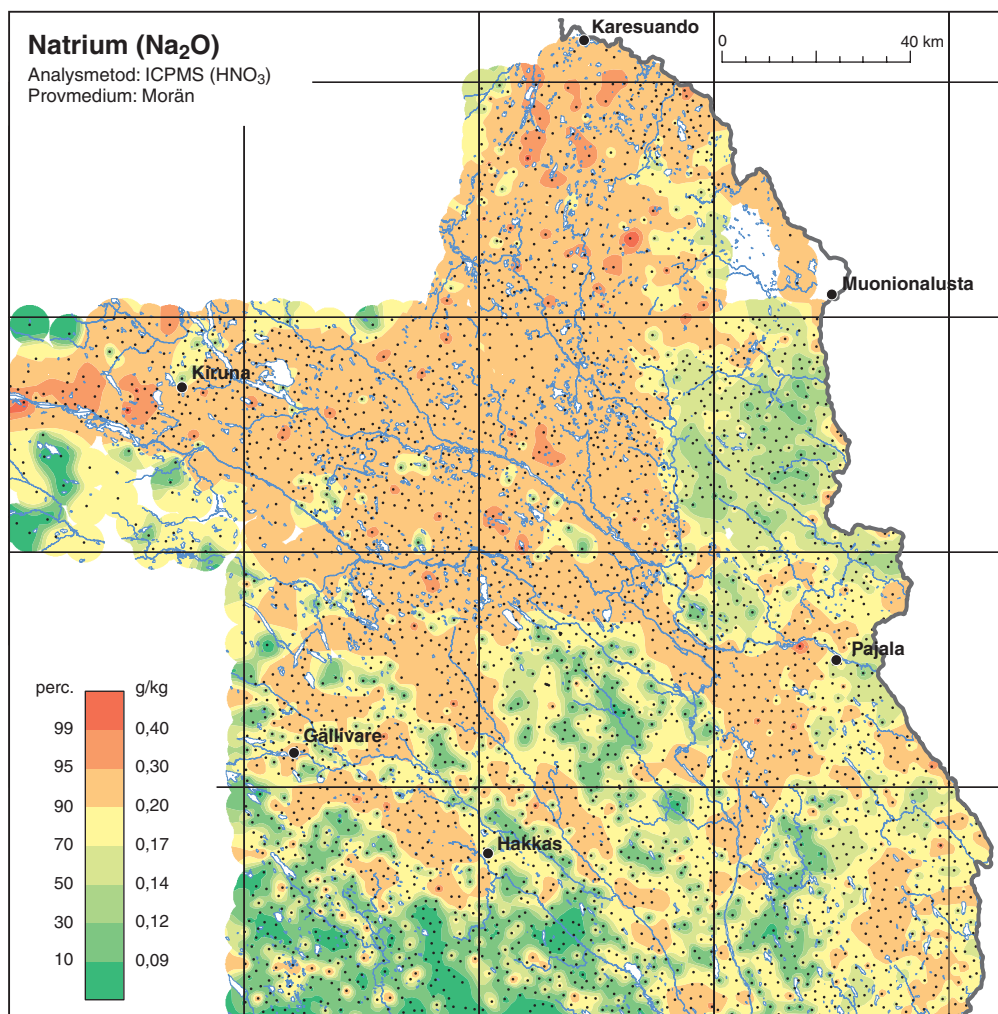
Medianhalten av molybden i kartområdet är lägre än i övriga landet. I undersökningsområdet finns 16 mineraliseringar i SGUs fyndighetsdatabas som uppges innehålla molybden. Moräner med förhöjda halter av metallen finns i anslutning till många av sulfidmineraliseringarna, exempelvis i Kirunaområdet där moränen vid mineraliseringen Saivo innehåller molybden. Kalixfors och Hämojägge, som båda ligger mellan Saivofyndigheten och Kiruna, saknar dock molybdenhaltig morän. Området har påverkats kraftigt vid inlandsisens avsmältning och en mängd erosionsrester i form av isälvsrännor finns här. Lokalt saknas tecken på en bottenaktiv is (isräfflor och drumliner) och i stället byggs moränlandskapet upp av kullig terräng. Provtagningsstätheten är begränsad i området söder om Kiruna. Ett par fyndigheter återfinns i områden med höga halter av molybden kring Svappavaara och åt nordost, bl.a. Särki-vaara, Äijeroa och Paurankilantto. Ännu längre åt nordost, sannolikt tillhörande samma nordostligt

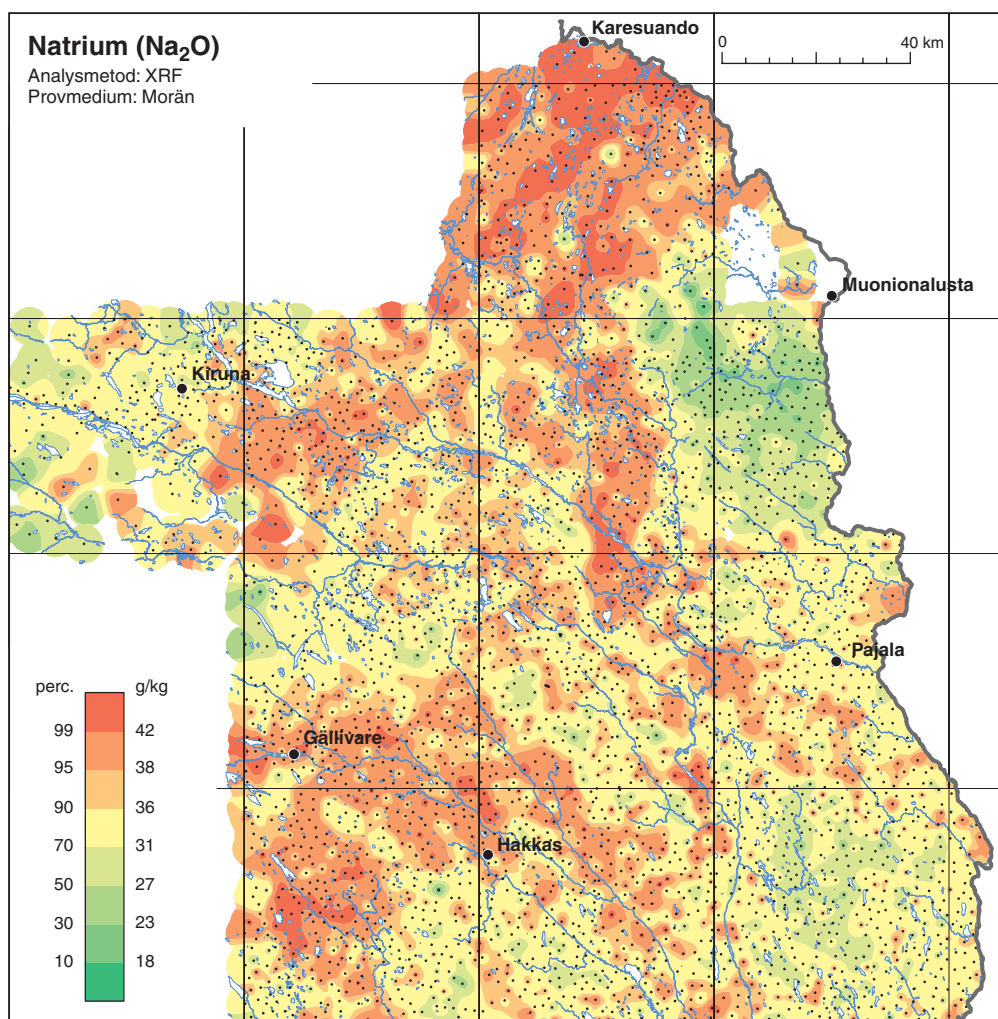
istransporterade morän, återfinns Ahmavuoma. I ett glacialmorfologiskt mer komplext landskap sydost om Ahmavuoma har moränen också förhöjda halter av molybden och anslutande fyndigheter är t.ex. Merasaara och Palo Pöyvio. Söder om Masugnsbyn ligger Rappukoski och västerut Maunuvaara.

Ett par mil söderut finns molybdenfyndigheten Palovaara i ett drumliniserat moränlandskap där isrörelseriktningen varit från nordväst, och förhöjda molybdenhalter i moränen sträcker sig parallellt med dessa åt sydost. I området mellan Pajala och Tarendö samt flera mil åt söder visar moränen generellt måttligt hög molybdenhalt. Området karaktäriseras av ett flertal isrörelseriktningar: nordnordvästlig, nordvästlig, västlig och sydlig. De divergerande isrörelserna ger ett mångfacetterat geokemiskt mönster, där lokalt förhöjda molybdenhalter kan kopplas till lokala moränformer. Till exempel kan isrörelsen från sydsydväst följas i molybdenmönstret väster om Korpilombolo. Även vid Pajala där isrörelsen varit mer sydvästlig följer molybdenhalterna riktningen. Längre västerut återtar molybdenanomalierna generellt den nordvästliga isrörelseriktningen. Norr om Hakkas ligger fyndigheterna Suorravaara och Vähävaara som återfinns i ett småkulligt moränlandskap utanför molybdenanomalins nordvästra gräns. Väster om området saknas molybdenhaltig morän. Molybdenanomalin begränsas i väster av ändmoränliknande former som ingår i Lainiobågens södra del, medan isälvsrännor och drumlinier utgör en östlig gräns. De höga molybdenhalterna i söder kopplas generellt till den granitiska berggrunden.

Natrium (Na)

Natrium förekommer i såväl basiska bergarter som mer kiselrika. Lägst är innehållet i alunskiffer och sandsten. Natrium förekommer främst i olika fältspater såsom i plagioklasseriens olika mineral,





(Na,Ca)AlSi₃O₈ (albit, oligoklas), och i omvandlingsmineral från dessa. Gemensamt för dem är att lakbarheten är mycket låg, även med 7M HNO₃ och kungsvatten. Även en del amfiboler, pyroxener, glimrar och andra silikatmineral innehåller natrium men här är lösligheten betydligt högre. Natrium kan substituera kalium i kristallgittret och därmed ingå i andra bergartsbildande mineral. Vid vittring är natrium i fältspater tämligen svårslösligt, men är i stället mycket lättlösligt när det sitter i mörka mineral, glimrar och kalciumrika plagioklaser. Löst natrium är mycket rörligt och transporteras i vattenvägarna för att så småningom nå havet.

Natrium är kanske mest känt som en komponent i koksalt (NaCl) som är ett mineral som dock saknas i svensk berggrund. Natrium är essentiellt för allt levande. Huvudfunktionen hos djur och människor är att reglera syra-basbalansen och det osmotiska trycket. Koncentrationen i kroppen regleras av njurarna. För mycket salt drar vatten ur cellerna och påverkar blodtrycket. Oftast är det via maten som människan får i sig för mycket salt. En annan källa är dricksvatten som, om det har höga natriumhalter, kan orsaka högt blodtryck och arterioskleros.

Totalhalterna i undersökningsområdet är förhöjda i förhållande till riket i övrigt. Korrelationen mellan totalhalt och salpetersyralakat halt är svag ($r = 0,4$). I området ligger den procentuella lakbarheten för samtliga prov mellan 0,3 och 2,1 %, med ett medelvärde på 0,6 %. Detta antyder att natrium förekommer i fältspat eftersom andra mineral har högre lakbarhet (Snäll & Liljefors 2000). Sannolikt är det fältspater som dominerar natriums förekomst i moränerna i de delar av kartområdet som inte har förhöjningar av syralakat natrium. Tydligast syns detta i kartområdets sydvästra del där Linagranitens moräner har förhöjningar av totalhalten natrium, medan de syralakade halterna är mycket låga. Mot-

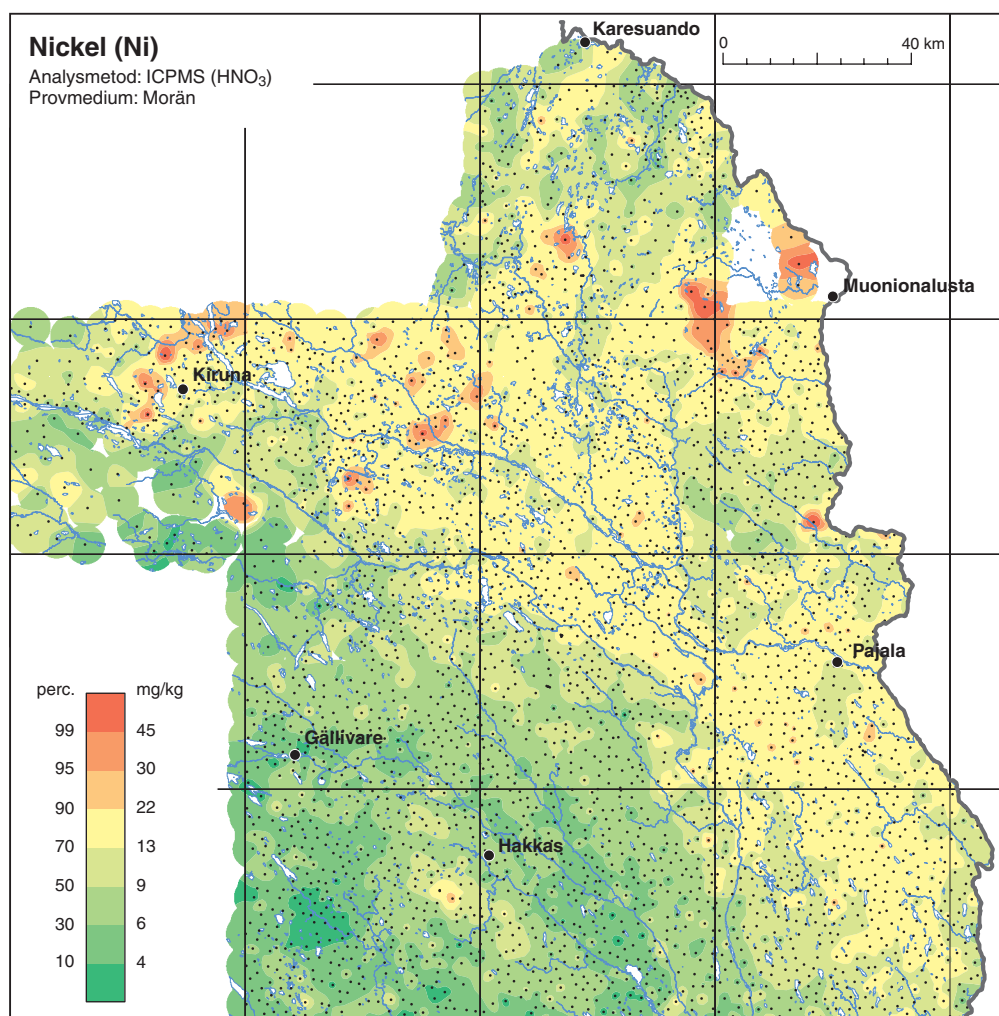
satsen kan ses i Kirunaområdet, där de syralakade natriumhalterna ger upphov till positiva anomalier medan istället totalhalterna är låga. Ett exempel är det stora drumlinområdet mellan Karesuando och Soppero som präglas av höga halter lättlösligt natrium. Denna präglan på moränens natriumhalter beror på förekomsten av alkaliska vulkaniska bergarter i området (Reimann m.fl. 2003).

Natrium korrelerar starkast med kalcium och klor. Dessa grundämnen förekommer förutom i bl.a. plagioklas även i apatit, som är ett relativt vanligt accessoriskt fosformineral i bergarter med en nästan fullständig lakning i stark syra. Sannolikt är åtminstone en del av salpetersyralakat natrium erhållet från denna mineralform. Som tidigare nämnts har också ett flertal natriummineral bildats genom hydrotermal omvandling (albitisering och skapolitisering). Generellt förekommer de högre natriumhalterna främst centralt och i norr i provtagningsområdet.

Bilden av natriumhalterna (liksom för flera andra element) präglas också av deglaciationen. Norra delen av Lainiobågen utgör en markant gräns, där moränerna har ett högre natriuminnehåll väster om denna och ett lägre öster därom. Istransporterad morän med natriumrikt bergartsmaterial upphör tvärt vid Lainiobågen. I jordtäcket öster om bågen har lättlösliga natriummineral sannolikt vittrat hårt och lakats ur på huvudelementet, åtminstone på det djupa moränen provtagits.

Nickel (Ni)

Nickel förekommer i basiska bergarter som gabbro, amfibolit och diabas, och kan uppträda med mycket höga halter i ultrabasiska bergarter. Skiffer är också vanligtvis nickelförande medan innehållet i granitiska bergarter och kalkstenar är betydligt lägre. I sandstenar är nickelinnehållet mycket lågt.



Som spårelementet är nickel starkt förknippat med förekomst av ultrabasiska bergarter, där halter kan uppgå till 2000 mg/kg. Nickel ingår i såväl lättvittrade sulfidmineral som i silikatmineral, och löst nickel tenderar att adsorberas till järn-mangan-(hydr)oxider. Geokemiskt följer nickel såväl järn som magnesium, och ersätter ofta dessa i mineralgittret. Metallen ingår i silikatmineral, sulfider och arsenider, och mineral som pyroxen, amfibol, granat, olivin och pyrit kan alla vara bärare av metallen.

Nickel finns i ett flertal malmmineral, bl.a. i pentlandit, som i allmänhet förekommer i basiska till ultrabasiska djupbergarter. Nickel har brutits på flera ställen i Sverige, från Kleva i Småland till Lainijaur i Västerbotten. Vanligen förekommer pentlandit i nickelhaltig magnetkis som speciellt följer de mellansvenska sulfidmalmen. De liknande atomradierna för järn, kobolt och nickel gör att de lätt byts ut mot varandra i kristallgittren. Nickel och kobolt följer av samma orsak även gärna koppar och i mineraliseringar kan också platinametallerna följa med. Vid vittring frigörs nickel lätt och är mycket rörligt i sur miljö, men kan fällas ut med järn- och manganoxider eller bindas till lermineral.

Nickel används som legeringsmetall framför allt vid framställning av rostfritt stål. Det används också till förnickling och i ackumulatorer. Som legeringsämne ökar nickel materialens styrka, seghet och korrosionshårdighet i ett stort temperaturintervall. Tillgång på nickel är nödvändig för järn- och stålindustrin, och nickel är en viktig beståndsdel i superlegeringar som kan motstå korrosion och mekaniska påfrestningar vid extrema temperaturer, t.ex. inom rymdtekniken. Omkring 25 % av nickelförbrukningen används för framställning av konsumtionsprodukter som diskbänkar, möbler, cyklar m.m. Ytterligare en fjärdedel används för maskindetaljer och ytbehandling inom bil- och verkstadsindustrin, och ungefär lika mycket konsumeras för tillverkning av utrustning för processindustri, kemisk och petrokemisk industri och kraftverk. Elektronikindustrin och den elektriska industrin konsumerar ca 6 %, och denna andel ökar. Spridning till miljön sker bland annat via smältverk, vid förbränning, oljespill och genom spridning av avloppsslam.

Nickel finns naturligt i små mängder i vatten och i födan. Nickel anses inte vara viktigt för människan, men kan vara det för vissa djur och mikroorganismer. Den viktigaste negativa hälsoeffekten av nickel är kontaktallergi. Hos yrkesmässigt nickelexponerade har man dessutom rapporterat ökad frekvens av cancer i lunga, näsa och bihålor. I humanserum finns ett metalloprotein som specifikt binder nickel, men man har inte kunnat visa att nickel är essentiellt för människan. Omkring 3 % av det nickel som finns i födan tas upp i magtarmkanalen. Utsöndringen sker framför allt med urinen.

Såväl syralakbara halter av nickel som totalhalter är generellt förhöjda speciellt i den norra och östra delen av kartområdet. Nickelanomalier med nordväst-sydöstlig sträckning finns i det karterade området. Förhöjningarna följer förekomster av proterozoiska basiska bergarter (gabbro och metabasiter).

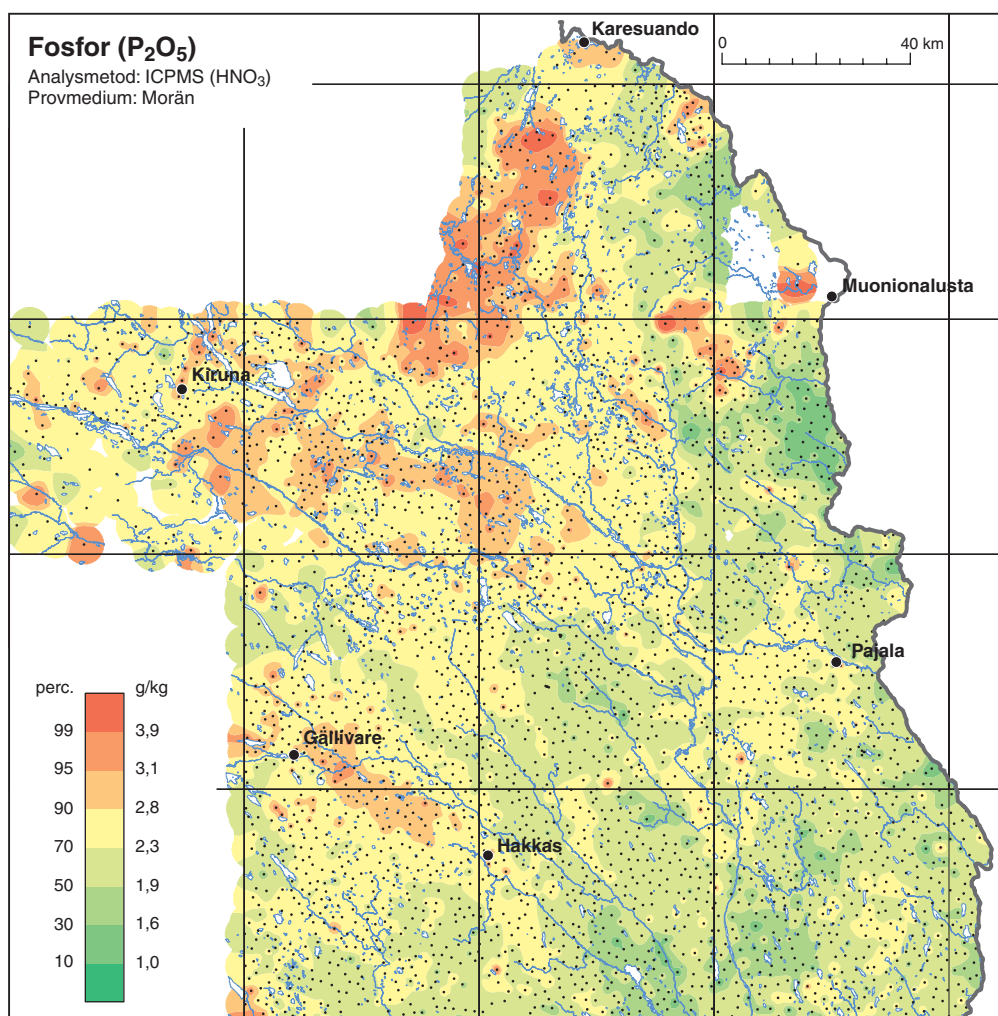
Nickel ingår som en komponent i den mafiska associationen med framför allt järn, magnesium, kobolt, krom, koppar och vanadin. Nickelanomalier (totalhalter) visar nästan samma mönster som magnesium och krom. Den procentuella lakbarheten för nickel uppgår till 40 % (i medeltal) och varierar mellan 18 och 72 %. Detta är högre än för magnesium och kobolt. Korrelationen mellan totalhalter och salpetersyralakade halter är mycket stark ($r = 0,95$). Korrelationen med zirkonium är negativ, vilket ytterligare understryker att nickel är förknippat med basiska bergarter som saknar zirkonium. Syralakbara halter är förhöjda framför allt i Kirunaområdet, Svappavaara, norr om Vittangi och österut från Övre Soppero. Det sistnämnda området underlagras omväxlande av metabasiter och metaargilliter, med rikligt förekommande grafitfyndigheter. Även en nickelförande mineralisering (Jälketkurkkio) finns dokumenterad 10 km väster om Vittangi. Det finns en relation mellan förekomsten av metabasiter och förhöjda nickelhalter, speciellt i den norra halvan av området. Vid Svappavaara och ca 30 km västerut uppträder mindre anomalier där nickelhalterna är förhöjda och kan kopplas till järn-koppar-mineraliseringar i metabasiska bergarter. I den södra delen korrelerar förhöjda nickelhalter bra med gabbroförekomster som är rika på olivin och andra magnesiumsilikater (t.ex. förekomsten Purnu-Pudalaki). Nära Gällivare har däremot de basiska bergarterna inte gett upphov till märkbara nickelanrikningar i moränen.

Fosfor (P)

Fosfor är det elfte vanligaste grundämnet i jordskorpan, medräknat syre som är vanligast. Mineralen apatit är vanligtvis den dominerande källan till fosfor, men elementet kan också ingå i glimrar, pyroxen, olivin, fältspat, granat m.fl. Kalciumfosfatet apatit är ett vanligt bergartsbildande mineral och därför förekommer fosfor i ett flertal bergarter. De högsta fosforhalterna återfinns vanligtvis i de basiska bergarterna. I graniter och pegmatiter kan andra fosforhaltiga mineral uppträda, exempelvis monazit, till vilka ofta också yttrium och sällsynta jordartsmetaller är associerade. Fosforit anses ha bildats av djurorganismer och omfattar lager och koncretioner i sedimentbergarter av olika åldrar. Lösligheten för fosfor varierar beroende på mineraltillhörighet. I apatit är fosfor lösligt, men svårslösligt i bl.a. monazit. Mobiliteten är högst under måttligt sura förhållanden. Fosfor bildar svårslösliga föreningar med kalcium vid höga pH-värden och med järn och aluminium vid låga pH-värden.

Brytning av fosfatmineral görs huvudsakligen för framställning av fosforsyra samt fosfater för främst jordbrukets behov av konstgödsel. Fosfor har en avgörande betydelse för ämnesomsättningen hos både djur och växter. Det är en väsentlig beståndsdel i levande vävnader och finns framför allt i skelettets ben som kalciumfosfat. Fosfor är således en nödvändig beståndsdel i födan. Fosforbrist kan leda till skör skelettvävnad och ge rakitis (engelska sjukan) hos växande djur, mer sällan hos människor eftersom fosfor finns i så gott som alla livsmedel.

Fosforinnehållet i undersökningsområdets moräner är högre jämfört med i landet i övrigt. Höga fosforhalter återfinns i områdena runt Malmberget, mellan Masugnsbyn och Vittangi, norr om Saari-vaara samt i området runt Keräntöjärvi.

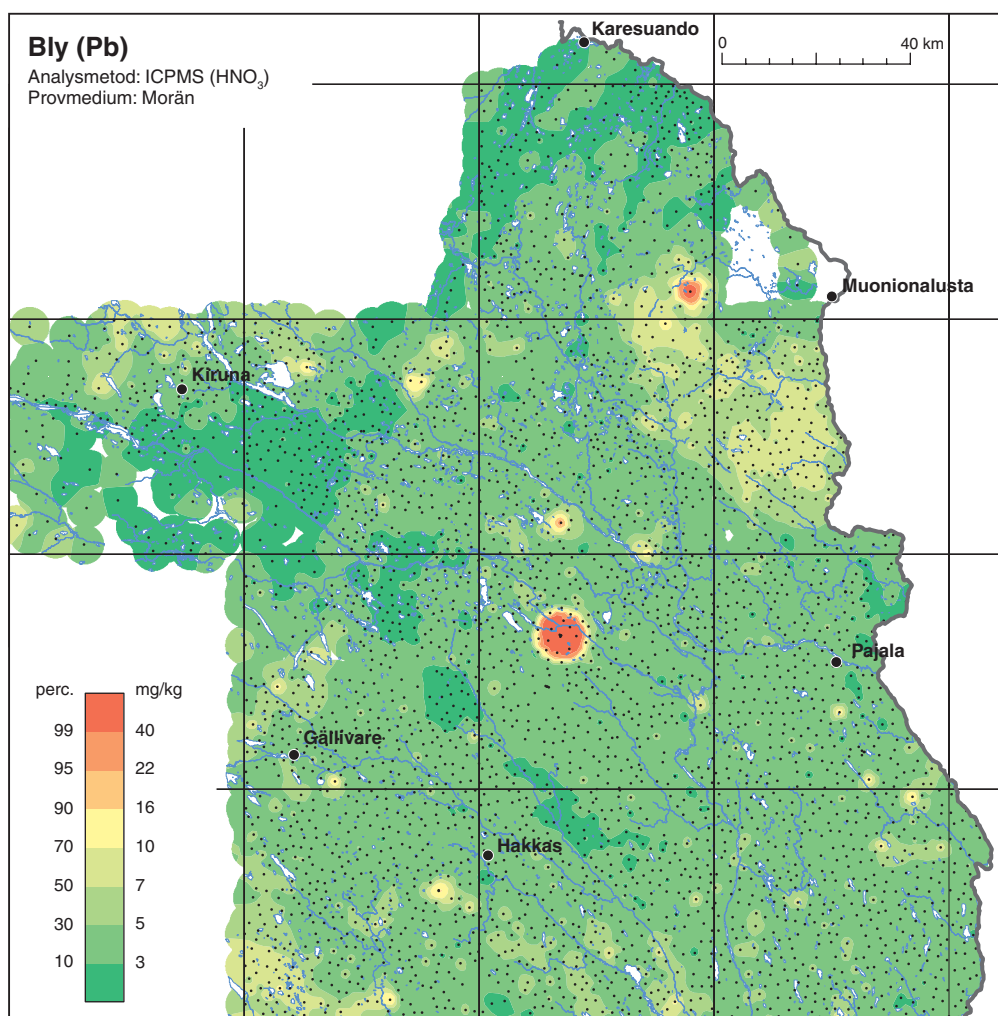


Medianvärdet av totalhalten av fosfor i undersökningsområdets moräner är högre (3 g/kg) jämfört med landet i övrigt (2 g/kg). Medianhalten för syralakat fosfor är 2,4 g/kg. Lakbarheten är följaktligen 78 %. För syralakat fosfor finns en stark korrelation med kalcium som indikerar påverkan från apatitrik berggrund med förekomster av apatitjärnmalm.

I kartområdets västra del kopplas höga fosforhalter till kända apatitförande järnmineraliseringar i områdena kring Kiruna, Svappavaara, Malmberget, Kamastjärro och Passetjåkka. Anomalierna som påträffas i de östra, centrala och norra delarna av kartområdet har däremot troligen en direkt anknytning till berggrunden i allmänhet och basiska bergarter i synnerhet.

Bly (Pb)

I bergarter förekommer bly med de högsta koncentrationerna i sura magmatiska bergarter. Sandstenar kan också ha högt blyinnehåll medan koncentrationen är låg i kalkhaltig berggrund och basiska bergarter. Det vanligaste blymineralet är blyglans (PbS) som också dominerar i mineraliseringar innehållande bly. I motsats till det låga innehållet av bergartsbundet bly i kalcit är blyinnehållet högt i karbonatbergarter då metallen uppträder i form av blyglans och då ofta tillsammans med zink och silver. De geokemiska egenskaperna för bly liknar de för kalium, barium, strontium och även kalcium, och bly kan ersätta dessa element både i mineral och när det gäller adsorption. Detta innebär att bly gärna ingår i kalifältspater och glimmer och även i lägre grad i plagioklas och apatit. Bly är inte särskilt lätttrörligt i vittringsprocesser, men i löst form binds blyjonerna lätt bland annat till sekundära ler-



mineral, järn- och manganoxider och till organiskt material. Högt blyinnehåll i en del kolavlagringar och i mörka skiffrar återspeglar att bly har hög affinitet till organiskt material.

Bly förekommer i mark och vatten i form av den tvåvärda jonen Pb^{2+} . Blyinnehållet i markens mineraljord återspeglar som regel innehållet i berggrunden. När det gäller det översta, helt organiska skiktet (måren) är sambandet med berggrundsgeologi istället mycket svagt. Största delen av blyet i måren härstammar från nedfall av föroreningar och har ansamlats under lång tid. Bly är en av metallerna som spritts till marken runt Falu gruva men kan endast spåras i ytliga markskikt. Stark bindning till organiskt material gör att bly stannar kvar i mårskiktet och endast långsamt lakas ut. Rörligheten för bly i mark, som är en av de lägsta för alla metaller, resulterar i att blykoncentrationerna i marklösning i allmänhet är låga. Rörligheten av bly är dock pH-beroende och minskar kraftigt med kalkning och ökat pH. Ackumulering av bly i ytliga marklager har stor ekologisk betydelse eftersom den påverkar den biologiska aktiviteten i mark. Redan vid låga koncentrationer finns tecken på markbiologiska effekter med nedsatt biologisk aktivitet i måren till följd av bly, vilket kan orsaka ackumulering av organiskt material, speciellt svårnedbrytbara föreningar som cellulosa. Det finns indikationer att stora delar av Sverige är påverkat i detta avseende (Bringmark & Bringmark 2001).

Hälften av det bly som befolkningen tar upp kommer från födan och resten från luften. Koncentrationerna i vatten är i allmänhet låga och dricksvatten orsakar därför normalt inte några problem med blyexponering. Redan vid mycket låga doser ger dock bly skador på nervsystemet. Främst har effekter på hjärnans utveckling hos foster och barn uppmärksamats. Hos djur är symtom på blyförgiftning rörelsestörningar, kramper, förstoppning i matstrupen eller tarmen, samt blodbrist. Blyförgiftning har t.ex. konstaterats hos kungssörn och havssörn som misstänks ha förgiftats via döda hagelskjutna djur.

Svagt förhöjda blyhalter i moränen påträffas i de nordöstra delarna av undersökningsområdet, med en relativt högre blyhalt i Pessinki. På kartan kan också observeras svaga förhöjda halter i de sydvästra delarna av området samt norr om Kiruna och kring Malmberget. Förhöjda halter av syralakbart bly i undersökningsområdets moräner ansluter ofta till malmförande regioner och områden med mindre mineraliseringar. Runtomkring mineraliseringen Kurkkionvaara finns i moränen en distinkt bly-anomali vars geometri sammanfaller väl med isrörelseriktningen. Medianvärdet för både den totala blyhalten (16 mg/kg) och den syralakbara halten (3,9 mg/kg) ligger under rikets genomsnitt. Lakbarheten för bly är 25 %. Den totala och den syralakade blyhalten i moränen korrelerar med kadmium och svavel, samt i något svagare form även med zink.

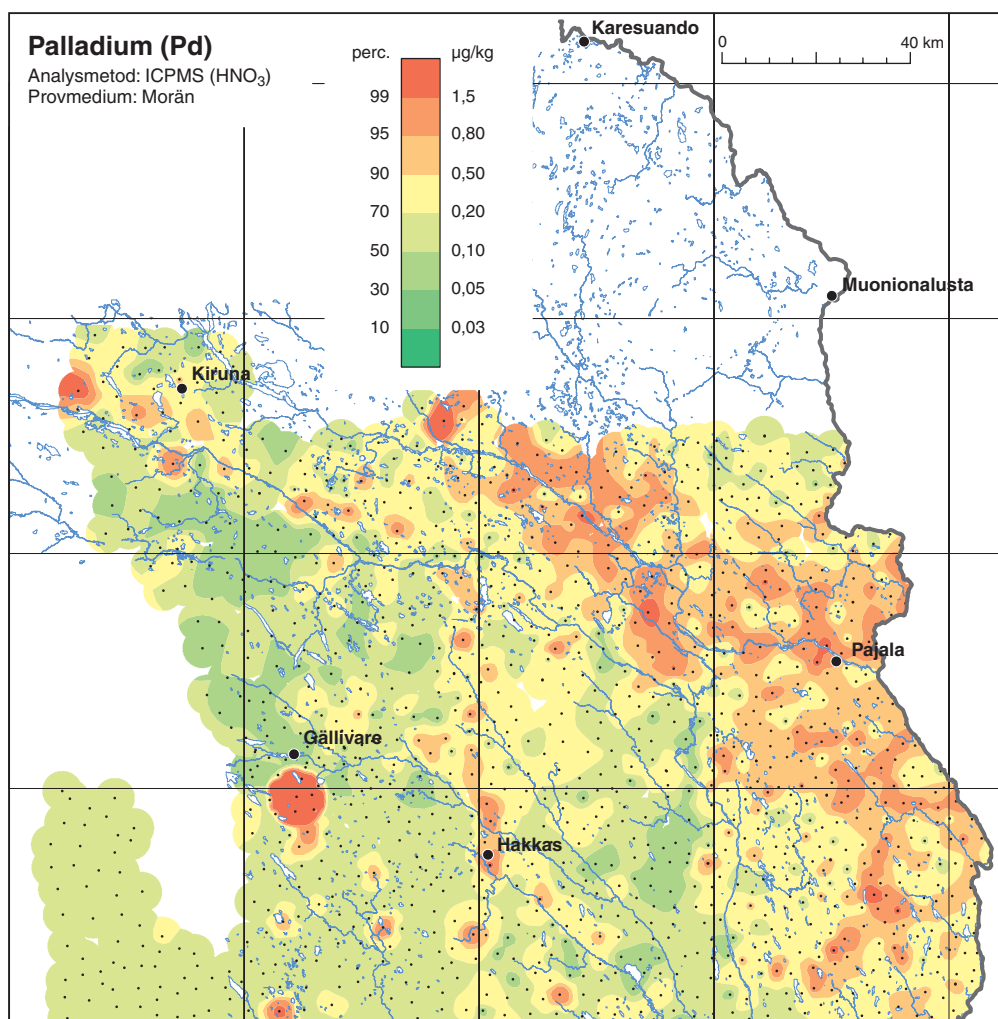
Palladium (Pd)

Palladium är en ädelmetall som tillhör platinagruppens metaller (PGM), tillsammans med platina, rutenium, rhenium, osmium och iridium. Palladium uppträder normalt i mycket låga halter i såväl bergarter som jordarter ($\mu\text{g/kg}$). Halterna kan vara förhöjda framför allt i samband med förekomst av mineraliseringar i ultrabasiska bergarter och i granitiska pegmatiter med mineral som innehåller sällsynta jordartsmetaller och gadolinium. Palladium är ofta spårelement i koppar-nickelsulfider som förekommer i basiska och ultrabasiska bergarter.

Palladium ingår för närvarande inte i SGUs analysprogram, utan tolkningen baseras enbart på resultaten från NSG-databasen. Det bör noteras att denna saknar täckning i områdets nordligaste del.

I moränen är palladiumhalterna generellt låga, men enstaka prov med svagt förhöjda halter (2–3 $\mu\text{g/kg}$) finns i området kring den enda dokumenterade palladiumfyndigheten (Pahtohavare Västra 1, en guld-koppar-palladiumfyndighet belägen sydväst om Kiruna). I Gällivaretrakten, sydost om Dundret, hittas också högre palladiumhalter. Dessa visar en stark korrelation med en tyngdkraftsanomali. Dundret är en stor gabbro–dioritintrusion och mindre kroppar med basiska bergarter förekommer i området söderut, exempelvis i Nänasvaara. Isräfflor i området påvisar en nordvästlig–sydostlig isrörelseriktning, men även andra riktningar finns dokumenterade.

Anomalier belägna 21 km väster om Kiruna, 10 km sydväst om Svappavaara samt nordnordväst om Vittangi ansluter till förekomster av metamorfa basiska och ultrabasiska bergarter (basalt, gab-

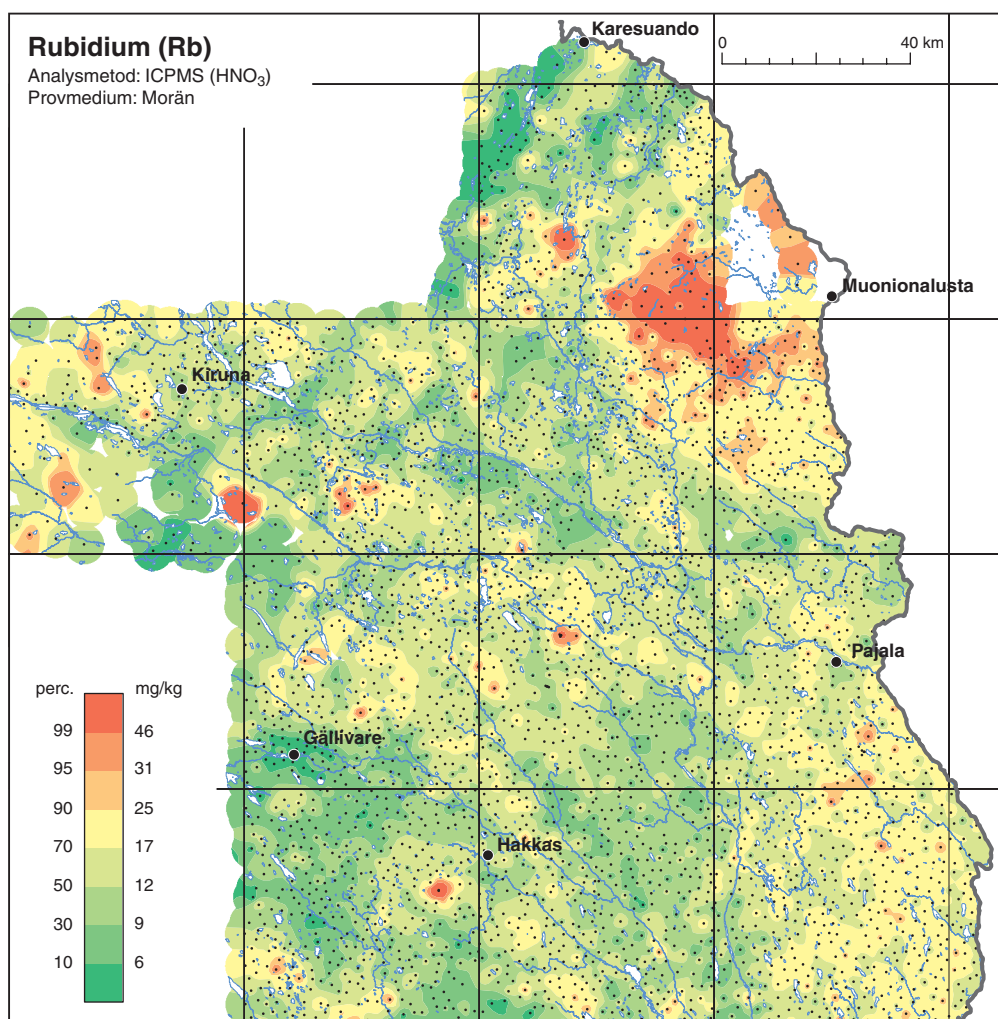


bro, serpentinit och täljsten) av karelsk till tidig svekofennisk ålder. Koppar-, järn-, zink- och apatit-mineraliseringar kan noteras i området. I Korpilombolotrakten (Pahamaa), finns förhöjda palladiumhalter i moränen i ett område med en fyndighet som innehåller guld, palladium och koppar. Fyndigheten ansluter till deformerad kvarts med amfiboliter, granodioriter och sedimentära bergarter med en ålder av 1,87–1,89 miljarder år (Jonsson 2010).

De flesta förhöjda palladiumhalter kan kopplas till basiska och ultrabasiska bergarter som sträcker sig diagonalt i nordvästlig–sydöstlig riktning genom det karterade området, och som sammanfaller med magnesium-, nickel-, koppar- och guldanomalier. Även en magnetisk anomali (fig. 7) följer den observerade trenden.

Rubidium (Rb)

Alkalimetallen rubidium är relativt vanlig och förekommer i jordskorpan i ungefär samma utsträckning som nickel, koppar och zink. Den ingår i en del mineral, t.ex. pollucit och leucit (silikater) och carnallit (kaliummagnesiumklorid), dock inte som huvudkomponent i brytvärda kvantiteter. Rubidium utvinns i stället som en biprodukt vid framställning av litium ur glimmermineralet lepidolit, som innehåller upp till 1,5 % rubidium. Rubidium ingår i kalifältspater och glimmermineral och förekommer vanligen i skiffrar, granodioriter, graniter och pegmatiter samt i glimmerrika, metamorfa bergarter. Sandstenar kan ha måttligt höga halter medan basiska bergarter har lågt innehåll. Rubidium bildar inga egna mineral utan följer kalium i geokemiska processer och kan ersätta såväl kalium som



barium i mineralens kristallgitter. Därav följer att rubidiumhalterna är förhöjda i bergarter rika på nämnda mineral, t.ex. graniter. Jonbyten vid vittringsprocesser gör att rubidium koncentreras relativt kalium och kvoten mellan kalium och rubidium har därför använts i vittringsberäkningar. Rubidium är således inte särskilt mobilt men är rörligt vid högt pH och binds då starkt till lermineral som illit.

Det finns ganska få användningsområden för rubidium. Alkalimetallen används dock i fotoceller, vid tillverkning av specialglas och i forskningssyften. Det finns även en medicinsk tillämpning då det i likhet med litium kan användas som antidepressivt medel.

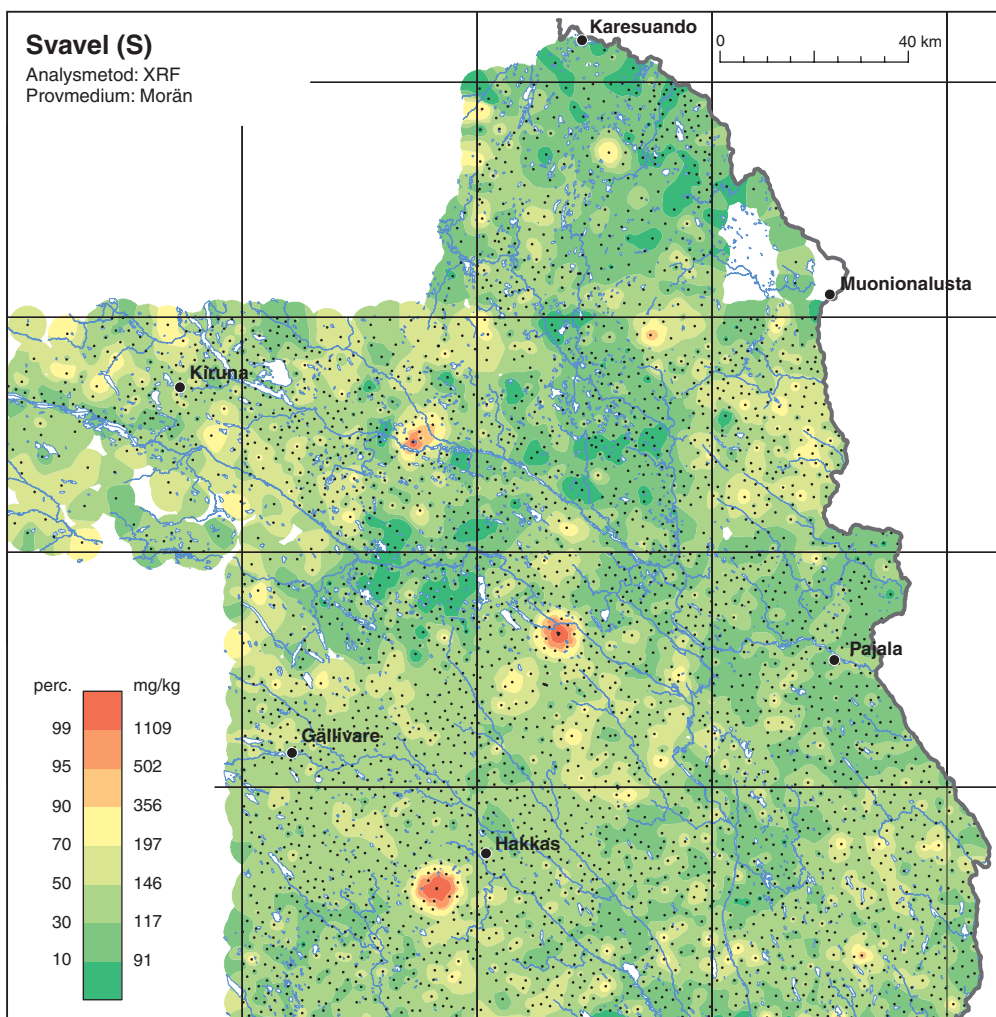
Medianvärdet för totalhalter av rubidium i kartområdets moräner är lägre än för landet i övrigt, men för syralakat rubidium är det högre. De förhöjda halterna av rubidium i syralakat form avspeglar elementets närvaro i relativt lösliga mineral. Mönsterlikheten är stor med syralakat kalium, tallium m.fl. Även korrelationsmatrisen visar att rubidium och kalium uppträder på likartat sätt, dvs. associationerna där de bägge elementen ingår är snarlika och kopplar rubidium till bland annat glimmermineral och fältspater. Procentuell lakbarhet (18 %) för rubidium är dock högre än för kalium (medianvärde 5 %) och sannolikt avspeglar kartbilden främst glimmermineral som bärare av rubidium. Påvisbart förhöjda rubidiumhalter finns i Pessinkiområdet i nordost och i den sydöstra delen av kartområdet. Den förra är avgränsad av glacifluviala formelement. Mindre bälten med förhöjda rubidiumhalter finns centralt i kartområdet, utdragna i nordvästlig–sydöstlig riktning. Det finns också fläckvisa förhöjda halter t.ex. väster, sydväst och sydost om Kiruna samt sydväst om Hakkas.

Svavel (S)

Svavel är ett vanligt grundämne som är vida spritt i jordskorpan. Jordens inre kan innehålla upp till 15 %, svavel. I universum är svavel ett av de tio vanligaste grundämnena. Svavel definieras också som ett mineral, vanligen tillhörande det ortorombiska kristallsystemet. Det finns främst i sedimentära men även i vulkaniskt bildade förekomster. Svavel förekommer med högsta halter i skiffrar med organiskt innehåll och med lite lägre halter i basiska bergarter och i kalkstenar. Lägst är innehållet i sandsten och graniter. Svavel kan ingå i mineral som biotit och hornblände men förekommer i huvudsak som sulfider eller sulfater och uppträder då exempelvis tillsammans med arsenik, bly och zink. Pyrit (svavelkis, FeS_2) är ett av de mest utbredda sulfidmineralen och påträffas i såväl magmatiska som sedimentära och omvandlade bergarter. Vid vittring av primära svavelmineral är elementet mycket mobilt, löser ut och bildar nya komplex eller transporteras bort av mark- och grundvatten i form av lösta sulfatjoner.

Svavel är nödvändigt för alla levande organismer och ingår i organiska föreningar i cellerna. För växter är svavel ett makronäringsämne, men sulfat, den form i vilken växterna tar upp svavel, förekommer så rikligt i jorden att brist är sällsynt. Sulfatet reduceras strax efter upptagningen och omvandlas till organisk form. Djur kan endast tillgodogöra sig svavel ur vegetabilisk eller animalisk föda. Många bakterier bidrar till svavelomvandlingar i naturen. I syrefria miljöer förekommer ofta sulfat- och svavel-reducerande bakterier, vilka i stället för att reducera syre i sin cellandning omvandlar sulfat eller svavel till vätesulfid. De flesta bakterier kan, liksom växter, utnyttja sulfat som näringskälla.

Hos människan förekommer svavel i organiska föreningar och som sulfatjoner. Proteinerna i hår, hud, naglar och brosk har en hög svavelhalt, vilket är nödvändigt för uppbyggnaden. Behovet till-



godoses genom de svavelhaltiga aminosyrorna i födan. Livsmedel som mjölk, ägg, kött, bröd, bönor, vete och jordnötter innehåller mellan 1 och 8 % svavel. Svavel har också en avgiftande egenskap som hjälper kroppen att bli av med slaggprodukter.

Svavel är det enda element där man kan räkna med att atmosfärisk påverkan (såväl naturlig som antropogen) har så stor inverkan på de provtagna C-horisonterna att de stör den geologiska bilden.

De flesta av de förhöjda svavelhalterna i morän påträffas i de västra delarna av undersökningsområdet, runt Kiruna, där de återspeglar flertalet av regionens sulfidförande mineraliseringar. I kartområdets södra och centrala delar hittas en del fläckvisa anomalier med förhöjda svavelhalter, till exempel sydväst om Hakkas, vid Kurkionvaara nordost om Nilivaara och vid Käymäjärvi.

Medianhalten av svavel i kartområdets moräner är lägre än landet i övrigt. Moräner med förhöjda svavelhalter uppträder oftast i anslutning till sulfidmineraliseringar. Några undantag utgör Keräntöjärvi som ligger norr om Pajala samt områdena runt Ripakainen och strax öster om Nilivaara. Den högsta uppmätta svavelhalten i undersökningsområdet (9 074 mg/kg) hittas sydväst om Hakkas, där ett par sulfidmineraliseringar finns (Puolalaki och Arturvaara). Svavel korrelerar med arsenik, bly, selen och vismut. Det finns även korrelation med tallium och kadmium, men denna är betydligt svagare än den med de tidigare nämnda elementen. Med faktoranalys placerar sig svavel enbart i en grupp tillsammans med bly.

Det föreligger ett tydlig samband mellan svavel och pH på så sätt att där pH-värdena är lägre än 5, alltså sura, är svavelhalterna höga, vilket kan ha att göra med sulfidernas (pyrit m.fl.) oxidation i morän och bildningen av svavelsyra.

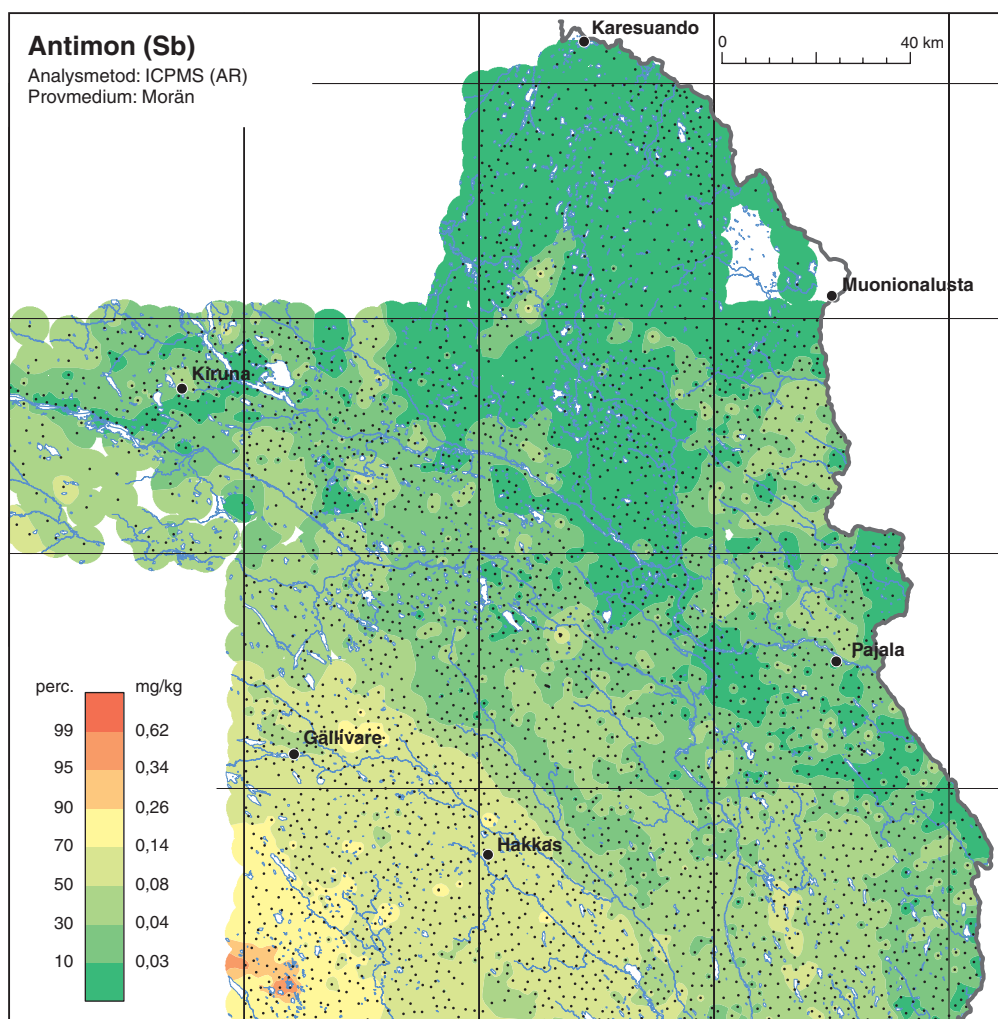
Antimon (Sb)

I bergarter uppträder metalloiden (halvmetalen) antimon med låga halter och är relativt sett vanligast i argillitiska bergarter. Högst antimonhalter påträffas i skifferar medan graniter, kalksten och basiter har lägre halter och sandstenar mycket låga halter. Mineralogiskt förekommer antimon som sulfider, och är geokemiskt besläktat med framför allt arsenik och vismut. Antimon förekommer därför ofta i mineraliseringar tillsammans med andra sulfider, såväl med dessa element som med bly, koppar, silver, guld m.fl. Vanligt är att antimon följer blyglans och zinkblände. I magmatiska processer kan metallen ersätta järn. Två former av antimon förekommer, en metallisk, vit och glänsande och en amorf, grå form. Antimon är inte vanligt förekommande men kan trots det påträffas som spårämne i hundratalet mineral, exempelvis i ilmenit och olivin. Det kan också förekomma i ren form i naturen men oftast som antimonsulfiden stibnit (Sb_2S_3). Antimon kan användas som ett indikatorelement vid guldprospektering.

Antimon frigörs sannolikt ganska lätt vid vittring under sura förhållanden, men anses inte vara särskilt mobilt. Antimon bildar snabbt olösliga salter eller adsorberas till bland annat järnhydroxider. Kännedom om hur antimon uppträder är begränsad, men förekomsten i kol och i naturliga vatten indikerar viss rörlighet. Vissa växter kan ackumulera antimon.

Bland annat i samband med gruvhantering kan antimon spridas i miljön. Antimon kan vara rörligt och många av dess föreningar är mycket giftiga. Antimonexponering kan ge hud- och lungskador.

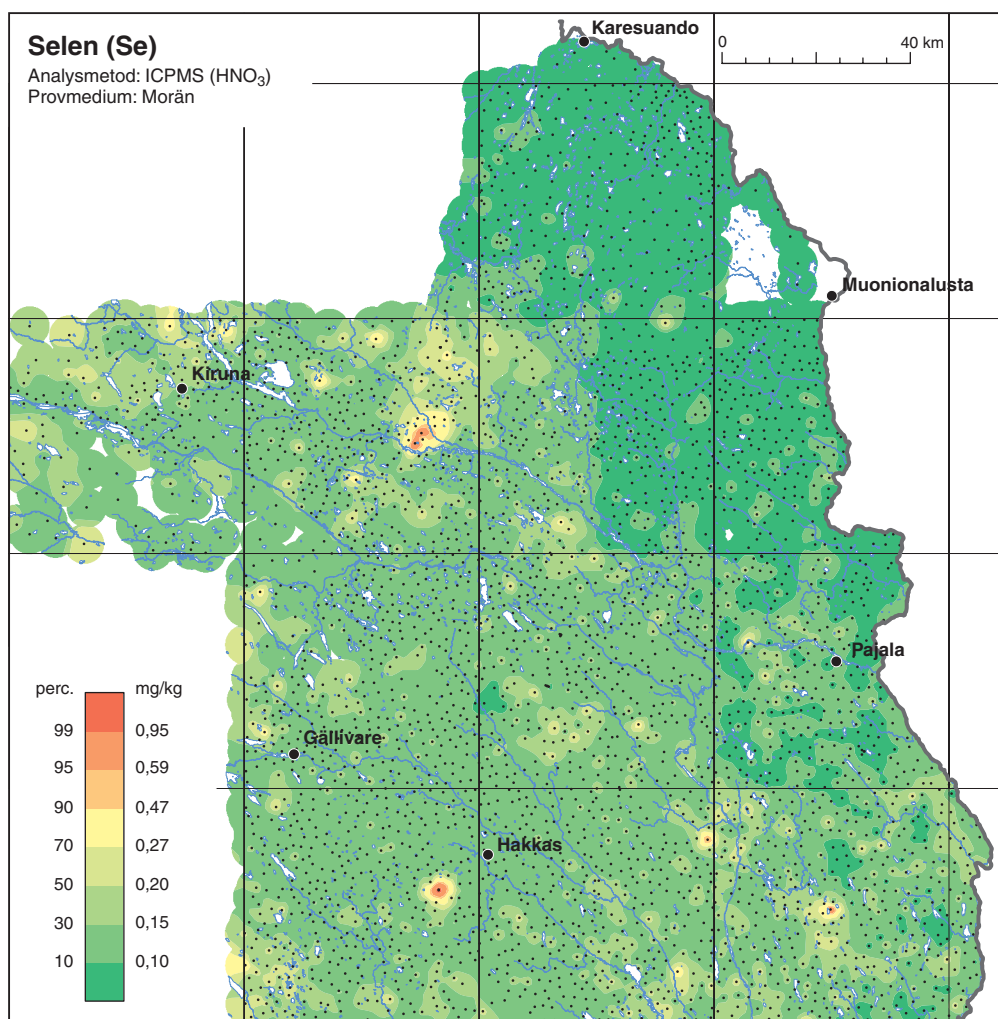
Antimon uppvisar varierande halter i undersökningsområdet med förhöjda halter i sydväst som övergår till mycket låga halter i nordost. Det är tydligt att elementet inte förekommer i vanliga bergartsbildande mineral. Det finns dock en mycket svag anomali öster om Lannavaara med en sträckning i sydväst–nordost som tydligt markerar att moränområdet här har förhöjda halter av antimon och ansluter till ett flertal kända mineraliseringar, exempelvis Saarivaara och Huornaisenvuoma. De förhöjda halterna här förekommer i ett stråk som är ett par kilometer långt och ligger helt parallellt med både räffelriktningar och ett drumlinområde i norr. Något öster om Gällivare finns ett mindre område med förhöjda halter som sammanfaller med omväxlande sura till intermediära vulkaniter och metasediment (fylliter och metaareniter). Här finns också kända mineraliseringar, bl.a. Liikavare och guldmineraliseringen Koppelovaara. Närmsta moränprov i isrörelseriktningen nedströms Koppelo-



vaara har måttligt förhöjd antimonhalt. Det område som har högst antimonhalter återfinns i sydväst i isrörelseriktningen sydost om mineraliseringen Måskoskårsö, som är silver- och blyförande. I moränen korrelerar antimon relativt väl med arsenik och yttrium, medan korrelationen med vismut och svavel är försumbar. Noteras bör att korrelation med magnesium, krom, nickel och vanadin är negativ beroende på avsaknaden av antimon i basiska bergarter.

Selen (Se)

Selen har låg medelhalt i jordskorpan. Selen är lika sällsynt som silver och kvicksilver och betydligt mer ovanligt än svavel. Det förekommer dock tillsammans med svavel både i elementär form och i sulfidiska malmer och är därför spritt i hela jordskorpan. Selen som ingår i malmbildande mineral kan uppträda i mineraliseringar tillsammans med bl.a. koppar, silver, arsenik, bly, antimon och tallium. Mineralen weibullit med selen-bly-vismut har exempelvis hittats i Falu gruva. Rena selenmineral är däremot sällsynta. Ett exempel är berzelianit (Cu_2Se) som påträffats i Skrikerum i Småland. Seleninnehållet i den svenska berggrunden är generellt sett mycket lågt, men skifferar och basiska bergarter kan innehålla elementet. Det kan också förekomma i graniter och kalkstenar men då i betydligt lägre grad. Vulkaniska bergarter kan innehålla mer än 10 mg/kg av selen. Selen finns också i halter av 1–5 mg/kg i vissa kol- och petroleumförekomster. Selen kan ersätta svavel i olika processer. Vid vittring under sura förhållanden är rörligheten hög hos selen. I basisk miljö bildas lösliga och biologiskt tillgängliga selenater, men om pH är lågt (lägre än 7) bildas i stället svårslösliga selenider och selenosulfider. Vid neutralt pH bildas selenit som fixeras till lermineral och järnhydroxider. En



anledning till att Sverige anses selenfattigt beror delvis på att det selen som finns sitter bundet i svår-lösliga föreningar.

Selen är ett livsnödvändigt näringsämne. Det ingår i enzymet glutathionperoxidas, som behövs för kroppens hantering av fria radikaler. Selen är också ett antagonistiskt element som motverkar toxiska effekter av en rad metaller (bly, kvicksilver, kadmium, arsenik och silver). Selenbrist är orsaken till Keshan-sjukdomen, en endemisk hjärtmuskelsjukdom hos barn i Keshandistriktet i Kina. I andra länder har man påvisat samband mellan lågt selenintag och vissa former av cancer. Selen är också ett toxiskt spårämne och intag av stora mängder selen (mer än 5 mg per dag) kan leda till selenförgiftning som bl.a. medför illamående, kräkningar samt förändringar i hår och naglar. Höggradig exponering kan ge toxiska effekter på nervsystemet. Sverige är dock känt för att vara selenfattigt och svenskodlade grödor har i regel låg halt av selen, vilket nödvändiggör tillskott av selen till växande djur. Däremot har man inte i Sverige kunnat påvisa några negativa effekter på människans hälsa till följd av lågt innehåll av selen i livsmedel. Fisk och skaldjur liksom inälvsmat (lever, njure), importerad spannmål och nötter är viktiga selenkällor i den svenska kosten. Inom djuraveln tillsätter man ofta selen i fodret åt dräktiga djur och växande individer för att motverka bristsjukdomar, bl.a. i form av muskelförsvagning. Förgiftning hos boskap på grund av selensamlade växter förekommer i bl.a. USA. Hos hästar och kor kan stora doser selen ge förgiftningssymtom i form av hov- och klövsprickor, hálta och håravfall.

Medianhalten av selen i kartområdets moräner är lägre än i landet i övrigt. En del förhöjda halter kan bl.a. ses i granodioritområdena kring Kiruna, men också kopplat till basiska bergarter. En tydlig gräns mellan moränområden med lågt respektive något högre innehåll av selen syns vid Lainiobågens

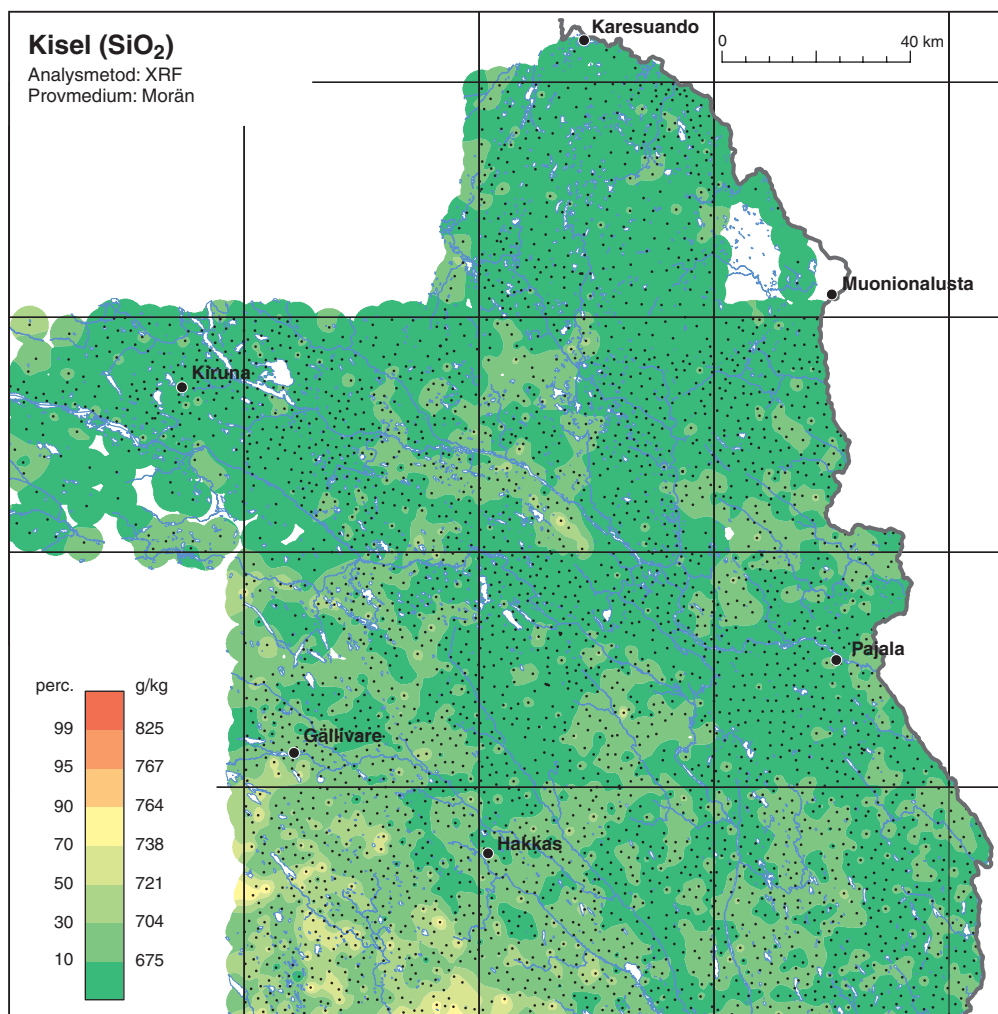
norra del. Deglaciationen har lämnat spår i form av talrika isälvsrännor som påverkat underlaget och genom kraftig ursköljning och vittring lämnat stora områden där lätttrörliga element lakats ur. Flera exempel kan ses söder och sydväst om Kiruna samt norr om Pajala, Tärendö och Niilivaara. Från Vit-tangi i isrörelseriktning mot norr och nordost finns dock en tydlig selenanomali över berggrund med stor andel gabbro, som upphör tvärt mot nordost, söder om Lannavaara. Selenhalterna i moränerna följer generellt relativt väl utbredningen av basiska bergarter. Selen följer svavel i den geokemiska cykeln och i undersökningsområdet är det med svavel det främst finns korrelation och likheter i kartbilden. Det finns också en svag korrelation med koppar, arsenik och molybden.

Kisel (Si)

Kisel är, näst syre, det vanligaste elementet i den kontinentala jordskorpan och utgör basen för den största mineralgruppen (silikater). Kisel ingår i ett stort antal av de vanligaste mineralen (t.ex. kvarts, fältspat och glimmer) och uppträder i höga halter i sura, magmatiska och vulkaniska bergarter (t.ex. graniter och ryoliter) samt i sedimentära bergarter (sandstenar, kvartsiter, skifferar).

Basiska bergarter har betydligt lägre halter och i kalksten är halterna mycket låga. Vid vittring av lättlösliga mineral är kisel lätttrörligt särskilt under alkalina förhållanden. Väl löst i vatten tas det lätt upp av växter. I en del växter, exempelvis ris, ackumuleras kisel i högre grad än i andra växter.

Människans behov av kisel är inte tillräckligt utrett, men man vet att behovet finns hos djur och mikroorganismer. Kisel ingår som en viktig komponent i brosk, bindvävnad, senor, leder, hår och hud.



Djurförsök har visat förändringar i broskmatrisen vid intag av kiselfattig föda. Forskning har också visat att den stress som tävlingshästar utsätts för markant ökar behovet av kisel.

Oberoende av förekomstform är kisel svårslösligt, till och med vid användning av starka syror såsom 7M salpetersyra och kungsvatten. Vid syralakning löses sällan mer än någon tiondels procent av kisel. Därför används endast totalhalter av kisel i SGUs undersökningar. Provberednings- och analysmetoden medför dock att analyskvaliteten för kisel är relativt låg, och istället har ett teoretiskt kiselvärde använts. Detta teoretiska värde baseras på summan av övriga oxider (vilka har en betydligt bättre analyskvalitet). En viss osäkerhet finns dock angående t.ex. förekomsten av kol i proven, varför resultaten ska behandlas med försiktighet.

Halterna av kisel i området är genomgående mycket låga i förhållande till riket i övrigt. Detta förklaras av att inslaget av kisel från sura bergarter är lågt och de andra oxiderna (t.ex. magnesium, kalcium) är anrikade. Generellt vittrar inte heller sura bergarter lika snabbt som basiska bergarter. Därför korrelerar kisel negativt med magnesium och aluminium. Detta kan ses i kartbilden i den nordöstra och östra delen av det karterade området vilket domineras av förekomster av basiska vulkaniska bergarter. Endast i sydvästra delen av området uppträder halter som närmar sig normalnivå jämfört med riket i övrigt, vilket antas bero på att där finns större områden med granitoider. Kisel är orörligt och svårt att laka ur under det låga pH som dominerar Norrbottens moräner.

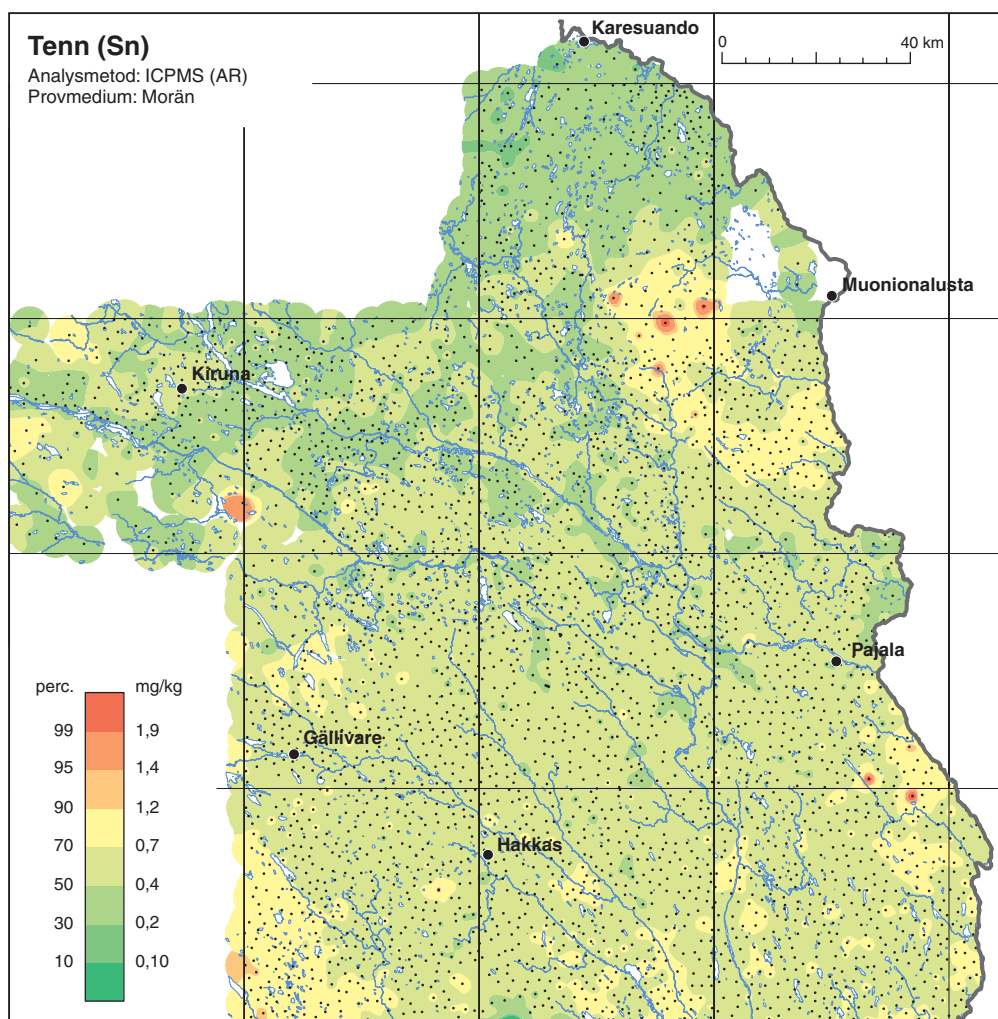
Fördelningen av kisel i kartområdets morän påminner delvis om distributionen av zirkonium, uran och wolfram, vilket är en följd av att samtliga av dessa element normalt är utmärkande för sura bergarter.

Tenn (Sn)

Spårelementet tenn förekommer med relativt höga halter i skiffrar, graniter och granodioriter och med lägre halter i basiska bergarter, sandstenar och kalksten. Tenn kan ingå i mineral som titanit, men förekommer också i mineralform som kassiterit (SnO_2) i högt tempererade malmgångar samt i pegmatiter. Metallen uppträder också i greisengångar i vissa graniter. Ibland förekommer tenn i vissa graniter och pegmatiter i halter som kan vara brytvärda. I regel ingår det då i kassiterit som är en svår-lakad oxid. Accessoriska mineral i dessa bergarter kan, förutom kassiterit, vara wolframit, arsenikkis, vismutglans, topas, turmalin, kvarts och glimmer. Tenn kan också förekomma i en del malmer, t.ex. i mineraliseringar av VMS-typ, i bandade järnmalmer och i skarnjärnmalmer. Tenn kan också till viss del ingå i glimmermineral och amfiboler, och metallen kan ersätta titan och järn i titanit, ilmenit, rutil och magnetit. Eftersom metallen har en tendens att bindas till organiskt material förekommer den också i kol. Vid vittring är tenn inte särskilt rörligt, men kan i sur miljö mobiliseras och binds då åter i sekundära järn- och aluminiumföreningar och i lermineral.

Metalliskt tenn är i princip inte giftigt. Inandning av tenn i hög koncentration under längre tid kan ge en godartad pneumokonios. Intag av större mängder tenn, tiondelar av gram, kan ge akut illamående och kräkningar. Organiska tennföreningar är däremot mycket giftiga. De orsakar centralnervös påverkan med symtom som t.ex. krampanfall och hallucinationer. De kritiska effekterna är påverkan på det centrala nervsystemet och slemhinneirritation. Lite är dock känt om tenns förekomst i biologiska media. Det finns uppsatta gränsvärden för tenn, men endast för organiska tennföreningar.

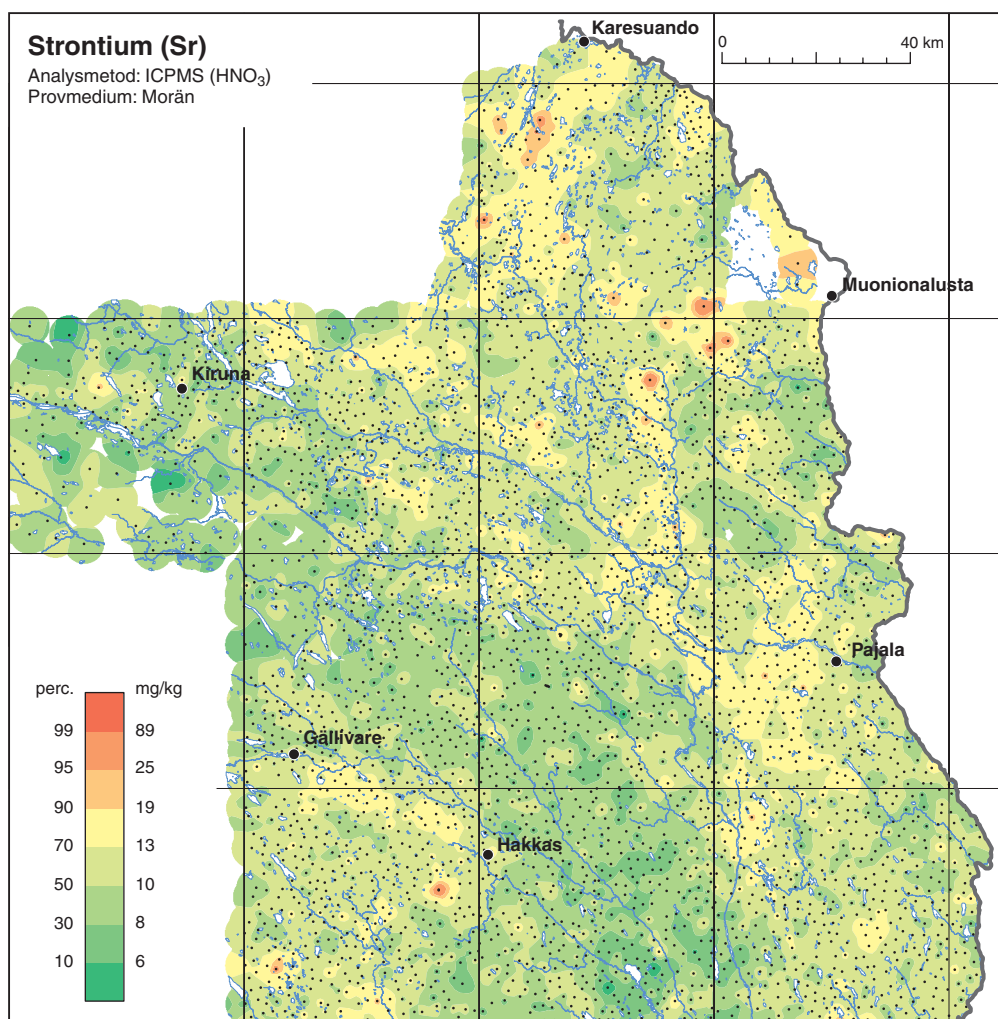
Så gott som samtliga tennhalter i undersökningsområdet understiger 1 mg/kg. Medianhalten för tenn är lägre än i landet i övrigt. Kartmönstren för tenn lakat med kungsvatten och tenn lakat med salpetersyra är snarlika, däremot saknas en statistisk korrelation mellan analysmetoderna ($r = 0,1$). Korrelationer med andra element är också svaga, men finns i viss mån för salpetersyralakat tenn med silver, rubidium, torium, titan, uran och yttrium. Metallen har något förhöjda halter i vissa områden med graniter, granodioriter och sura vulkaniter, t.ex. väster, sydväst och sydost om Kiruna, i sydvästra delen av kartområdet samt sydost om Pajala. Haparandasvitens bergarter har förhöjda tennhalter (Öhlander 1984) som kan vara en källa till de förhöjda tennhalterna i morän nordväst och norr om Parkalompolo. Enligt SGUs fyndighetsdatabas finns inga kända tennförekomster i undersökningsområdet.



Strontium (Sr)

Strontium är en av de s.k. alkaliska jordartsmetallerna. I naturen förekommer strontium som karbonat (strontianit, SrCO_3) och som sulfat (celestin, SrSO_4). Strontium följer kalcium i den geokemiska cykeln och högst innehåll återfinns i kalkstenar. Elementet förekommer också i kalciummineral som t.ex. pyroxen och plagioklas i basiska bergarter och i lägre grad i skiffrar och graniter. Bland vanliga bergarter innehåller gabbro ungefär dubbelt så hög strontiumhalt som granit, men de högsta halterna relateras oftast till magmatiska karbonatbergarter. Strontium följer och kan ersätta kalcium och barium tack vare liknande jonradier och kan därmed också uppträda i kalifältspat. Vid vittring binds mobiliserat strontium till karbonater, lermineral och organiskt material.

Förhöjda totalhalter av strontium i morän finns i de allra nordligaste delarna av undersökningsområdet, längs hela finska gränsen samt söder om en zon som löper mellan Dundret, Aitik och Niilivaara. I väst dominerar låga strontiumhalter, särskilt i området kring Kiruna. Strax söder om Gällivare, vid Dundret, finns en positiv anomali som är tydligt knuten till intermediära, basiska och ultrabasiska bergarter. Kartan för syralakat strontium påvisar en något annorlunda bild. Höga strontiumhalter finns i två distinkta zoner. Den ena omfattar de nordligaste, centrala och östligaste delarna av undersökningsområdet, medan den andra återfinns i det sydvästra hörnet av kartområdet. Dessa zoner separeras av ett cirka 50 km brett bälte som löper i nordvästlig riktning. I bältet, som huvudsakligen domineras av låga strontiumhalter, hittas även ett antal fläckvisa positiva anomalier. Den största av dem återfinns ca 15 km väster om Kiruna.

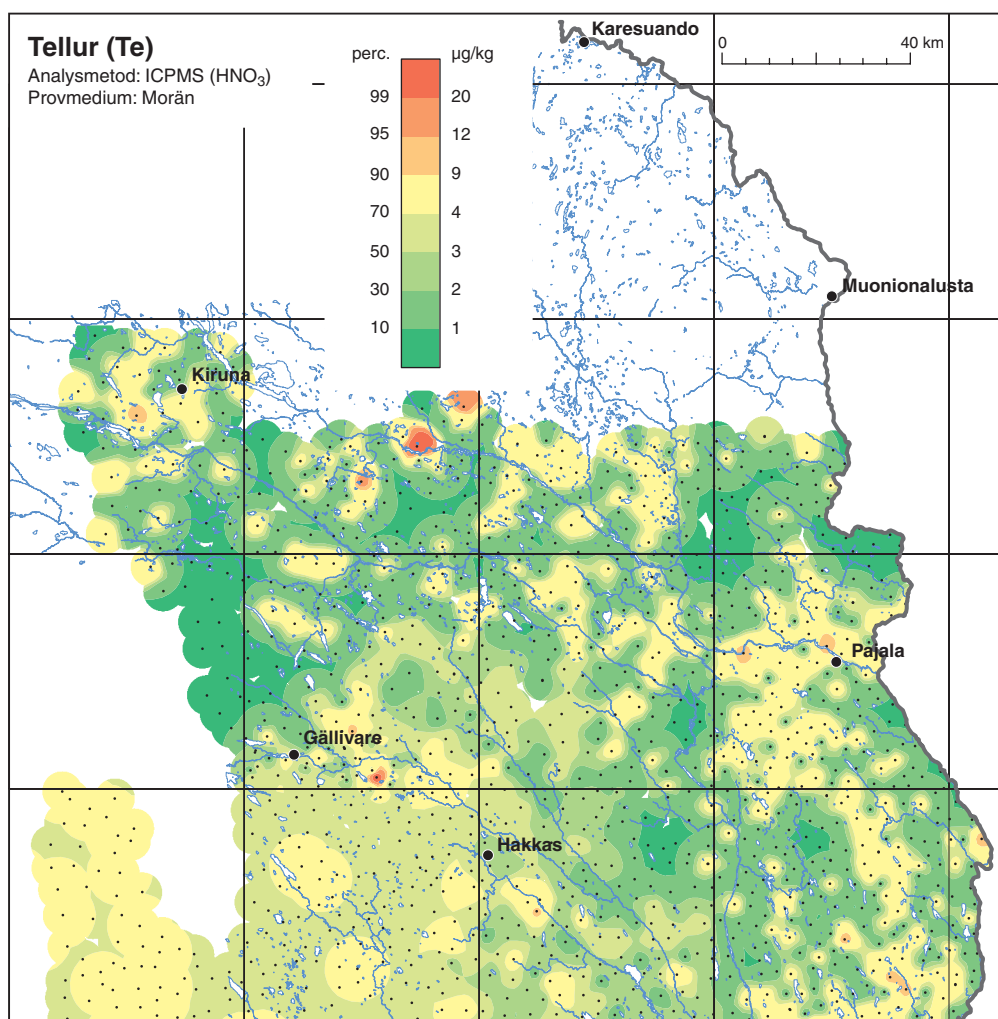


Syralakat strontium reflekterar hydrotermala bergarter bildade av processer som är kapabla att anrika strontium, exempelvis genom sur urlakningsmetasomatos, vilket kan observeras tydligt i områdena runt kopparmalmen Aitik (fig. 11) och vid Undre Haukiseriens sericitkvartsiter (fig. 10). I området strax norr om Malmberget återfinns också förhöjda strontiumhalter som sannolikt är förknippade med de i området utbredda hydrotermala kvartsiterna.

Medianvärdet för såväl totalhalt som syralakbar halt av strontium i undersökningsområdets moräner är högre än landet i övrigt. Medianen av den totala strontiumhalten ligger på 231 mg/kg, medan den syralakbara delen når 11 mg/kg. Lakbarheten är därmed ganska låg (5 %). Totalhalterna av strontium korrelerar positivt med barium och kalcium. Syralakat strontium korrelerar positivt med sådana element som barium, kalcium, magnesium och natrium.

Tellur (Te)

Tellur är en metalloid som tillhör grupp 16 i det periodiska systemet, tillsammans med bl.a. osmium, svavel och selen, och som normalt uppträder i mycket låga halter i såväl bergarter som jordarter (µg/kg). I jordskorpan är tellurhalterna låga (ca 2 µg/kg). Tellur ingår i sulfider, hydrotermala mineral och lågtemperaturmineral i ytlig miljö, t.ex. tellurit. Tellur förekommer främst i form av tellurider och de viktigaste är guld- och silvertellurider, t.ex. calaverit, AuTe₂, och sylvanit, (Au,Ag)Te₄. Därför är tellur ett viktigt ämne vid guldprospektering. Genom vittring sprids tellur i oxiderad form (tellurit) och kan adsorberas av järnhydroxider. Tellur visar ganska låg mobilitet i jord och vatten.



Tellur används i koppar- och stålindustri, i keramisk industri och som antikorrosivt medel. Tellur är viktig som halvledare i elektronik. Några former av tellur är giftiga och irriterande hos människors och djurs andningsorgan.

Tellur ingår för närvarande inte i SGUs analysprogram. Tolkningen baseras enbart på resultaten från NSG-databasen. Det bör noteras att denna saknar täckning i områdets nordligaste del. Eftersom NSGs databas innehåller resultat med olika analysnivåer, bör analysvärdena och kartans klassindelning betraktas som indikativa.

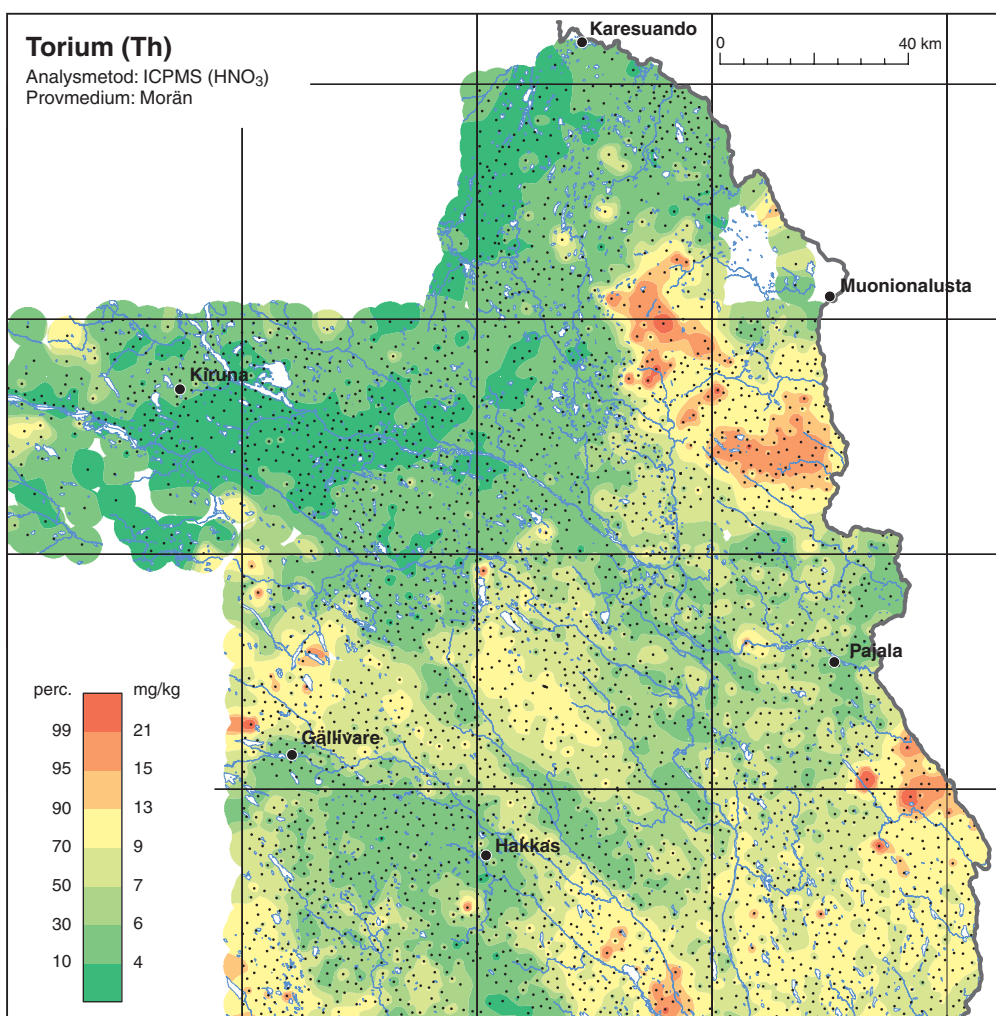
I moränen är halterna generellt låga och bara lokalt finns svagt förhöjda halter (ca 30 µg/kg). Dessa återfinns i området med den enda dokumenterade palladiumfyndigheten, Pahtohavare Västra 1, sydväst om Kiruna. En stark anomali finns i Aitikområdet med koppar- och guldförekomster.

Anomalier belägs ca 21 km väster om Kiruna, 10 km sydväst om Svappavaara och nordnordväst om Vittangi ansluter till förekomster av metamorfa vulkaniter, basiska bergarter och koppar-, järn-, zink- och apatitmineraliseringar som finns i området. De flesta områden med förhöjda tellurhalter kan kopplas till moräner med inslag av basiska bergarter och sträcker sig diagonalt i riktningen nordväst-sydöst genom det karterade området. Dessa områden med höga tellurhalter korrelerar med magnesium-, nickel-, koppar- och guldanomalier. Även en magnetisk anomali följer den trenden (fig. 7). Förhöjda tellurhalter observeras kring Pajala i områden med järn-, koppar-, nickel- och guldmineraliseringar (t.ex. Peräjävaara, Rytivaara, Kursunoja). Förhöjda tellurhalter i morän i kartområdet uppträder i regioner som också är förhöjda på järn, mangan, scandium, vanadin, kobolt, nickel, zink, kadmium och koppar.

Torium (Th)

Torium är allmänt förekommande i jordskorpan och medelhalten uppskattas till 5,6 mg/kg (Rudnick & Gao 2003). Torium är liksom uran radioaktivt och den mest stabila isotopen är torium-232 med en halveringstid på $1,4 \times 10^{10}$ år. Det radioaktiva sönderfallet bidrar till jordvärmen. De viktigaste mineralen är oxiden torianit, silikatet torit och fosfatet monazit. Torium ingår också som accessoriskt element i t.ex. apatit, biotit, epidot, titanit, zirkon, xenotim och uraninit. Torium har liksom uran högre halt i granitiska magmor än i basiska, och har därmed högre halter i graniter, pegmatiter, gnejser och granodioriter än i basiska bergarter. Torium är allmänt associerat med kalium och uran och kan exempelvis uppträda i pegmatiter, graniter, granodioriter, skiffrar och gnejs tillsammans med litium, rubidium, beryllium, uran, zirkonium och sällsynta jordartsmetaller m.fl. Eftersom torium kan ingå i biotit blir det inte lika koncentrerat i pegmatit som uran. Orsaken är att biotit bildas i ett tidigt skede i en stelnande magma medan uran förblir i den restlösning som bildar pegmatit. Under alla förhållanden är torium svårslösligt. Organiska syror ökar lösligheten, men torium faller lätt ut som oxid eller fosfat. Löst torium binds normalt snabbt till lermineral. Därmed är torium anrikt i skiffrar (alunskiffer har dock inte speciellt förhöjda toriumhalter) men förekommer med låga halter i sandstenar och kalkstenar.

De naturligt förekommande toriumföreningarna är extremt svårslösliga och torium har inte någon biologisk funktion. Fyrvärt torium har samma jonradie som kalcium och kan därför ersätta detta ämne i biologiska system; efter intag av torium återfinns det oftast i benvävnad. På grund av sin extrema svårslöslighet utgör torium normalt inte någon kemisk hälsorisk, men genom sin radioaktivitet utgör



elementet och dess föreningar en radiologisk hälsorisk, framför allt genom att radon bildas i sönderfallskedjan. Den radonisotop (radon-220) som bildas i sönderfallskedjan för torium-235 har dock en halveringstid på bara 55 sekunder, och detta radon hinner ofta inte transporteras någon längre sträcka innan det sönderfaller. Antropogena källor till torium är konstgödsel, brytning och anrikning av uran samt förbränning av kol.

Toriumhalten i mark, berg och vatten kan mätas med kemiska analysmetoder och med geofysiska metoder (gammaspectrometer på berghäll och från flygplan). Det är stor skillnad i metodiken. Kemisk analys mäter på jord (vid SGUs kartering på fraktionerna <0,063 mm eller <2 mm) i ett väldefinierat jordlager. Spektrometern ger ett medelvärde över en volym och vad gäller flygspektrometern är mätresultatet utjämnat över berg, jord, vatten etc. Metoderna korresponderar ganska väl i storskaligt perspektiv medan de i mindre skala kompletterar varandra.

I undersökningsområdet uppträder salpetersyralakbart torium i relativt låga halter i moräner. Norr om Gällivare förekommer ett område dominerat av granitberggrund med toriumhalter högre än 10 mg/kg. Norr om detta, där graniter är underordnade, överstigs halter på 4 mg/kg relativt sällan. I sydvästra hörnet av kartområdet och sydost om Hakkas förekommer förhöjda toriumhalter kopplade till förekomster av sent paleoproterozoiska graniter och pegmatiter. Höga toriumhalter mellan Korpilombolo och finska gränsen anknyter till förekomster av glimmerrika metasedimentära bergarter (glimmerskiffrar, kvartsiter och sandstenar) samt graniter och pegmatiter. En vidsträckt anomali mellan Lainio och finska gränsen har sitt ursprung i yngre (ca 1,8 miljarder år gamla) intrusiva bergarter, t.ex. Linagranit och pegmatiter. En stark magnetisk anomali förekommer i samma område (fig. 7).

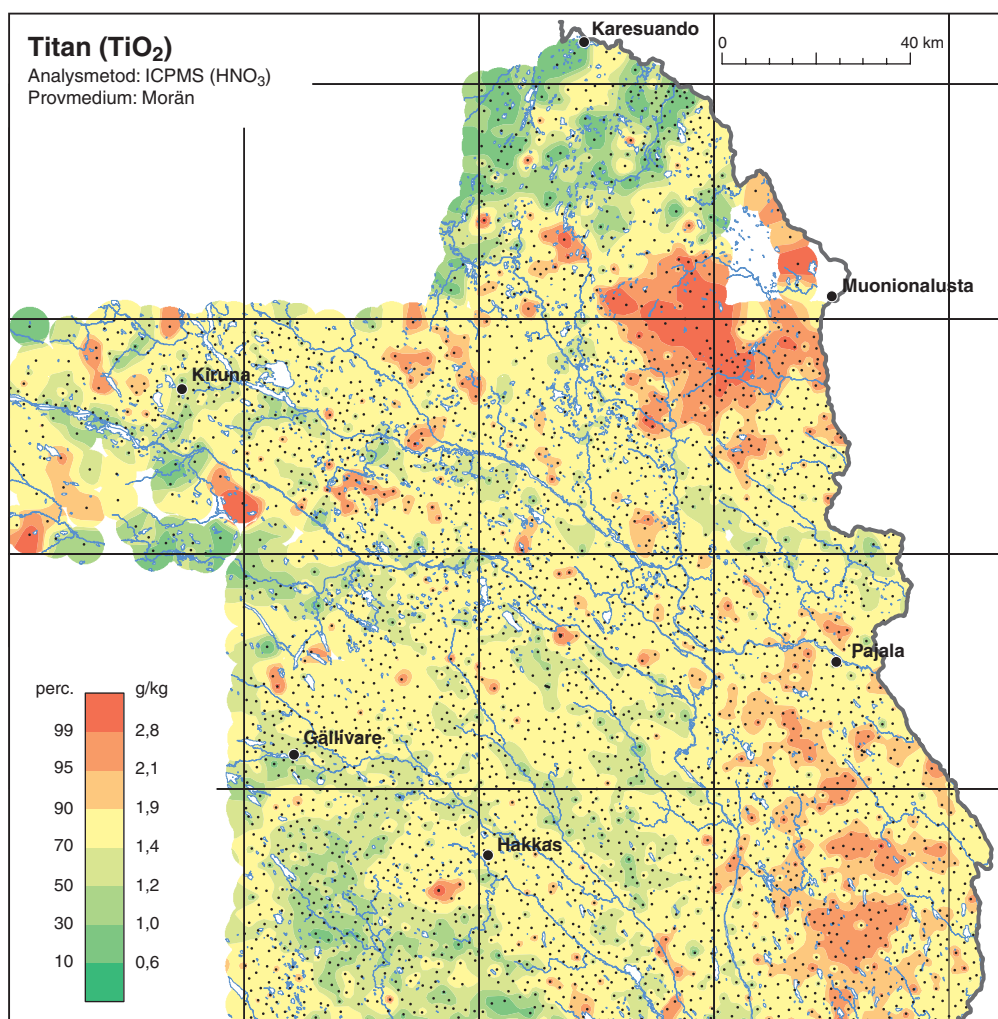
Torium är framför allt korrelerat med lantan, yttrium, uran, bly, silver, tallium, litium, beryllium och tenn vilka associerar till granitiska bergarter.

Titan (Ti)

Titan förekommer med högst halt i bergarter som gabbro, diorit, vissa graniter samt gråvackor. Elementet uppträder i mineral som titanit, rutil och ilmenit, men förekommer också i glimrar och granater och i mörka mineral som amfiboler och pyroxener. Ilmenit uppträder även som lameller i magnetit, vilket gör att titan även finns i magnetitförekomster. I vissa pegmatiter och graniter kan titan förekomma tillsammans med uran, torium, fosfor, tenn, wolfram, litium, beryllium m.fl. Titan kan ersätta bl.a. magnesium och järn i kristallgittren och kan uppträda tillsammans med bl.a. mangan, magnesium, järn och vanadin i silikater och sulfider. Elementet förekommer vanligen i mineral som är resistent mot vittring, och i vittringsprocesser anses elementet svårslutligt oavsett förekomstform. På grund av den låga mobiliteten anrikas titan i markens övre partier vilket har utnyttjats för vittringsberäkningar. Rörligt titan binds lätt till lerpartiklar och ju högre lerhalten är desto högre är titaninnehållet (Reimann m.fl. 2003). Titan adsorberas också till järn- och manganoxider. Studier med titan lakat med syra visar dock att metallen lakas tämligen effektivt ur titanit och om titanet är biotitbundet lakas elementet till över 50 % (Snäll & Liljefors 2000).

Titan antas ha en funktion för fotosyntesen och kvävefixeringen och kan ha en positiv effekt på vissa grödor. Någon direkt giftverkan är inte känd. Inandning kan ge deponering i lungan men inte lungfibros.

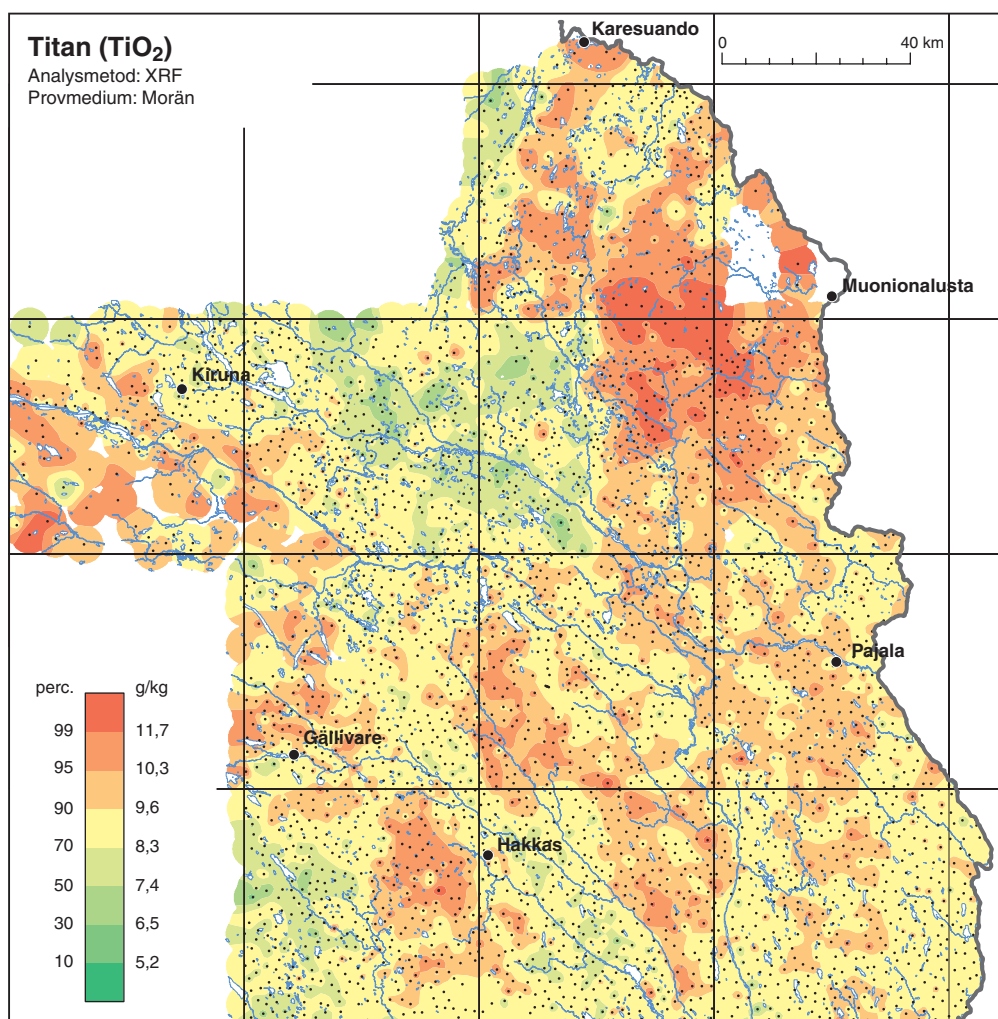
De högsta totalhalterna i morän hittas i de östra delarna av undersökningsområdet, nära finska gränsen, i områdena mellan Pessinki och Muonionalusta, samt sydväst om Kiruna. Förhöjda totalhalter av titan iakttas för övrigt i stort sett i hela kartområdet undantaget den sydvästra delen samt en region norr och nordväst om Masugnsbyn som är begränsad av Lainiobågens norra del. Medianhalten för titan i karteringsområdets moräner är högre än landet i övrigt, något som gäller för såväl totalhalter som för syralakbara halter. Medianvärdet för totalhalten är 9,4 g/kg (TiO₂), samtidigt som den syralakbara halten har ett medianvärde på 1,6 g/kg vilket ger en lakbarhet på cirka 17 %. Kartbilden för syralakat titan är något annorlunda, jämfört med totalhalterna. De högsta värdena hittas i områdena



mellan Korpilombolo och Svanstein samt även mellan Pessinki och Muonionalusta. Den allra högsta titanhalten (10,9 g/kg) återfinns sydost om Lannavaara.

Totalhalten av titan korrelerar med aluminium, barium, magnesium, vanadin och zink. Syralakbara halter har en stark korrelation med järn, kalium, rubidium, tallium och vanadin samt något svagare med aluminium, barium, beryllium, lantan, litium, magnesium, mangan, nickel, antimon och zink. Associationen av syralakade elementhalter omfattar en rad element som kan knytas till bland annat biotit och lermineral. Titan som förekommer i biotit är mycket lösligt i 7M HNO₃.

I undersökningsområdet finns ett flertal små titanhaltiga mineraliseringar. Många av dem är knutna till basiska intrusioner innehållande titanförande magnetit eller ilmenit. Ett exempel finns i området strax öster om Gällivare, vid Nunisvaara, där titanförekomsten Vasaravaara är genetiskt associerad med en finkornig norit. Malmmineralen består av såväl titanomagnetit som ilmenit. Titananomalin i Vasaravaaras moränområde återfinns öster om förekomsten, vilket överensstämmer väl med förhärskande isrörelseriktningar.

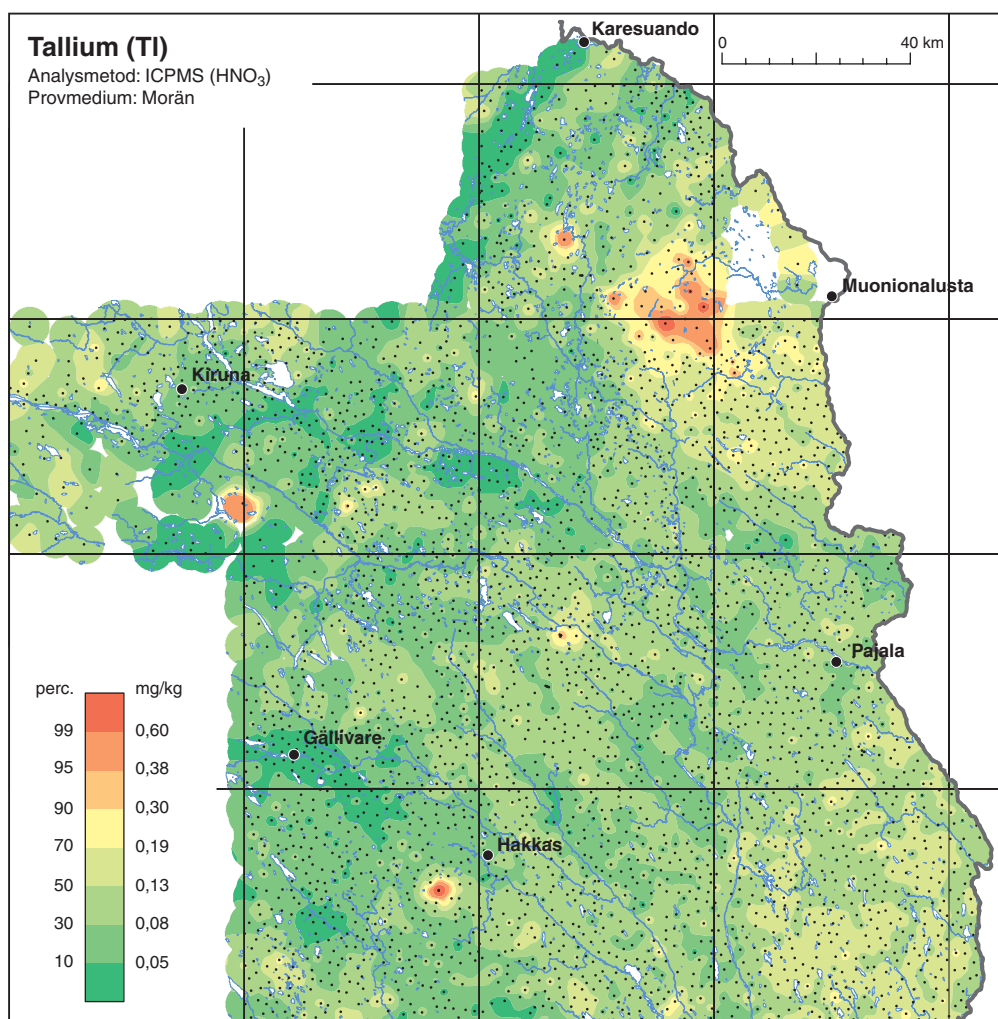


Tallium (Tl)

Tallium är ett vanligt grundämne i jordskorpan. Tallium förekommer bland annat i mineralen crooksit, lorandit och hutchinsonit, men egna mineral är sällsynta. Vanligen associeras tallium till kalium och rubidium eftersom elementets förekomst i bergarter härleds till skiktssilikater (Reimann m.fl. 1998). Metallen finns därför naturligt i olika bergarter, främst i skifferar, graniter och granodioriter. Basiska bergarter har vanligtvis mycket lågt innehåll. Tallium uppträder finfördelat i fältspater och finns i glimrar, men också i sulfider. I störda zoner i pegmatiter och i mineraliseringar med blyglans och zinkblände kan metallen uppträda i mycket höga halter (flera mg/kg). Tallium är ett spårelement som ibland används inom malmprospektering som s.k. "pathfinder"-element för guld. Vid vittring är tallium lätt rörligt, men fastläggs effektivt av organiskt material eller adsorberas till lermineral. Tallium mobiliseras av sjunkande pH och kan lätt läcka ut till yt- och grundvatten. Metallen är mycket giftig, och giftigheten jämförs med den för kadmium, metylkvicksilver och bly. Tallium tas lätt upp av växter, men upptaget varierar beroende på typ av gröda.

Tallium förekommer i naturliga vattendrag med olika oxidationstal. Vanligast är envärt tallium som förekommer i ytvatten. Trevärt tallium återfinns på större vattendjup (Karlsson 2006).

Det är inte känt om tallium är ett nödvändigt ämne, men miljöanalysdata indikerar att det bioackumuleras i akvatiska organismer. Tallium har spårats i fisk och växter. Så vitt man vet har människan inga behov av tallium, det är enbart toxiskt. Talliumföreningar är mycket giftiga och på grund av att de också är vattenlösliga och saknar smak finns det många exempel på användning i kriminella sammanhang. Det är, precis som arsenik, ett lönnmördargift.



Talliumhalterna är låga i undersökningsområdets moräner och medianhalten lägre än i landet i övrigt. Högst uppmätt talliumvärde återfinns vid fyndigheten Puolalaki nordost om Nattavaara. Andra förhöjningar som ansluter till moräner i guldmineraliserade områden är bland annat vid Saivo, Outavaara, Saarikoski och Oriasvaara. Svagt förhöjda talliumhalter tycks i Svappavaaraområdet vara knutna till förekomst av sedimentära bergarter (metaarenit till kvartsit) men i övrigt finns ingen klar koppling till underliggande bergartstyper.

Stark korrelation med järn, magnesium, krom, titan, vanadin, nickel och zink tyder på att tallium förekommer i sulfidform i basiska bergarter. Betydande korrelation finns också mellan tallium och syralakat rubidium, kalium, aluminium och barium och associationen indikerar att skiktisilikater är en annan förekomstform för tallium. De geokemiska mönstren för nämnda element är också snarlika med relativt uthålliga förhöjningar i sydost och i nordost. Den senare, norr och nordväst om Parkalompolo, har två avgränsning åt nordväst och väster där Lainiobågen skiljer talliumrik morän från talliumfattig.

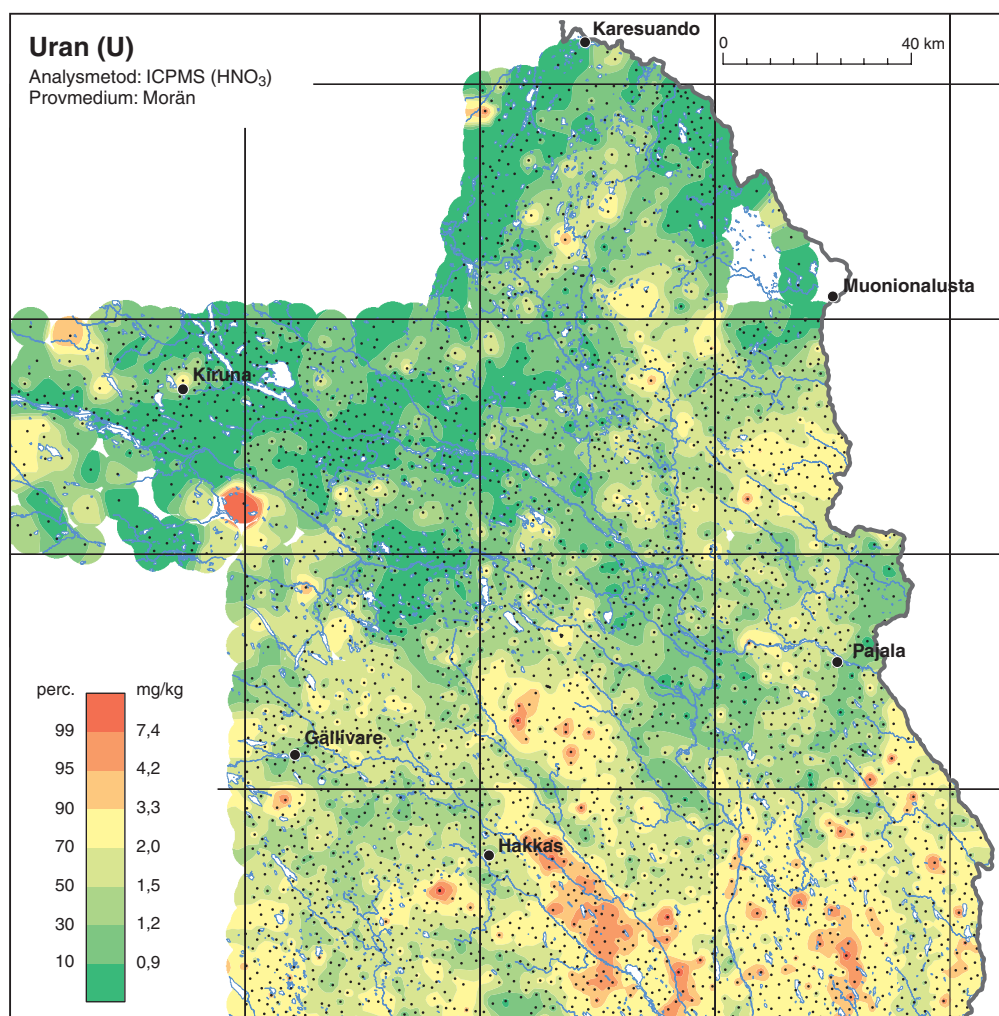
Uran (U)

Uran förekommer i de flesta bergarter och medelhalten i kontinentaljordskorpan brukar anges till 1,3 mg/kg (Rudnick & Gao 2003). Alunskiffer och olika graniter är kända för sina höga uranhalter. Sveriges berggrund är rik på uran och sedan 2005 pågår åter prospektering efter uran i Sverige. Uran uppträder i stort sett i samma bergarter som torium och båda elementen är radioaktiva, men till skillnad från torium är uran under vissa förhållanden mycket mobilt. Uran har tre naturligt förekommande isotoper, av vilka uran-238 är vanligast (99 %). Halveringstiden för uran-238 är $4,5 \times 10^9$ år. Uran bildar

ett flertal egna mineral, bland dessa kan nämnas pechblände (UO_2). Associerat med pechblände kan kassiterit, pyrit, kopparkis, arsenikkis och blyglans förekomma. Uranförande mineral som uraninit (kristalliserad form av pechblände), apatit och allanit (ortit) kan uppträda bl.a. tillsammans med monazit, zirkon och turmalin. Kiselrika magmor (som bland annat bildar graniter) har generellt högre uranhalter än basiska (som bildar t.ex. gabbro och diabas). Pegmatiter bildas ur restlösningar från granitmagmor, dvs. det som är kvar när det mesta av magman stelnat. I dessa restlösningar är grundämnen som inte riktigt passar in i de vanligaste mineralen koncentrerade, t.ex. uran. Uran kan koncentreras vid metamorfos och finns ibland anrikat i skarnbildningar och gnejser. Uran binds till organiskt material och lerpartiklar och är därmed koncentrerat i svarta skiffer, som den svenska alunskiffern. Uran binds också till järnoxider och fosfater. Störst betydelse för uranets mobilitet har pH-värdet.

Till skillnad från de flesta metaller är uran mer lösligt under oxiderande förhållanden och i karbonatrika vatten med högt pH än i sura, reducerande vatten. Sexvärt uran, som är det vanliga i oxiderande förhållanden, förekommer i sur lösning som uranyljon, UO_2^{2+} . Vid högre pH bildas lättlösliga komplex med karbonat.

Uran framställs industriellt för användning som reaktorbränsle i form av kulsar. Under åren 1965–1969 (och i försöksverksamhet fram till 1981) anrikades svensk uran vid Ranstadsverket. Vid förbränning av fossila bränslen och användning av fosfatgödselmedel kan uran få en oavsiktlig spridning i miljön. Råvaran till vanliga gödningsmedel kommer från mineral som apatit och fosforit vilka kan innehålla spår av uran, 1–600 mg/kg, beroende på vilket land råvaran kommer ifrån. Uran sprids också vid användning av ammunition med utarmat uran (DU-ammunition).



Uran i löslig form (som i vatten) tas upp i mag-tarmkanalen, distribueras till blodkroppar, njure och skelett samt utsöndras i urinen, och troligen också i hår. I skelettet är halveringstiden i storleksordningen år. Därför sker en långsiktig ackumulering och ett stationärt tillstånd når man först efter decennier. Eftersom uran frisätts från skelettet i samband med att skelettet ombildas kommer halten i njure att öka under motsvarande tid. Utöver att metallen i sig är toxisk, är uran mer känt för en av sina sönderfallsprodukter, nämligen radon.

Uranhalten i mark, berg och vatten kan mätas med kemiska analysmetoder och med geofysiska metoder (gammaspекtrometer på berghäll och från flygplan). Metoderna korresponderar ganska väl i storskaligt perspektiv medan de i mindre skala kompletterar varandra. Vid SGU används markgeokemiska och geofysiska metoder för att kartlägga uranhalter i den ytliga berggrunden, morän och sediment (på 0,6–1 m djup), biogeokemiska metoder för uran i rinnande vatten samt kemisk analys av grundvattnet. Mätning direkt på berghäll och analys av moränprov är de metoder som enbart ger de naturliga uranhaltarna. Med övriga metoder kan man också fånga upp antropogena effekter (Andersson m.fl. 2007).

Uraninnehållet i kartområdets moräner speglar inslaget av granitiskt bergartsmaterial från undersökningsområdet väl. Högstrålande graniter och pegmatiter av Linatyp och metamorfa intrusivbergarter från Haparandaserien finns norr om Kangos och i sydligaste delen av kartområdet.

Några uranmineraliseringar är kända i det karterade området: REE-mineralisering i Leveäniemi i Svappavaara, uran-koppar-molybdenmineraliseringen Äijärova öster om Svappavaara, järn-apatit-uranmineraliseringen Renhagen ca 33 km sydväst om Kiruna och uran-kopparmineraliseringen i Meuresvare ca 7 km väster om Nattavaara. I Leveäniemi finns svagt förhöjda uranhalter i moränen, medan detta saknas i Äijärova. I Meuresvare finns en liten, stark anomali just vid mineraliseringen. Alla uranmineraliseringar motsvaras av anomalier i flygmätt uran.

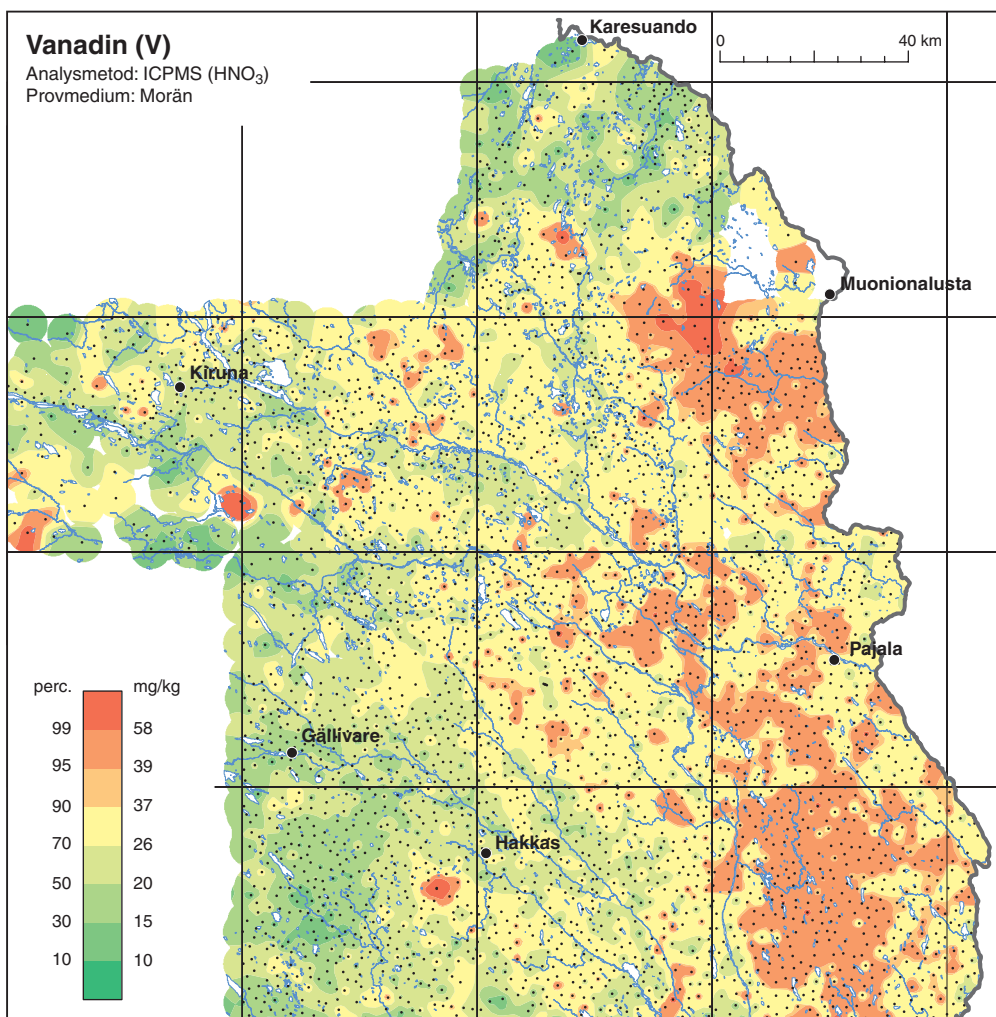
De salpetersyralakade halterna av uran i morän är låga i områdets norra hälft medan de är normala eller förhöjda i söder, nordost och nordväst. I stort sett finns ett samband mellan högre uranhalt i morän och dominans av sura bergarter. Tre prov översteg 10 mg/kg, att jämföra med medianhalten 1,3 mg/kg vilken är nästan lika som medelhalten av kontinentalskorpan (Rudnick & Gao 2003).

Syralakbart uran korrelerar med torium, silver, yttrium och tenn samt svagt med tallium, molybden, beryllium, rubidium, lantan, litium och kalium vilket antyder ett granitiskt till pegmatitiskt ursprung. Faktoranalysen placerar uran enbart i en faktor tillsammans med torium, lantan och yttrium.

Uraninnehållet i moränerna avslöjar att kartområdet på många håll är något anrikat på uran. De områden med förhöjda uranhalter som finns i kartområdet bör ses som riskområden där det kan finnas uranhalter i grundvatten och dricksvatten som överstiger WHO's provisoriska riktvärde på 15 µg/l. Sett ur folkhälsoperspektivet är det den gräns som Socialstyrelsen och Livsmedelsverket också rekommenderar som maximal uranhalt i dricksvatten. Det är dock viktigt att komma ihåg att det kan finnas uranhaltiga grundvatten även i områden där moränen inte är speciellt uranrik eftersom det kan räcka med relativt tunna linser eller små sprickfyllnader i berggrunden med dittransporterat uran för att orsaka förhöjda uranhalter i grundvattnet.

Vanadin (V)

Vanadin förekommer med högst halter i basiska bergarter och i skifferar med organiskt innehåll medan kiselrika bergarter har de lägsta halterna. Metallen har också hittats i en del meteoriter. Man har funnit vanadin i mer än 65 olika mineral av vilka carnotit, roscoetit, vanadinit och patronit är de viktigaste. Vanadin finns i en del järnmalmer (bl.a. i magnetit) och förekommer också i komplexa organiska föreningar i råolja. Vanadin är en metall som ofta ersätter järn i mörka mineral och uppträder därför i regel i samma grupp som elementen järn, magnesium, titan, krom, nickel m.fl. Pyroxen, amfibol, glimrar, magnetit, titanit, rutil och apatit kan alla innehålla vanadin. I järnmalmer kan koncentrationen av vanadin uppgå till flera tusen milligram per kilogram. I Sverige finns fyndigheter med vanadinhaltig järnmalm och vanadinhaltig alunskiffer som enda källor för eventuell utvinning av metallen. Vid



vittring adsorberas metallen till järn-manganoxider, lermineral och organiskt material. Vanadin kan bilda lättlösliga föreningar, men också fällas ut och förekomma i svårösliga former. Dessutom kan vanadin och järn relativt lätt byta ut varandra i järnoxider och lermineral. Rörligheten av vanadin beror på den omgivande miljöns redoxförhållanden, dvs. metallen är mobil i syrefattigare miljö och orörlig i reducerande förhållanden.

Omkring 80 % av det vanadin som produceras används som legeringsmetall, huvudsakligen i form av ferrovanadin i stålindustrin. Vanadin används som legeringsämne i stål för att ge hög hållfasthet, seghet och hårdhet. Det används t.ex. för verktygsstål och snabbstål. Vanadin används också i högtemperaturlegeringar och magnetstål. Det har också föreslagits som kapslingsmaterial för bränsle i kärnkraftverk, varvid dess höga genomsläpplighet för termiska neutroner skulle utnyttjas. En mindre del av vanadinproduktionen används för framställning av kemiska föreningar, särskilt oxider. Spridning till miljön sker genom användning av fossila bränslen, vid oljeraffinaderier och i samband med ståltillverkning.

Vanadin påverkar många viktiga enzymsystem i kroppen och kan vid överdosering innebära risk för fysiologisk obalans. Detta kan i sin tur resultera i en hälsomässig påverkan. Det finns inga klara bevis för att vanadin skulle vara essentiellt (livsnödvändigt) för människor. Det finns dock ett stort behov av ytterligare studier avseende vanadins hälsorisker.

I området är totalhalterna av vanadin starkt förhöjda; i nästan hela området (undantaget sydvästra hörnet) innehåller moränen över 89 mg/kg vanadin, vilket utgör 90:e percentilen för riket i övrigt. I de nordliga delarna har stora områden halter som överstiger 132 mg/kg (99:e percentilen för riket).

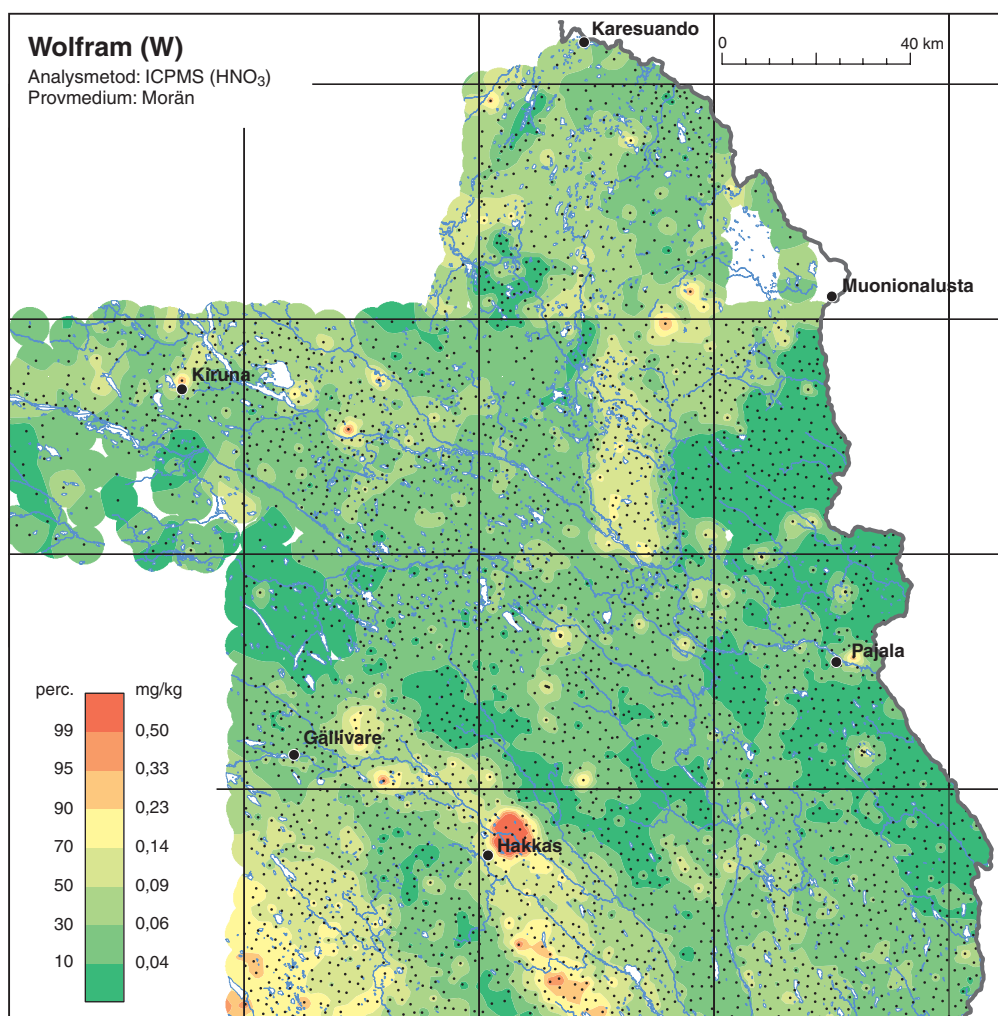
Salpetersyralakade halter ligger på betydligt lägre nivåer och lakbarheten för vanadin (23 %) är lite lägre än för järn (33 %).

Korrelationen med järn är stark och vanadin uppträder i princip med identiskt mönster. Vanadin korrelerar också bra med magnesium, krom, nickel, titan, aluminium, barium, kobolt och koppar. Metallerna indikerar förekomster av basiska och ultrabasiska bergarter i morän och järn-koppar-mineraliseringar till exempel i Svappavaaraområdet, Kirunatrakten, öster om Övre Soppero, väster om Korpilombolo och runt Junosuando och Pajala.

I SGUs mineralfyndighetsdatabas finns tre fyndigheter med vanadin ungefär en mil väster om och nordväst om Vittangi. Dessa ligger i ett område med förhöjda vanadinhalter i morän. Högst vanadinhalt i morän uppmättes sydost om Puolalakimineraliseringen som innehåller arsenik, guld och koppar och som förekommer i basiska bergarter (gabbro). En stor vanadinanomali uppträder i Pessinkitrakten, väster om Muonionalusta. Här är ingen vanadinfyndighet känd och berggrunden domineras av sveko-karelska graniter, granodioriter och tonaliter.

Wolfram (W)

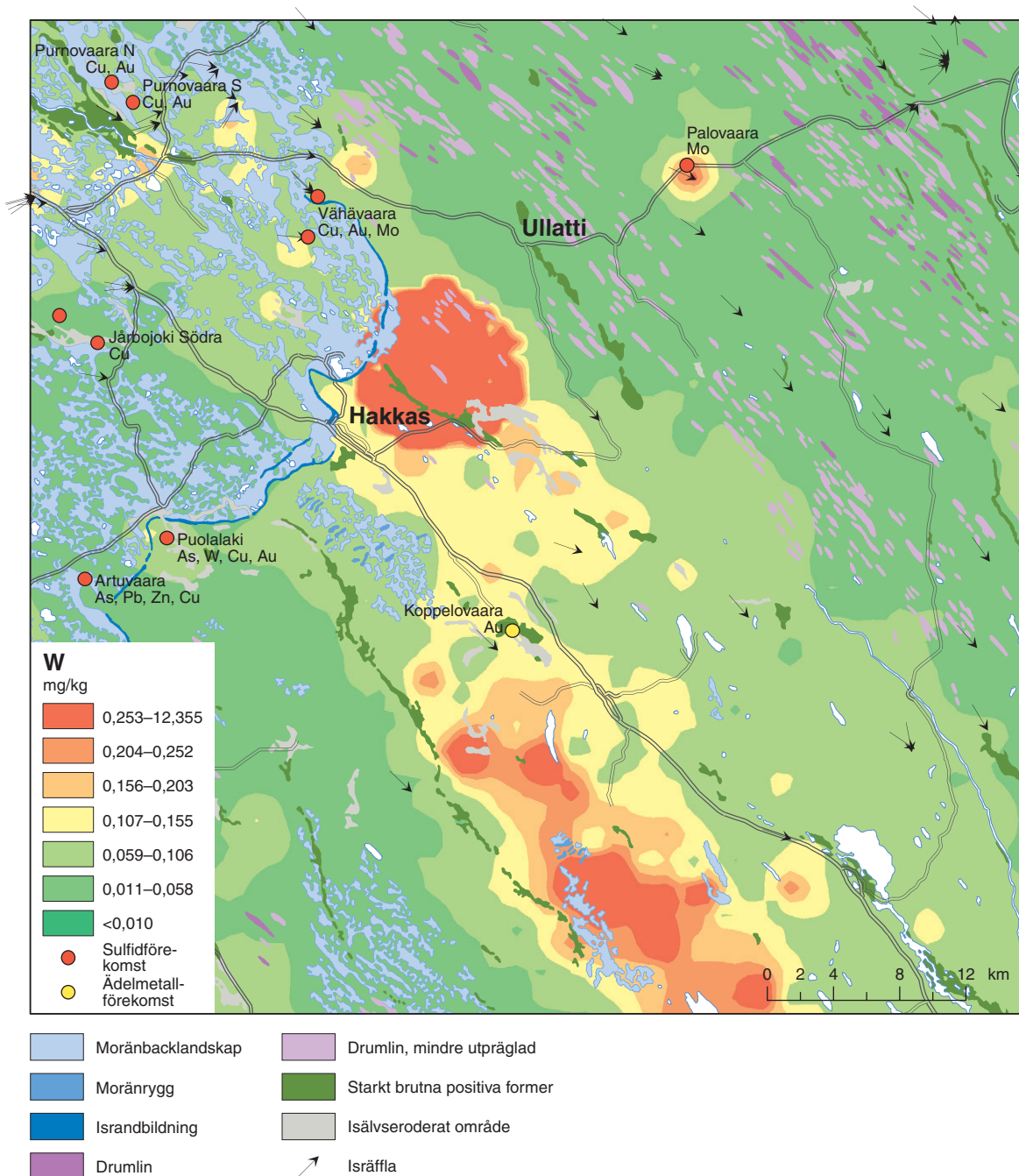
Wolfram är ett relativt sällsynt grundämne i jordskorpan och uppträder normalt i låga halter i jord och berg. Wolfram förekommer med högsta halter i graniter och skiffrar. Metallen finns inte i gedigen form i naturen utan förekommer huvudsakligen i förening med syre som wolframater i ett tjugotal mineral. De viktigaste är scheelit, CaWO_4 , och wolframit, $(\text{Fe,Mn})\text{WO}_4$. I wolframit förekommer metallen i kvartsgångar och pegmatiter associerade till graniter. Mineralet åtföljs ofta av kassiterit,



arsenikkis, turmalin, scheelit, blyglans, zinkblände och kvarts. Scheelit kan påträffas i pegmatiter och hydrotermala gångar och med accessoriska mineral som kassiterit, molybdenglans, fluorit och topas. Vid vittring under alkaliska förhållanden kan wolfram bli mobilt och adsorberas till sekundära manganoxider och leror.

Wolfram räknas till bioelementen men var troligen vanligare i levande system under livets tidigare utvecklingsstadier. Nu finns metallen i enzymer hos vissa anaeroba bakterier som lever vid höga temperaturer. Wolfram är troligen inte livsnödvändigt för människan.

Innehållet av wolfram i undersökningsområdets moräner är generellt lågt. Det finns dock en del spridda, förhöjda wolframhalter i morän exempelvis i sulfidmalmsområdet öster om Gällivare där



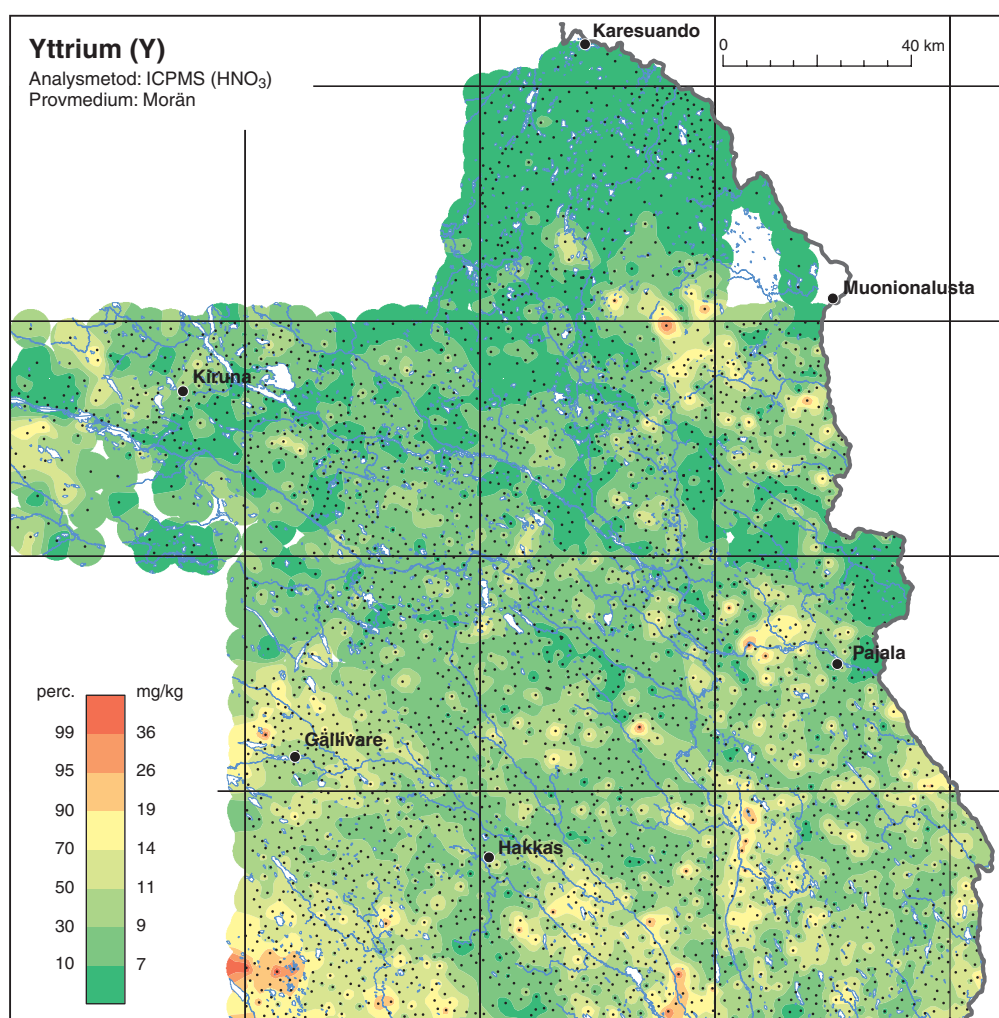
Figur 18. Wolfram anomal i morän i Hakkasområdet (7M HNO₃/ICP MS).

Figure 18. Tungsten anomaly in till near Hakkas (7M HNO₃/ICP MS).

moränen har en tydlig påverkan av västlig isrörelse. Samma förhållande, men med en isrörelseriktning från nordväst, syns i det sydvästra hörnet av kartområdet en förhöjd halt av wolfram som reflekterar granitiska bergarter och eventuellt också sulfider väster om kartgränsen. Mellan Hakkas och Ullatti återfinns kartområdets maximala wolframhalt i moränen i en tydlig anomali som sträcker sig åt sydost (fig. 18). Den högsta halten (13 mg/kg) är mycket hög i jämförelse med andra analysresultat (maximalt 0,6 mg/kg). Sydväst om detta område ligger Puolalaki, en mineralfyndighet som innehåller arsenik, guld, koppar och wolfram. Spår från denna syns inte i kartbilden; däremot finns där en positiv anomali på kartorna över arsenik, guld och koppar. Mellan Puolalaki och moränen med den högsta halten wolfram finns ändmoräner som markerar israndlägen. Väster och nordväst om denna linje präglas landskapet av depositionsformer av morän. Öster om linjen, exempelvis vid Puolalaki, finns istället talrika glaciala erosionsrester i form av isälvsrännor. Nordväst om den kraftiga wolfram-anomalin vid Hakkas ligger Vänävaara och Suorravaara som båda innehåller bl.a. molybden, som är en geokemisk följeslagare till wolfram. Enstaka punktanomalier med wolfram kan också ansluta till kända mineraliseringar, t.ex. nordost om Ullatti där molybdenfyndigheten Palovaara återfinns.

Yttrium (Y)

Yttrium förekommer i jordskorpan i samtliga lantanidmineral och är ungefär lika vanligt som lantan. Spårelementet yttrium finns i stort sett i alla bergarter, men med högre halter i kiselrika djup- och ybergarter, såsom graniter och granodioriter, samt i metasediment (t.ex. skiffrar). Typiska yttrium-mineral är monazit, bastnäsit och xenotim men vanligare är andra värddmineral som apatit, fältspater,



biotit och pyroxener. I exempelvis pegmatiter kan yttrium förekomma tillsammans med ett flertal element, bland dessa kan nämnas uran, torium, rubidium, zirkonium, beryllium och sällsynta jord-artsmetaller. Geokemiskt uppträder yttrium ungefär som lantan, uran och scandium och ingår i en lång rad mineral där det kan ersätta kalcium, fosfor, titan och zirkonium (Koljonen 1992, Salminen m.fl. 2005). Yttriummineral är svårvittrade, men då metallen även förekommer i andra typer av värd-mineral lakas det ut och adsorberas därefter lätt till järnföreningar och till lermineral. Yttrium bildar också karbonater i alkalisk miljö.

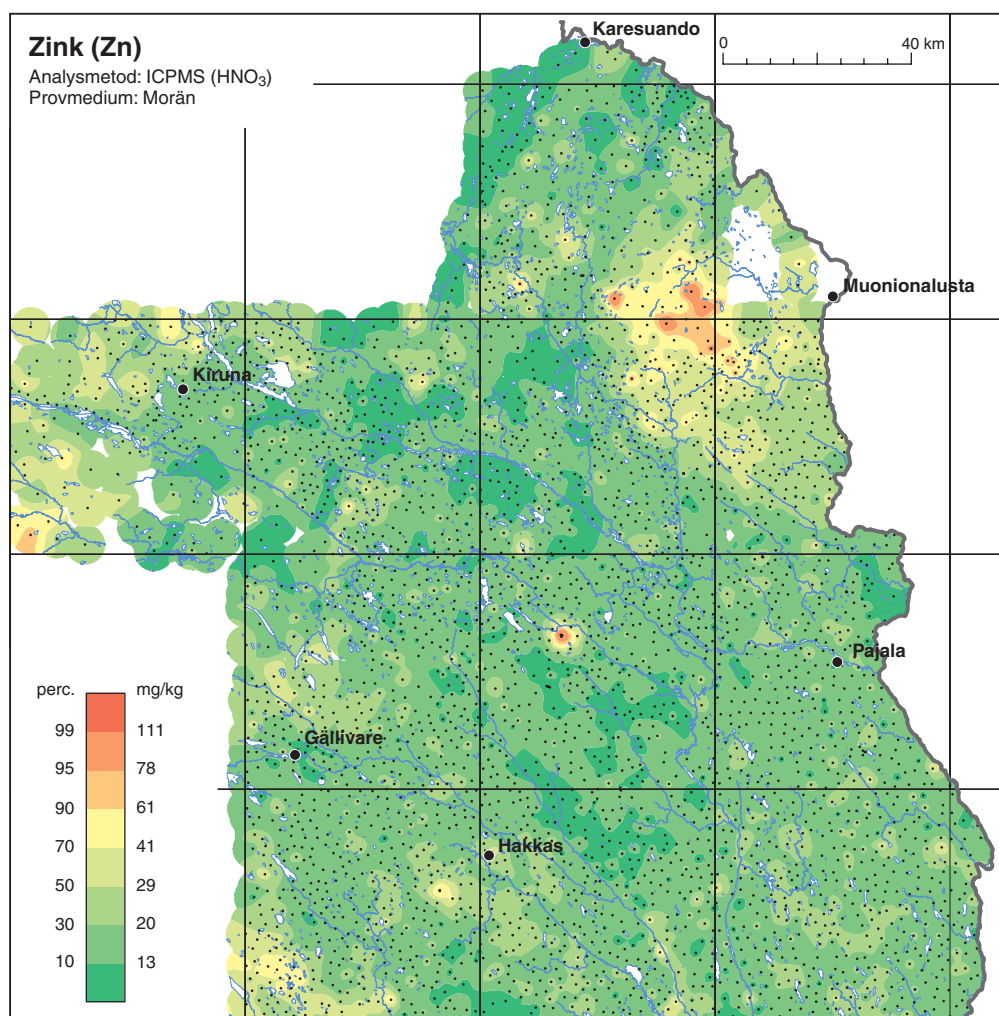
Biokemiskt kan yttrium ersätta kalcium och vissa växter har en förmåga att ackumulera metallen. Yttrium räknas inte som essentiellt för människan. Toxiciteten är låg men inandning kan ge lungskador och även skada levern om det ackumuleras i kroppen.

I undersökningsområdets moräner återfinns måttligt förhöjda yttriumhalter i kartområdets södra hälft, väster om Kiruna samt norr och nordväst om Parkalompolo. De salpetersyralakade yttriumhalterna i moränen är generellt låga och medianhalten ligger något under landet i övrigt.

Korrelation finns med lantan, uran, tenn, antimon, silver och beryllium. Elementassociationen kopplas främst till sura bergarter.

Zink (Zn)

Jordskorpans medelhalt av zink är tämligen låg. Den genomsnittliga zinkhalten hos magmatiska bergarter i den åtkomliga delen av jordskorpan är 45–80 mg/kg. Hos de sedimentära bergarterna är variationen större beroende på karaktären hos det ursprungliga sedimentet. I basiska bergarter och i



skiffrar återfinns oftast de högsta zinkhalterna. Metallen uppträder främst i olika silikater. Jonradien hos zink är tämligen lika den hos tvåvärt järn respektive tvåvärt magnesium. I viss utsträckning kan därför zink ersätta järn och magnesium i mineralens kristallgitter. Mineral som pyroxen, amfibol, granat, magnetit och glimmer kan vara zinkförande. I biotit kan zinkhalterna bli mycket höga. Det viktigaste zinkmineralet är zinkblände (ZnS). Zinkblände uppträder ofta tillsammans med följeslagaren blyglans och andra koppar-, kobolt- och kvicksilverförande sulfidmineral. Geokemiskt är zink associerat med kadmium. Vid vittring är zink lättlösligt i sur miljö men kan bindas bl.a. till lermineral och organiska komplex.

Nivån på zinkhalten i jordar beror i stor utsträckning på det minerogena ursprungsmaterialet. Jordar som härstammar från basiska magmatiska bergarter har höga zinkhalter medan jordar som kommer från mer kisel-syrarika jordar är påfallande zinkfattiga. Zink är i mycket små halter nödvändigt för både växter och djur. Zinkbrist hos vegetationen är sällsynt, men kan förekomma på nära neutrala eller basiska jordar eftersom markens zinkföreningar förlorar sin tillgänglighet vid stigande pH-värden och zinken faller ut som hydroxid. Hos däggdjuren ingår zink i ett flertal enzymer, och i bukspottkörteln medverkar zink i produktionen av insulin. Zink anses också förbättra vår immunitet mot ett antal sjukdomar. Zinkbrist kan leda till försämrad sår-läkning och håravfall.

Totalhaltens medianvärde av zink i undersökningsområdets moräner är lägre (41 mg/kg) än i landet i övrigt (50 mg/kg). Även salpetersyralakats medianvärde av zink (17 mg/kg) ligger på en lägre nivå än rikets genomsnitt (29 mg/kg). Lakbarheten är följaktligen 41 %. Den kraftigaste förhöjningen av zink påträffas i områdena mellan Muonionalusta och Lainio, strax väster om Kiruna och i kartområdets sydvästra hörn. Det förekommer även en del mindre, utspridda, fläckvisa, svaga förhöjningar i trakterna kring Svappavaara, Nunasvaara, Hakkas och Ertsjärvi samt strax norr om Malmberget. Den högsta zinkhalten i morän återfinns i närheten av bly-zink-silvermineraliseringen Kurkkionvaara. Flertalet av zinkanomalierna i morän kan dock inte direkt kopplas till kända sulfidmineraliseringar.

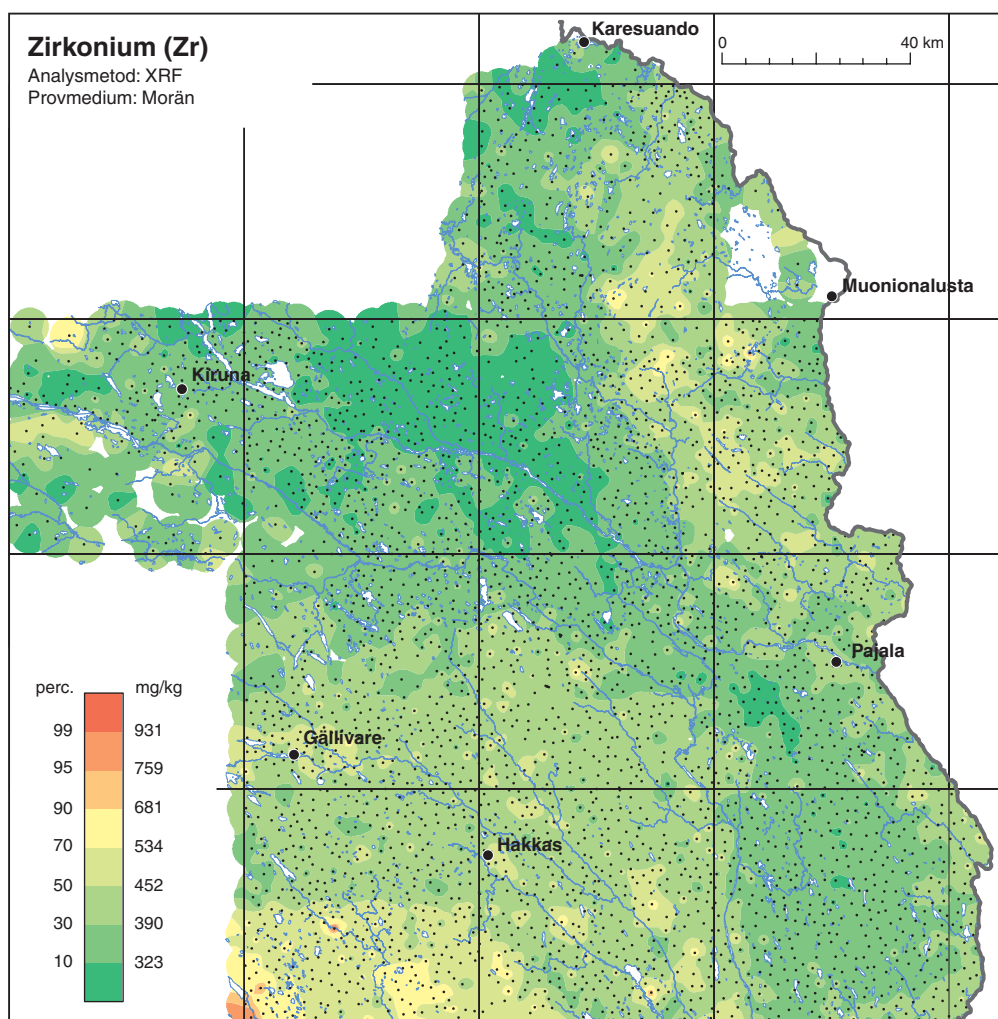
Det finns jämförelsevis få (19) mineraliseringar som innehåller zink i området. Vid den nedlagda Viscariagruvan väster om Kiruna har dock zink brutits. Majoriteten av de zinkförande mineraliseringarna återfinns i norra delen av kartområdet.

I anslutning till zinkförekomsten Huornaisenvuoma vid Saarivaara påträffas en zinkanomali som breder ut sig mot nordost i samma riktning som isrörelseriktningen i området. Hournaisenvuoma utgör för övrigt den nordligaste kända zinkmineraliseringen i Sverige. Det viktigaste zinkförande malmmineralet är zinkblände. De övriga zinkförekomsterna uppträder i områden med låga zinkhalter i moränen. Zink korrelerar bäst ($r > 0,7$) med barium, litium, lantan, rubidium, tallium, kalium, aluminium och titan.

Zirkonium (Zr)

Zirkonium förekommer med måttlig medelhalt i jordskorpan men metallen är vanligare än t.ex. nickel, zink och koppar. Medelvärdet i kontinentalskorpan är 132 mg/kg (Rudnick & Gao 2003). Elementet zirkonium förekommer främst i vittringsresistenta mineral som zirkon (ZrSiO_4) och baddeleyit (ZrO_2) och är knutet till kiselrika bergarter som graniter, granodioriter, pegmatiter, vulkaniter och till sedimentära bergarter som sandsten. Eftersom zirkon är mycket vittringsbeständigt återfinns mineralet i den tyngsta fraktionen av många sand- och sedimentavlagringar, s.k. placers. Zirkonium kan ingå i titanit och kan också påträffas i pyroxener, glimrar, rutil m.fl. Zirkonium uppträder även i omvandlade bergarter, exempelvis gnejser, där äldre led vanligtvis har högre halter av zirkonium än motsvarande yngre led. Basiska bergarter har normalt lågt innehåll av elementet. Zirkonium anrikas i omvandlingsprocesser såväl hos bergarter som vid kvartära vittringsprocesser i marken. Mobiliteten av zirkonium är mycket låg. Från järn-magnesiumsilikater är rörligheten högre och löst zirkonium kan åter bindas till leror.

Zirkonium används främst som kapslingsmaterial till kärnbränsle på grund av metallens låga förmåga att absorbera termiska neutroner och dess goda värme- och korrosionsegenskaper i kombina-



tion med goda mekaniska egenskaper. Zirkonium används också som konstruktionsmaterial inom kemisk industri, där det kan ersätta rostfritt stål och titan, samt som legeringsämne i stål. Finkornigt zirkonium är mycket reaktivt och används i pyrotekniska tillämpningar. Inom medicinen används zirkonium i konstgjorda leder och som benersättning. Zirkonium från antropogena källor sprids visserligen i miljön från kärnbränslehantering och som keramiskt damm, men geologiska källor anses dominera spridningsbilden.

Zirkonium har ingen känd biologisk roll och anses inte heller nödvändigt för människan. Dess hälsoeffekter är inte kända, inte heller toxiciteten. På lång sikt kan det vara carcinogent då zirkonium är en av de långlivade radionuklider som ingått i kärnvapentester. De naturligt förekommande zirkoniumisotoperna (fem stycken) är stabila.

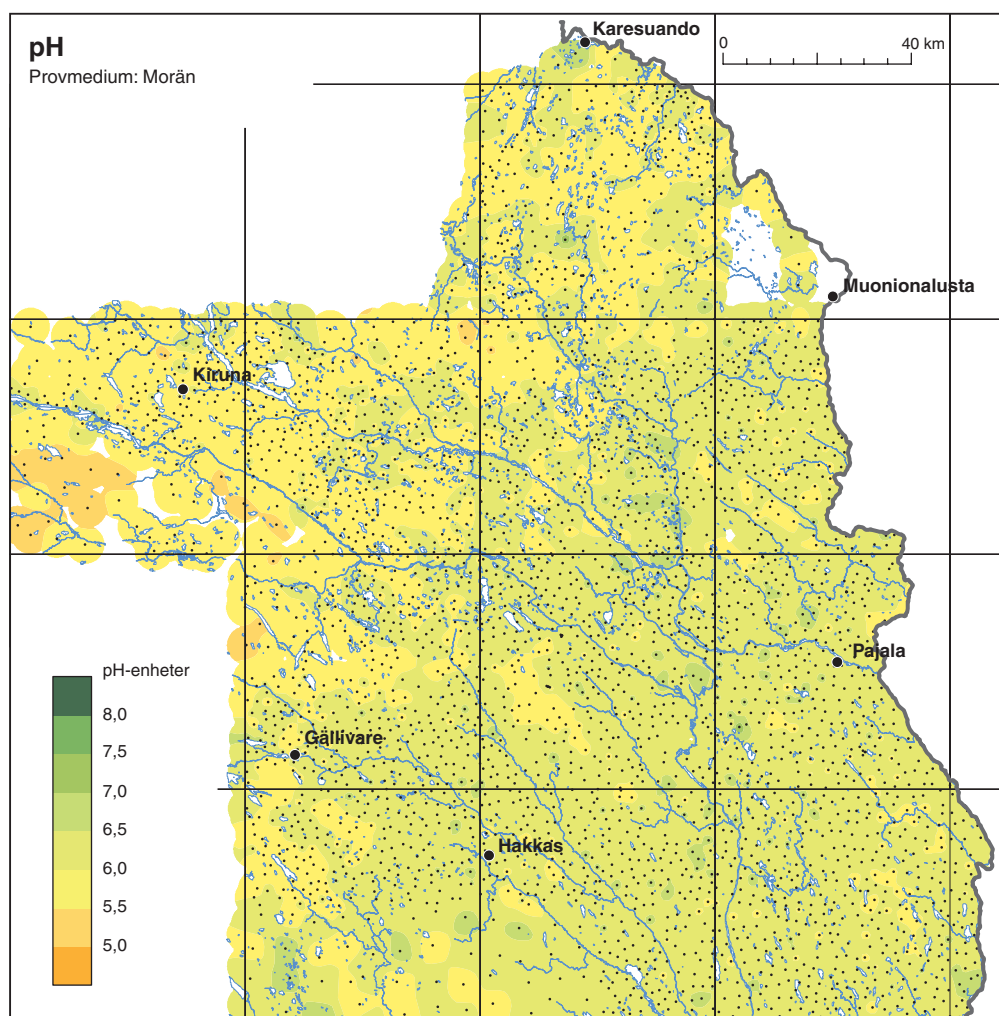
Totalhalterna av zirkonium i områdets morän är lägre än i riket i övrigt (390 mg/kg mot 450 mg/kg), framför allt i kartområdets norra del och i en anomali som sträcker sig från nordväst till sydost. Halten i områdets morän är dock mycket högre än jordskorpan medelhalt (132 mg/kg). Den diagonala negativa zirkoniumanomalin stämmer väl överens med geokemin i övrigt, eftersom element som är typiska för mörka mineral ger en närmast motsatt kartbild. Zirkoniumhalter över 400 mg/kg ansluter till förekomster av sura intrusiva bergarter (graniter, granodioriter, pegmatiter), sura vulkaniter (ryoliter, daciter, andesiter) och metasedimentära bergarter. Karaktäristiskt för den södra delen av området är att moränen även innehåller förhöjda halter av kisel och yttrium. Tillsammans med zirkonium påvisar de tre elementens geokemiska mönster en granitisk association. Salpetersyralakat zirkonium ger mycket låga halter. I moränerna är det bara en försumbar del som löses vid lakning med starka syror (<1 % av totalhalt).

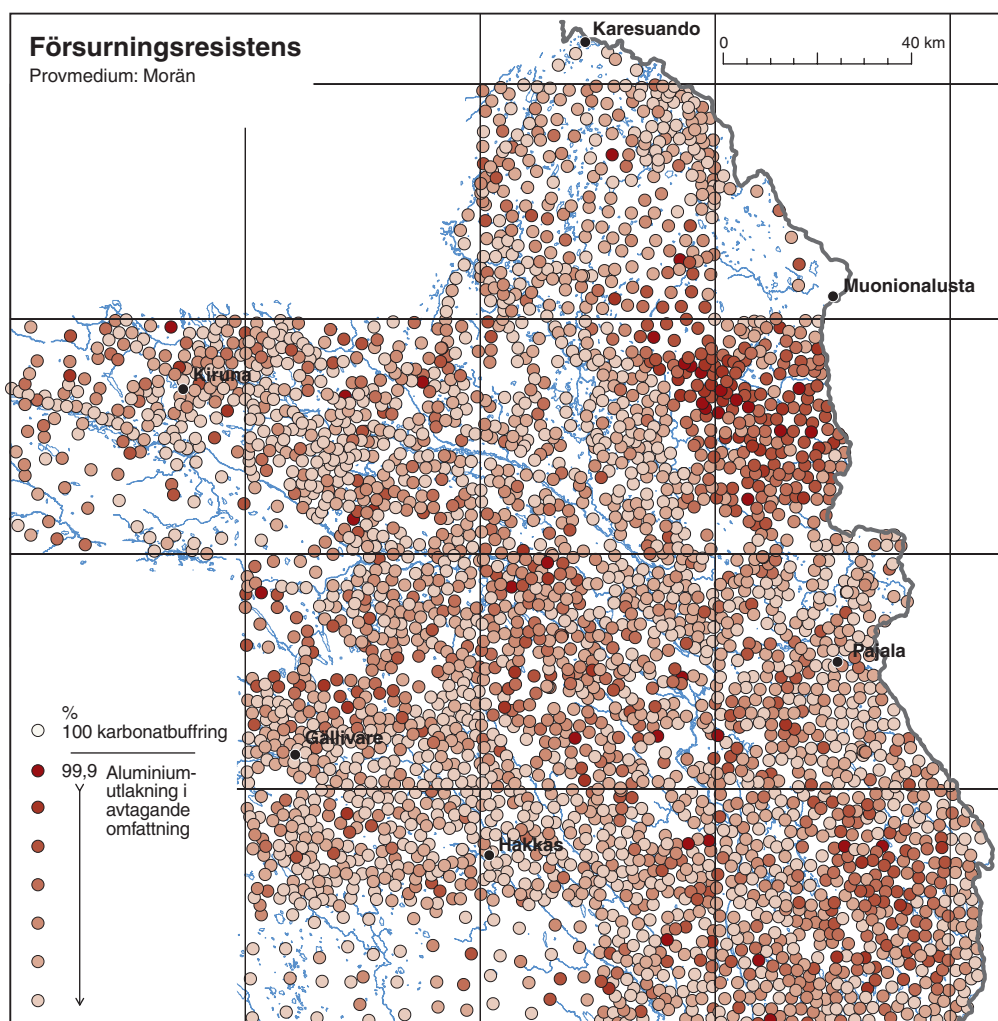
Nämnvärda korrelationer med zirkonium och andra element saknas. Zirkoniumhalter korrelerar generellt inte heller med kisel. Till exempel nordost om Vittangi och norr om Kangos finns ett motsatt förhållande mellan zirkonium och kisel. Balansen mellan zirkonium och kisel (i form av kiseldioxid) kan eventuellt vara påverkat av gamla isälvsediment samt svallat kvartsrikt material som transporterats och deponerats på basisk berggrund (gabbro–diorit) och ligger där än idag. Det kan vara ett typiskt exempel på hur kvartära processer delvis kan täcka och vilseleda signaler från berggrunden.

pH och försurningsresistens

Kartområdets moräner har pH-värden mellan 4,7 och 7,4. Det enda basiska pH-värde som uppmätts av 3 155 moränprov finns ca 10 km öster om Tjärendö i en morän som överlagrar granitiska bergarter, men där sannolikt bergartsmaterial förts med glacial transport från basiska intrusivbergarter (gabbro) strax söder om provpunkten. Någon mil nordost härom återfinns kartområdets lägsta pH-värde i en morän som överlagrar metasedimentär (kvartsitisk) berggrund. Generellt har den nordvästra halvan av kartområdets moräner lägre pH-värden än den sydöstra och pH-värden under 5 återfinns endast i denna region (med undantag av ovan nämnda), runt Kiruna samt söder och sydost härom.

Det finns ingen generell koppling mellan pH-värde och svavelhalt mer än att det är vanligt med höga svavelhalter i områden med låga pH-värden. En sannolik förklaring är att svavelsyra bildas då förekommande sulfider oxiderar vilket sänker pH. Högt pH behöver dock inte utesluta förekomst av sulfider. Lokalt kan inslag av mer mafiskt bergartsmaterial i moränerna skönjas i form av något högre pH än omgivande morän, exempelvis norr om Svappavaara, söder och sydost om Suijavaara och vid





Kangos. Lite lägre pH har de sura bergarternas moräner, vilket bland annat ses på pH-kartan i en stor region öster om Kangos och vidare mot Muonioälven. Samma förhållande iaktas för moränerna i det stora Linagranitområdet norr och nordost om Gällivare. Deglaciationen har sannolikt också gett spår i det geokemiska pH-mönstret. Områden med veikimorän i Lainiobågens norra del har förhöjda pH-värden i moränproven. Likaså har kartområdets sydvästra del med sitt kulliga moränlandskap relativt sett något högre pH-värden.

Försurningsresistensen, som beräknas efter tillsats av svag svavelsyra och uttrycks som buffertprocent, uppgår ingenstans till 100 %, vilket visar att karbonatbuffring inte råder i något prov. Den kalktest som utförs i samband med provberedningen kunde heller inte detektera kalcit i ett enda prov i kartområdet. Om kalciumkarbonat inte förekommer är det bland annat närvaro av lättlösliga aluminiummineral som dominerar vid markens reaktion på vätejoner. Som bieffekt får man höga aluminiumhalter i vattenflödena. Kartbilden över syralakat aluminium visar en kraftig förhöjning över Parkajokiseriens bergarter i nordost. Området har också höga buffertprocenttal (strax under 100 %) och känns igen som ett område där vattenmättad morän förlorat (eller alltid saknat) lättlakade komponenter som kalcium och natrium, element som annars bidrar till buffringen. Lägre buffertprocenttal på försurningsresistenskartan återfinns i moränområden med mindre andel lättlösligt aluminium. Här kan istället innehållet av lättlösligt kalcium och natrium dominera vilket indikerar att det sannolikt är plagioklaser (albit) som dominerar buffringen.

Miljögeokemi – gränsvärden för känslig markanvändning (KM)

För miljögeokemisk bearbetning av analysresultat används de salpetersyralakade elementhalterna samt kungsvattenlakade halter för guld, antimon och tenn. 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, 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 arsenikvärde 47 mg/kg. Som tidigare nämnts kan en metallhalt i moränfraktionen <0,063 mm multipliceras med faktor 0,7 för att erhålla sannolik metallhalt i fraktionen <2 mm som direkt kan jämföras med KM-värdet. Erfarenhetsmässigt vet man också att om en moränlokal har kraftigt förhöjd metallhalt är sannolikheten mycket stor för att finna ännu högre metallhalter i närområdet. Det är därför fullt möjligt att på de markgeokemiska kartorna använda KM-värden som jämförandevärden när man ska bedöma ett områdes metallbelastning. I stort innebär en analyserad moränfraktion <0,063 mm inget stort problem för jämförelse med KM-värden, då ett erhållet analysvärde som ligger nära eller över KM-värdet visar att moränen i området är en riskfaktor.

Ett urval av de prov som analyseras med avseende på metallinnehåll i moränens finfraktion analyseras även på fraktionen <2,0 mm. I undersökningsområdet har 634 prov analyserats på denna grövre fraktion som är identisk med den som används för markundersökningar bland annat avseende förorenad mark. Resultaten av analyserna visar att korrelationen mellan metallinnehåll i finfraktionen och i fraktionen <2,0 mm i regel är mycket god. Detta betyder att finfraktionen kan användas för att uppskatta lokala bakgrundsvärden för fraktionen <2 mm genom att multiplicera elementhalten i finfraktionen med 0,7.

I undersökningsområdet överstiger arsenik, barium, bly, kobolt, koppar, krom och vanadin det strängaste gränsvärdet för känslig markanvändning (KM). De flesta av elementen ligger i anslutning till kända mineraliserade regioner och har höga halter av flera element, inte bara de som det finns gränsvärden för. Det finns också enstaka punktanomalier med kobolt, koppar eller nickel, bland annat i sydöstra delen av kartområdet. En större region utanför kända mineraliseringar finns i trakten av Kitkiöjärvi och Pessinki. Här har barium, kobolt, koppar, krom, nickel och vanadin halter över KM. Andra platser med halter över KM är Svappavaara (Ba, Co, Cu, Ni) med punktvisa kopparhalter över KM söder, nordväst och norr därom samt Pahtohavare (Co, Cr, Cu, Ni). Även områden väster om Kiruna (Co, Cu, Ni), nordost om Kiruna (Co, Cu), norr om Kiruna (Ni), nordost om Jukkasjärvi (Co, Cu) samt nordväst och norr om Vittangi (Co, Cu) har metallhalter högre än KM-värdet. Vidare Kurkkionvaara (Pb), väster om Huukki (Ni), nordost om Korpilombolo (Co), sydost om Korpilombolo (Cu) samt väster om Korpilombolo (Co, Cu). Ytterligare några enstaka kopparvärden över KM finns sydväst om Svanstein, nordost om Lainio, söder om Vittangi samt i anslutning till området med kopparfyndigheter cirka 30 km väster om Kiruna. Poulalaki (As, Cr, Cu, V), som har halter över KM av ett flertal element, har också ett uppmätt arsenikvärde (46,6 mg/kg i finfraktionen) som ligger på gränsen för det generella riktvärdet för direktkontakt med jordmaterial.

Det bör även påpekas att analysresultat endast avspeglar risk för halter överstigande KM-värdet. 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 lättlösliga i sur miljö. Generellt sett börjar de mobiliseras när markens pH understiger 6. I områden med höga metallhalter och låga pH-värden kan man därför befara att elementen kan ha börjat lösas ut och att de nått grundvattnet. Det kan ha till följd att dricksvattenkvaliteten i enskilda brunnar påverkas.

I den här beskrivningen har det inte tagits hänsyn till en möjlig ansamling av kemiska element i samband med antropogena processer som förekommer i närheten av stora städer. Exempelvis har det runtomkring Kiruna stad pågått både brytning och anrikning av malm under många år.

SUMMARY

In 1982 a national geochemical mapping programme based on the silt and clay fraction (<0.063 mm) of till was initiated by the Geological Survey of Sweden. So far, including the present study, c. 233 000 square kilometres have been covered with a broad, systematic sampling grid where one sample represents six square kilometres (equal to 15 samples per 100 square kilometres). The main objective of the programme is to quantify regional variations in glacial drift composition in order to provide data for mineral exploration, mining industry, planning purposes, environmental research, agriculture, forestry, and veterinary and human medical research (medical geology). The objective also includes the assessment of the sensitivity of the terrain to the effects of acid rain. For these purposes two sets of characteristics in glacial till are determined:

- (1) concentrations of trace and minor elements and
- (2) the buffering components – major element composition, pH and carbonate contents.

The bulk of the collected material is sampled from normal silty or sandy-silty till. Material that is extremely rich in gravel, sand or clay is avoided. The sampling grid is plotted in advance on topographic maps with Quaternary geological maps as support, however the precise final location of the sample site is determined in the field.

The samples are collected from hand-dug pits, from the C-horizon usually at 0.7–1.0 m depth. After vacuum-drying, the samples are sieved stepwise to <0.063 mm and analysed for trace, major and minor elements by X-ray fluorescence for total element concentrations. Partial leaching in Aqua Regia (a mixture of HCl and HNO₃) and nitric acid (7M HNO₃) combined with ICP-MS analysis is also used. The <2 mm fraction of 16% of the till samples, and all clay and other sediment samples are also analysed using the partial leach and ICP-MS technique. Approximate calcium carbonate contents are determined by using hydrochloric acid. Acidity and alkalinity degree (pH) are determined in a suspended solution composed of a four gram sample (<0.063 mm) and 20 ml distilled water. A quality control programme is used in order to monitor the analytical and sampling variances. Additional details regarding the geochemical mapping programmes, including biogeochemical mapping at SGU, are available from Lax & Selinus (2005).

A total of 3 397 samples were collected for the current study in northern Norrbotten and analysed within the regional survey programme at SGU. For palladium and tellurium, data from the NSG-SGAB surveys have been combined with SGU data for map production and interpretation.

The survey area for the present report covers approximately 25 500 km². The bedrock is mainly composed of Palaeoproterozoic basement rocks (younger than 2.4 Ga) of the Fennoscandian Shield, with small quantities of Archaean rocks (older than 2.6 Ga) in the northern part of the studied region. The youngest rocks, with ages around 1.96 to 1.75 Ga, belong to the Svekokarelian orogeny.

The Palaeoproterozoic basement hosts a large variety of mineralisations of different origin, from iron deposits to base metal deposits and deposits of precious metals like gold and platinum.

The Quaternary geology has had a huge impact on the soil geochemistry pattern in the area. The studied region, with the exception of the south-eastern part, is located above the high-coastline which is situated at an altitude of c. 200 m a.s.l. near Svanstein, at 180 m a.s.l. in Lansjärv and at 170 m a.s.l. near Huuki.

Glacial drift of different ages covers most of the area. Several generations of ice movement directions have been recognised with two directions dominating: from the south-west and from the north-west. The ice transport distances are interpreted to be rather short, around 5 km. The presence of an ice

divide in the north-eastern part of the area complicates the interpretation of the origin of geochemical signatures in the till. The complex till stratigraphy is an additional complicating factor when trying to interpret the influence of local bedrock on the geochemistry of the till cover. Topography together with a large variety of glaciation and deglaciation related landforms influences the distribution of many geochemical anomalies. Glaciofluvial systems are responsible for the removal, dilution and re-positioning of the geochemical signal originating from the bedrock. These processes have influenced the elemental distribution of K, Na, Au, As, Mo, Sr and other elements.

The geochemical pattern in the studied area is dominated by the contrast between, and distribution of basic and acid rocks. Metasedimentary rocks are abundant in the eastern part of the mapped area whereas the north-western part is influenced by material transported from the Caledonide mountain belt.

Principal geochemical features of the till in the area are governed by the bedrock geology, with high concentrations of elements typically found in basic rocks (e.g. Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Ti and V) and low concentration of those elements associated with acid rocks (e.g. As, Bi, Cd, K, Pb, Rb, Si, Sn, Tl and Zr).

The mapped region is one of Sweden's major ore districts with active iron mines at Kiruna and Malmberget and a copper-silver-gold mine in Aitik. Apart from these active mines, there are many deposits that have previously been mined, and a large number of mineralisations are known in the region (predominately sulphide and iron ores).

Rare earth elements (REEs) occur together with uranium and thorium south of Svappavaara (Leveäniemi). Two other uranium mineralisations are known in this area: Äijärova (together with copper and molybdenum) and Meutesvare (together with copper). Uranium and thorium anomalies in till also originate from granites and pegmatites of the Haparanda and Lina types.

Elevated palladium and tellurium concentrations occur in till in the Gällivare area and are related to the Dundret basic intrusion, south-west of Gällivare (data from the NSG database). In the Aitik mining region elevated concentrations of platinum group elements in the till correlate with known copper and gold mineralisations.

Gold anomalies are found in many places and correlate well with the 64 known mineralisations containing gold in the mapped area. The gold anomalies commonly follow arsenic, copper, sulphur, antimony and bismuth anomalies west and south-west of Kiruna, south-east and north-east of Gällivare, and in the Svappavaara region.

Sulphide mineralisations are often indicated by copper, cobalt, molybdenum and lead anomalies in till with the largest copper anomalies between Kiruna and Vittangi, west of Pajala, and in the Tärenkö-Svanstein area. The biggest copper mine in Aitik however does not show a large copper anomaly in till, which may have been removed eastwards by the ice. Silver anomalies follow occurrences of sulphide mineralisations, e.g. at Lieteksavo, Pårkajaure, Viscaria and Aitik.

Molybdenum mineralisation has been reported from nearly twenty localities in the studied area and molybdenum anomalies, together with nickel, cobalt, copper, silver and gold, in till are often related to these mineralisations. Numerous zinc anomalies in till are found in the northern part of the region. These correlate well with the 19 known zinc mineralisations, e.g. Viscaria west of Kiruna.

Barium concentrations in till are higher in the studied area than in the rest of the country and elevated barium concentrations often outline the presence of iron ore bodies. High barium contents may indicate the presence of hydrothermal and metasomatic alterations in the bedrock. High phosphorus concentrations in till can be connected with occurrences of alkaline rocks and apatite iron ore deposits.

A characteristic feature of Norrbotten's soil geochemistry is the very high chlorine concentrations in till forming a large anomaly that runs diagonally across the studied area. The origin of the high chlorine concentrations in till has been attributed to the widespread scapolitisation of basic rocks and the possible presence of Palaeoproterozoic evaporite deposits which have subsequently been eroded to leave only the observed geochemical traces.

From the environmental point of view, the studied area has high concentrations of many potentially toxic metals with levels higher than those recommended by the Swedish Environmental Protection

Agency (Naturvårdsverket). The high metal content is to a certain extent controlled by the local pH. At low pH, metals like cadmium, cobalt, copper, manganese, niobium, thallium and zirconium can be released to surface and groundwater. In the studied area, in the vicinity of known mineralisation sites, the concentrations of arsenic, barium, lead, cobalt, copper, chromium and vanadium are higher than guideline values. The guideline values are exceeded for example in Svappavaara (barium, cobalt, copper and nickel), in Pahtohavare (cobalt, chromium, copper and nickel), west and north of Kiruna (cobalt, nickel and copper), north-west and north of Vittangi (copper and cobalt), in Poulalaki (arsenic, copper, chromium and vanadium), and near Korpilombolo (cobalt and copper). In Kitkiöjärvi and Pessinki, concentrations of barium, cobalt, copper, chromium, nickel and vanadium exceed guideline values but no mineralisations have, so far, been found.

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. & Lax, K., 1996: Markgeokemiska kartan 20–22, I–L. *Sveriges geologiska undersökning Rapporter och meddelanden 85*.
- Andersson, M. & Lax, K., 2000: Geokemiska kartan. Markgeokemi. Metaller i morän i delar av Västerbotten, Västergötland, Halland och Skåne. *Sveriges geologiska undersökning Gk 2*.
- 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*.
- 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.
- Bardina, N.Yu. & Popov, V.S., 1992: Classification of metasomatic rocks and facies of shallow metasomatism. *International Geology Review 34*, 187–196.
- 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.
- Bouchard, M.A. & Salonen, V.-P., 1990: Boulder transport in shield areas. /R. Kujansuu, M. Saarnisto & A.A. Balkema: *Glacial Indicator Tracing*. Rotterdam, 87–107.
- Bringmark, L. & Bringmark, E., 2001: Soil respiration in relation to small-scale patterns of lead and mercury in mor layers of Southern Swedish forest sites. *Water, Air and Soil Pollution: Focus 1*, 395–408.
- Dittrich, H., 2005: Jordartskartan 28K Gällivare, skala 1:100 000. *Sveriges geologiska undersökning Ak 50*.
- 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.
- Eriksson, J., Andersson, A. & Andersson, R., 1997: Tillståndet i svensk åkermark. *Naturvårdsverket, rapport 4778*.
- Fettes D. & Desmons J., 2007: *Metamorphic rocks: a classification and glossary of terms*. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks, 1–244.
- Frietsch, R., 1966: Berggrund och malmer i Svappavaarafältet, norra Sverige. *Sveriges geologiska undersökning C 604*, 1–282.
- Frietsch, R., Tuisku, P., Martinsson, O. & Perdahl, J.-A., 1997: Early Proterozoic Cu-(Au) and Fe ore deposits associated with regional Na-Cl metasomatism in northern Fennoscandia. *Ore Geology Reviews 12*, 1–34.

- Geijer, P., 1910: *Igneous rocks and iron ores of Kiirunavaara, Luossavaara and Tuolluvaara*. Scientific and practical researches in Lapland arranged by Luossavaara–Kiirunavaara Aktiebolag, Stockholm, 1–278.
- Geijer, P., 1930: Gällivare malmfält. *Sveriges geologiska undersökning Ca 22*, 1–115.
- Geijer, P., 1931: Berggrunden inom malmtrakten Kiruna–Gällivare–Pajala. *Sveriges geologiska undersökning C 366*, 1–225.
- Grip, E. & Frietsch, R., 1973: *Malm i Sverige 2, norra Sverige*. Almqvist & Wiksell, 1–295.
- Hallberg, A., 1994: The Enåsen gold deposit, central Sweden. *Mineralium Deposita* 29, 150–162.
- Hallberg, A. & Fallick, A.E., 1994: The Enåsen gold deposit, central Sweden: 2. Light element stable isotope evidence of premetamorphic hydrothermal activity. *Mineralium Deposita*, 163–169.
- Hikov, A., 2004a: Geochemistry of strontium during advanced argillic alteration associated with some epithermal and porphyry copper deposits in Bulgaria. I A. Chatzipetros & S. Pavlides (red.): *Proceedings of 5th Intern. Symp. of Eastern Mediterranean Geology* 3, 1402–1405.
- Hikov, A., 2004b: Geochemistry of strontium in advance argillic alteration systems-possible guide to exploration. *Bulgarian Geological Society. Annual Scientific Conference "Geology 2004"*, 29–31.
- Holmberg, J., Ohlsson, S.-Å. & Ressar, H., 1999: Geokemiska kartan. Biogeokemi. Tungmetaller i bäckvattenväxter Mellersta Dalarna. *Sveriges geologiska undersökning Gk 1*.
- Hättestrand, C., 2009: Sprängd dvärgplanet i nordsvensk myrmark. *Forskning & Framsteg* 44, 46–51.
- Högbom, A.G., 1910: The Gällivare iron mountain. A guide for excursions. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 32, 561–600.
- Jonsson, E., 2010: Copper-gold-palladium mineralisation in the Korpilombolo area, NE Sweden. *29th Nordic Geological Winter Meeting, 11–13.01.2010 Oslo, NGF Abstracts and Proceedings of the Geological Society of Norway* 1, 87–88.
- Karlsson, U., 2006: *Environmental levels of thallium*. Doctoral dissertation Örebro University.
- Karppanen, H., 2002: *Epidemiological studies on the relationship between magnesium intake and cardiovascular diseases*. The Magnesium Web Site, www.mgwater.com/estudies.shtml.
- Koljonen, T. (red.), 1992: *The Geochemical Atlas of Finland, Part 2: Till*. Geological Survey of Finland, Espoo.
- Kornfält, K.-A., Andersson, M., Daniel, E. & Persson, M., 1996: Kadmium i marken i sydöstra Skåne. *Sveriges geologiska undersökning Rapporter och meddelanden* 82, 36 s.
- Krüger, J., 1979: Structures and textures in till indicating subglacial deposition. *Boreas* 8, 323–340.
- Kunov, A., 2003: Endogene-supergene systems of epithermal deposits and occurrences of acid-sulfate and adularia-sericite type (cases from Bulgaria) – hypothesis and models. *Geologica Balcanica* 33, 33–48.
- Kunov, A., 2008: Metasomatic families in Bulgaria-a review. *Geologica Balcanica* 37, 1–17.
- Kurtio, P., Auvinen, A., Salonen, L., Saha, H., Pekkanen, J., Mäkeläinen, I., Väisänen, S.B., Penttilä, I.M. & Komulainen, H., 2002: Renal effects of uranium in drinking water. *Environmental Health Perspectives* 110, 4.
- Lagerbäck, R. & Robertson, A.-M., 1988: Kettle holes – stratigraphical archives for Weichselian geology and paleoenvironment in northernmost Sweden. *Boreas* 17, 439–468.
- Lax, K., 2005: Markgeokemiska kartan i Västerbotten. *Sveriges geologiska undersökning Rapporter och meddelanden K 7*.
- Lax, K. & Selinus, O., 2005: Geochemical mapping at the Geological Survey of Sweden. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 5, 337–346.
- Lintinen, P., 1995: Origin and physical characteristics of till fines in Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 379.
- Lowell, J.D. & Guilbert J.M., 1970: Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology* 65, 373–408.

- Melezhik, V.A., Fallick, A.E., Rychanchik, D.V. & Kuznetsov, A.B., 2005: Palaeoproterozoic evaporites in Fennoscandia: Implications for seawater sulfate, $\delta^{13}\text{C}$ excursions and the rise of atmospheric oxygen. *Terra Nova* 17, 141–148.
- Monro, D., 1988: *The geology and genesis of the Aitik Cu-Au deposit, Arctic Sweden*. Department of Geology, University College, Cardiff.
- Naturvårdsverket, 2008: *Tabell över generella riktvärden för förorenad mark*. Ersätter tidigare utgivna. <http://www.naturvardsverket.se>. Publicerat 24 oktober 2008.
- Nordkalottprojektet, 1986: Kautsky, G., Bölvikén, B., Bergström, J., Björklund, A., Kontio, M., Lehmuspelto, P., Lindholm, T., Magnusson, J., Ottesen, R.T., Steenfelt, A. & Volden, T. *Geochemical Atlas of Northern Fennoscandia*. A collaboration between NGU, SGU and GTK supported by the Nordic Council of Ministers, 19 s.
- Northland Resources, 2010: 2010 Annual report. http://www.northland.eu/getmedia/79a45f6f-1b03-4395-8740-72d84a2a2483/2010-Annual_Report.pdf.
- Öhlander, B., 1984: Geochemical analyses of rocks of the Haparanda suite, northern Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 106, 167–169.
- Perl, D.P. & Moalem, S., 2006: Aluminum, Alzheimer's disease and the geospatial occurrence of similar disorders. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 64, 115–134.
- Perttunen, M., 1991: The transport of till in southern Finland. *Geological Survey of Finland Special Papers* 9, 79–86.
- Pirajno, F., 2009: *Hydrothermal processes and mineral systems*, 1250 s.
- Popov, V.S. & Bogatikov, O.A., 2001: *The petrography and petrology of igneous, metamorphic, and metasomatic rocks*, 1–766 (på ryska).
- Reimann, C., Äyräs, M., Chekushin, V., Bogatyrev, I., Boyd, R., Caritat, P. de, Dutter, R., Finne, T.E., Halleraker, J.H., Jæger, Ø., Kashulina, G., Lehto, O., Niskavaara, H., Pavlov, V., Räisänen, M.L., Strand, T. & Volden, T., 1998: *Environmental geochemical atlas of the central Barents region*. Geological Survey of Norway, ISBN 82-7385-176-1.
- Reimann, C., Siewers, U., Tarvainen, T., Bityukova, L., Eriksson, J., Gilucis, A., Gregorauskiene, V., Lukashev, V., Matinian, N. & Pasieczna, A., 2003: Agricultural soils in northern Europe: A Geochemical Atlas. *Geologisches Jahrbuch Sonderhefte Reihe D Heft SD5*, 279 s.
- Rosborg, I., Nihlgård, B. & Gerhardsson, L., 2003: Mineralämnen och metaller i 20 kommunala dricksvatten i södra Sverige. *VA-Forsk Rapport 2003-17*, 64 s.
- Rudnick, R.L. & Gao, S., 2003: Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry* 3, 1–64.
- Salminen, R. (red.), 1995: Aluellinen geokemiallinen kartoitus Suomessa vuosina 1982–1994. *Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti* 130.
- Salminen, R., Chekushin, V., Tenhola, M., Bogatyrev, I., Glavatskikh, S.P., Fedotova, E., Gregorauskiene, V., Kashulina, G., Niskavaara, H., Polischuok, A., Rissanen K., Slenok, L., Tomilina, O. & Zhdanova, L., 2005: *Geochemical atlas of the Eastern Barents region*. Elsevier Verlag, 548 s.
- Sarala, P., 2006: Ribbed moraine stratigraphy and formation in southern Finnish Lapland. *Journal of Quaternary Science* 21, 387–398.
- Seedorff, E., Dilles, J.H., Proffett, J.M., Jr., Einaudi, M.R., Zurcher, L., Stavast, W.J.A., Johnson, D.A. & Barton, M.D., 2005: Porphyry copper deposits: Characteristics and origin of hypogene features. I.J.W. Hedenquist m.fl. (red.): *Economic Geology and Bulletin of the Society of Economic Geologists One Hundredth Anniversary Volume 1905–2005*. Littleton, Colorado, Society of Economic Geologists, 251–298.
- 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.
- Snäll, S. & Liljefors, T., 2000: Leachability of major elements from minerals in strong acids. *Journal of geochemical exploration* 71, 1–12.

- 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.
- SGU, 2005: Mineralmarknaden, Tema: Arsenik. *Sveriges geologiska undersökning Periodisk publikation 2005:4*, 79 s.
- Sveriges Nationalatlas, 1994: *Berg och Jord*. SNA.
- Tauber, C., 1988: *Spruenelemente in Flugaschen*. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, Germany, 469 s.
- Wanhainen, C., Martinsson, O. & Kontturi, M., 1999: The Aitik Cu-Au deposit, Gellivare area, northern Sweden. *Gold 99, Trondheim, May 1999, Abstract*, 163–165.
- Wanhainen, C., Broman, C. & Martinsson, O., 2003: The Aitik Cu–Au–Ag deposit in Northern Sweden: a product of high salinity fluids. *Mineralium Deposita* 38, 715–726.
- Wanhainen, C., Billström, K. & Martinsson, O., 2006: Age, petrology and geochemistry of the porphyritic Aitik intrusion, and its relation to the disseminated Aitik Cu–Au–Ag deposit, northern Sweden. *GFF* 128, 273–286.
- Velinov, I., Kunov, A. & Velinova, N., 2007: *The metasomatic secondary quartzite formation in Bulgaria*, 1–199.
- White, N.C. & Hedenquist, J.W., 1995: Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletter* 23, 9–13.
- Yngström, S., Nord, A.G. & Åberg, G., 1986: A sulphur and strontium isotope study of the Aitik copper ore, northern Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 108, 367–372.
- Zharikov, V.A. & Zaraksky, G.P., 1991: Experimental modelling of wall-rock metasomatism. I L.L. Perchuk: *Progress in metamorphic and magmatic petrology*. Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney, 503 s.

MER ATT LÄSA

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 1992: *Toxicological profile for thallium*. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- Bardina, N.Yu. & Popov, V.S., 1991: Systematization of Metasomatic Rocks and Metasomatism Facies of Small Depths. *Sovetskaya geology* 6, 48–56 (på ryska).
- Bardina, N.Yu., Gurova, M.N., Popov, V.S. & Yurgenson, B.P., 1994: Petrography of metasomatic rocks. *MGRA*, 1–96 (på ryska).
- Gifkins, C., Herrmann, W. & Large, R., 2005: *Altered volcanic rocks (a guide to description and interpretation)*, 1–275.
- Hättestrand, C., 1998: The glacial geomorphology of central and northern Sweden. *Sveriges geologiska undersökning Ca 85*.
- Järnefors, B., 1952: A sediment-petrographic study of glacial till from the Pajala district, N Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 74, 185–211.
- Lett, R.E., Bobrowsky, P., Cathro, M. & Yeow, A., 1997: Geochemical pathfinders for massive sulphide deposits in the southern Kootenay terrane. *British Columbia Geological Survey Branch, Geological Fieldwork 1997, Paper 1998-1*.
- Lundegårdh, P.H., 1995: Beskrivning till berggrundskartan över Värmlands län. *Sveriges geologiska undersökning Ba:45-1*, 1–180.
- Martinsson, O., Hallberg, A., Söderholm, K. & Billström K., 1997: Pahtohavare – an epigenetic Cu-Au deposit in the Paleoproterozoic Kiruna greenstones. I O. Martinsson: Tectonic setting and metallogeny of the Kiruna greenstones. *Doctoral thesis 1997:19, Paper III, 1–37. Luleå University of Technology*.
- Meinert, L.D., 1992: Skarn and skarn deposit. *Geosci. Canada* 19, 145–162.
- Meinert, L.D., Dipple, G. M. & Nicolescu, S., 2005: World skarn deposits. I J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb & J.P. Richards, (red.): *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA, 299–336.

- Naturvårdsverket, 1999: Metodik för inventering av förorenade områden. *Naturvårdsverket Rapport 4918*.
- Omelyanenko, B.I., 1978: *Wall rock hydrothermal alteration*. Nedra Publishing, Moscow, 1–216 (på ryska).
- Parák, T., 1975: The origin of the Kiruna iron ores. *Sveriges geologiska undersökning C 709*, 1–209.
- Persson, G. & Lagerbäck, R., 1977: Vathanvaara kaolinförekomst. Rapport rörande undersökningar av kaolin på Vathanvaara kbl 29K Vittangi. *Unpublished report, Sveriges geologiska undersökning BRAP 00887*, 1–21.
- Romer, R.L., Martinsson, O. & Perdahl, J.-A., 1994: Geochronology of the Kiruna iron ores and hydrothermal alterations. *Economic Geology* 89, 1249–1261.
- Sillitoe, R.H. & Burrows, D.R., 2002: New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, northern Chile. *Economic Geology* 97, 1101–1109.
- Sillitoe, R.H., 1993: Epithermal models: Genetic types, geometrical controls, and shallow features. *Geological Association of Canada Special Paper 40*, 403–417.
- Smith, M.P., Coppard, J., Herrington, R. & Stein, H., 2007: The geology of the Rakkurijärvi Cu–(Au) prospect, Norrbotten: A new IOCG deposit in Northern Sweden. *Economic Geology* 102, 393–414.
- Sundius, N., 1915: *Beiträge zur Geologie des südlichen Teils des Kirunagebiets*. *Vetenskapliga och praktiska undersökningar i Lappland, arrangerade av Luossavaara–Kiirunavaara Aktiebolag*. Uppsala, 1–237.
- Zweifel, H., 1976: Geological documentation of a disseminated copper deposit – a preliminary investigation. *Sveriges geologiska undersökning C 720*, 1–80.



Sveriges geologiska undersökning

Box 670

751 28 Uppsala

Tel: 018-17 90 00

Fax: 018-17 93 70

www.sgu.se

Uppsala 2012

ISSN 1652-8336

ISBN 978-91-7403-158-4

Tryck: Davidsons Tryckeri AB, Växjö