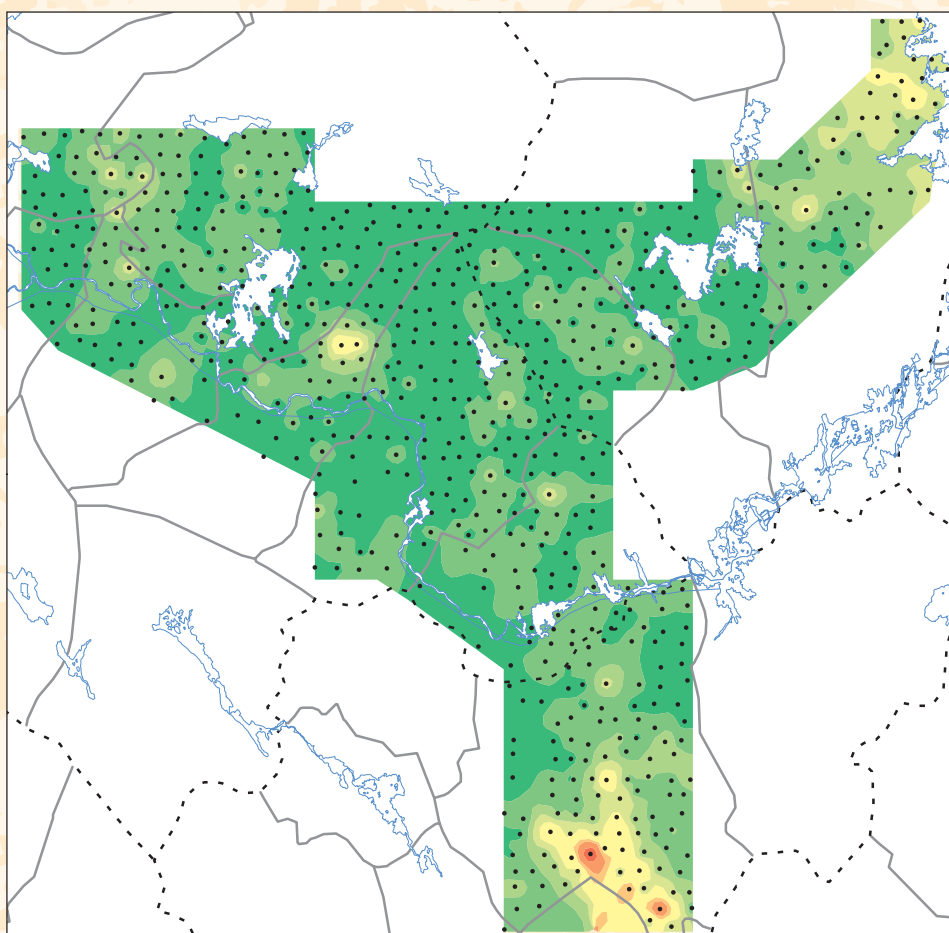


Geokemiska kartan Markgeokemi

Metaller i morän Regionen Falun-Gävle-Sala

Madelen Andersson



K 148

Geokemiska kartan Markgeokemi

Metaller i morän Regionen Falun–Gävle–Sala

Madelen Andersson

Sveriges geologiska undersökning
2009

ISSN 1652-8336
ISBN 978-91-7158-884-5

Omslagsbild: Arsenik

© Sveriges geologiska undersökning

Layout: Agneta Ek, SGU
Tryck: Elanders Sverige AB

INNEHÅLL

Geokemisk kartering vid sgu	5
Användning av markgeokemiska data	6
Provtypen morän	7
Elementens förekomst och rörlighet	8
Geologiska förutsättningar	8
Markprocesser och buffring	11
Lakbarhet och associationer	11
De kemiska elementen i näringskedjan	12
Metodik	13
Provtagning	13
Provberedning	14
Analysering	14
Metallhalter	14
Kvalitetskontroll av analyser	15
Elementkartor	15
Bearbetning av data	16
Percentilindelning	16
Korrelation	16
Faktoranalys	17
Geologi i området	17
Geokemi i området	23
Miljögeokemi	23
Gränsvärden för Känslig Markanvändning (KM)	23
Metaller i mark och vatten	24
Aluminium (Al_2O_3)	25
Antimon (Sb)	28
Arsenik (As)	29
Barium (BaO)	30
Beryllium (Be)	31
Bly (Pb)	34
Fosfor (P_2O_5)	35
Gallium (Ga)	36
Guld (Au)	37
Järn (Fe_2O_3)	39
Kadmium (Cd)	40
Kalcium (CaO)	42
Kalium (K_2O)	43
Kisel (SiO_2)	44
Klor (Cl)	45
Kobolt (Co)	47
Koppar (Cu)	48
Krom (Cr)	49
Lantan (La)	50
Litium (Li)	51
Magnesium (MgO)	53
Mangan (MnO)	54

Molybden (Mo)	55
Natrium (Na ₂ O)	56
Nickel (Ni)	57
Niob (Nb)	60
Rubidium (Rb)	61
Selen (Se)	62
Silver (Ag)	64
Strontium (Sr)	66
Svavel (S)	67
Tallium (Tl)	68
Tantal (Ta)	69
Tenn (Sn)	70
Titan (TiO ₂)	72
Torium (Th)	73
Uran (U)	75
Vanadin (V)	77
Vismut (Bi)	78
Wolfram (W)	79
Yttrium (Y)	81
Zink (Zn)	82
Zirkonium (Zr)	84
pH och försurningsresistens	85
Summary	87
Referenser	88

GEOKEMISK KARTERING VID SGU

Den geokemiska karteringen vid SGU bedrivs i syfte att visa regional fördelning av huvudämnen och spårämnen samt pH i mark och vatten. Två olika undersökningsmetoder används för att åskådliggöra detta. Vid markgeokemisk kartering provtas och analyseras morän och ett urval av leror, silt och grövre sediment. Hittills har hela Götaland och stora delar av Svealand och Norrland karterats på detta sätt. Förutom markgeokemisk kartering har även biogeokemisk kartering utförts. Den senare baserades på analyser av levande bäckvattenväxter (starr- och älggräsrötter samt näckmossa) från små vattendrag, och avslutades 2008. Omfattningen av de båda karteringsslagen visas i figur 1.

Den geokemiska databasen innehåller analysresultat och utgör en referenssamling av naturliga metallhalter och andra ämnen. Resultaten används bland annat för att fastställa bakgrundshalter för metaller, för att identifiera områden med hög naturlig metallbelastning, för att tillsammans med pH-värden indikera risk för metallmobilitet, för prospektering efter guld, basmetaller och industrimineral och för att värdera näringsstatus i skogsmark. Maximalt finns data från över 30 000 moränlokaler i Sverige.

Föreliggande rapport är en fortsättning på den serie rapporter om geokemi som tidigare givits ut i SGUs publikationsserier Rapporter och meddelanden, Gk samt nu i serie K.

Rapporten innehåller utdrag ur de geokemiska databaserna med syftet att visa enskilda grundämnens regionala frekvens och distribution. De flesta analyserade element som uppfyller stipulerade krav på analyskvalitet redovisas.

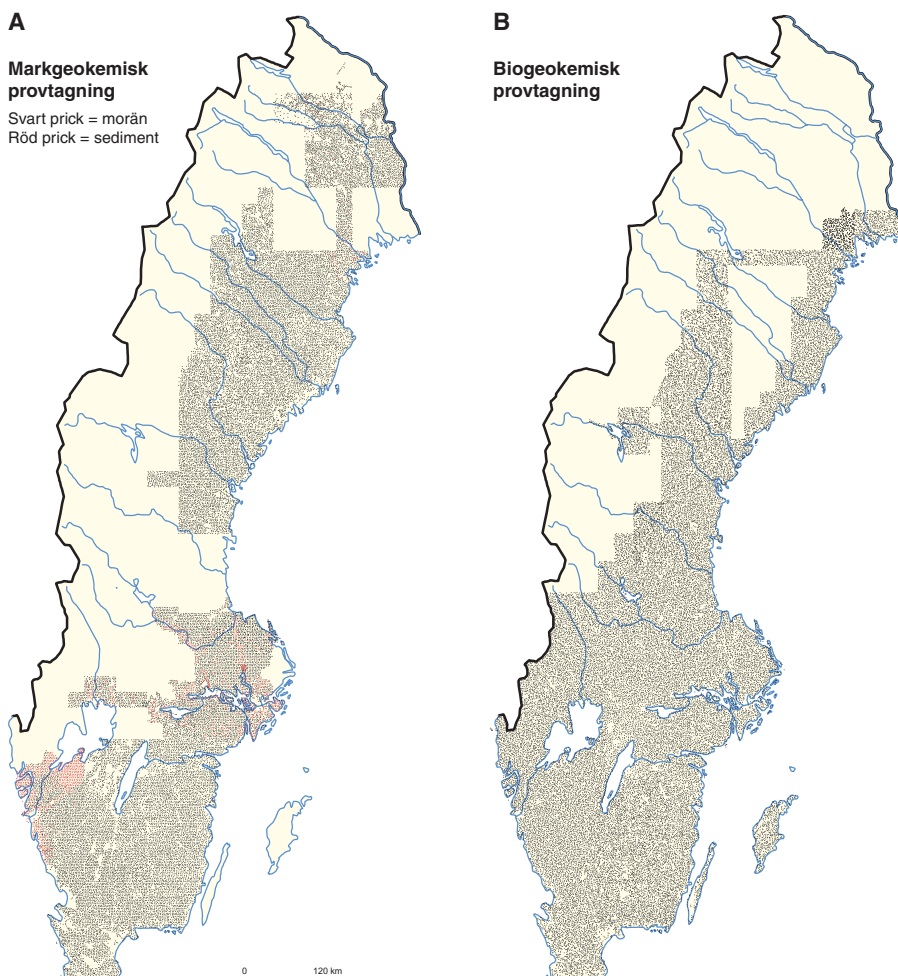


Fig 1. A. Omfattning av markgeokemisk provtagning. Morän 31 500 prov, leror och finsediment (rött) 3 785 prov. B. Omfattning av biogeokemisk provtagning. Biogeokemi 38 480 prov.

Current coverage of data (2008). A. Soil geochemistry; till 31 500 samples, clay and fine grained sediments (red dots) 3 785 samples. B. Biogeochemistry 38 480 samples.

Kollegor på SGU som bidragit till rapporten är Cecilia Jelinek (uran och torium) och Olle Selinus (hälsoaspekter). Ansvarig för kartframställning är Mikael Carlsson, för pH-mätningar Birgitta Löwenhielm, för ICP-analyser Torsten Liljefors och för analyskvalitet Kaj Lax.

ANVÄNDNING AV MARKGEOKEMISKA DATA

Markgeokemiska data används bland annat inom miljöövervakning, kommunal planering, markforskning, skogsbruk, mineralprospektering 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.

Kartorna visar den naturliga förekomsten av grundämnen i marken. Antropogen påverkan bidrar ytterst sällan eller mycket lite till de halter av metaller och andra element som uppmäts i skogs- och landsbygd. I Sverige anses ett undantag från detta vara områden runt Falun, som förorenats av gruvdriften (Ek m.fl. 2001). Det är endast om påverkansgraden är mycket kraftig som påverkan kan ses, och då i allmänhet endast i utsläppskällans omedelbara närhet. Kända potentiella föroreningskällor undviks naturligtvis ändå 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 olika geokemiska provinser i en region; man kan säga att den geokemiska statusen varierar areellt. 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. 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 potentiellt skadliga metaller. Förekommer de med höga halter, eller i olika associationer, kan många av dem indikera mineralisering, vilket är av intresse för malmprospektering, men kan också, speciellt i låga pH-regioner, betyda att skadliga metaller läcker ut till grundvattnet. Låga halter av ett essentiellt spårämne i marken, indikerar risk för att en bristsituation på det nyttiga ämnet kan uppstå eller redan råder.

Som faktaunderlag kan markgeokemiska data användas inom åtminstone fem av de av riksdagen angivna 16 miljömålen. Anledningen är att den geokemiska status som ett område har utgör en naturgiven faktor som påverkar markens försurningskänslighet, metallbelastning, strålningsrisk, föroreningsrisk m.m. Naturliga halter av metaller och andra grundämnen i berggrund och jordarter kan till exempel inte saneras bort eller täckas över utan finns ständigt som en påverkansfaktor för yt- och grundvatten. Några exempel på hur geokemisk information bör beaktas i miljömålen:

Miljömål 3. Bara naturlig försurning

- En regional undersökning av pH i markens opåverkade delar ger information om surhetsgraden i en region och ger också tillsammans med beräkning av försurningsresistensen en indikation på markens neutralisationsförmåga och på områden där sannolikheten för aluminiumutlakning är stor.

Miljömål 4. Giftfri miljö

- Bakgrundshalter av metaller i ett län eller en kommun utgör basfakta vad gäller metallers överskridande av olika gränsvärden. Till exempel finns i olika delar av vårt land naturligt förekommande halter i marken av bl.a. arsenik, bly, kadmium, kobolt, nickel och zink som överstiger naturvårdsverkets gränsvärden för känslig markanvändning (KM-värden). I sällsynta fall är de naturliga halterna så höga att ett provs tillstånd kan klassas som "Allvarligt" eller t.o.m. "Mycket allvarligt" i förhållandet till riktvärden.
- Avgränsningar kan göras av områden som har naturligt förhöjda halter av ett flertal metaller, men där de enskilda metallerna inte överskrider KM-värden.
- Information om naturlig förekomst i jordar av giftiga metaller som idag saknar gränsvärden, t.ex. selen, silver, tallium, tenn, vismut och wolfram.

Miljömål 6. Säker strålmiljö

- Regionala uran- och toriumkartor baserade på halter i mark och bioindikatorer ger information om potentiella strålningsrisker från mark och vatten.

Miljömål 9. Grundvatten av god kvalitet

- Risk för metalläckage till grundvattnet kan finnas i pH-låga områden med hög lakbarhet av bl.a. zink, kadmium, mangan och nickel.
- Risk för att dricksvattnet kan innehålla halter överstigande gällande gränsvärden för giftiga metaller kan föreligga där marken innehåller naturliga förhöjningar av arsenik, uran och kadmium.
- Kalcium- och magnesiumrika områden indikerar god vattenkvalitet med naturligt skydd för hjärt- och kärlsjukdomar.

Miljömål 15. God bebyggd miljö

- Vid planering av nya bostadsområden och infrastrukturdragningar bör man beakta den geokemiska statusen i berörda regioner för att undvika framtida metalläckage.
- Vid all användning och brytning av naturmaterial som bergkross och morän bör man inhämta information om innehållet av metaller och deras lakbarhet för att undvika oavsiktlig spridning av metallrikt bergartsmaterial i miljön.

PROVTYPEN MORÄN

Jordarten morän täcker berggrunden 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.

Tre huvudtyper av morän förekommer: basalt deponerad morän, utsmältningsmorän samt flyt-morän. Basalt deponerad morän avsätts under en aktiv glaciär genom att material i princip skrapas av mot underlaget. Resultatet blir oftast en hårdpackad morän med mycket få strukturer. Den är ganska homogen vad avser utseende, textur och innehåll. Det antas att materialet i en morän av denna typ är ganska korttransporterat. Denna moräntyp ger därför 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 upp 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. Ut-smältningsmoräner och flytmoräner bildar ett mer oregelbundet småkulligt landskap och innehåller 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.

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. Allt eftersom 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. skiffrar, 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.

ELEMENTENS FÖREKOMST OCH RÖRLIGHET

Geologiska förutsättningar

Berggrundens kemiska sammansättning varierar beroende på de ingående bergarternas sammansättning och proportioner. Halterna av många metaller är jämförelsevis låga i de kiselrika (sura) bergarter som dominerar den svenska berggrunden. I basiska bergarter finns däremot högre innehåll av bl.a. järn, magnesium, kobolt, koppar, krom och nickel. I skiffrar är halterna ofta betydligt högre eller mycket höga för en del spårämnen, exempelvis uran. I tabell 1 visas huvudsaklig bergartstillhörighet för element i vanligt förekommande bergarter i Sverige. Tilläggas kan att man med sura bergarter menar att bergarten har hög halt av kisel, inte att bergarten har låga pH-värden. Ren finmald kvarts, som är extremt kiselrik, har höga pH-värden.

Generellt så gäller att mängden av grundämnen i bergarter varierar beroende på hur vanliga de är i de bergartsbildande mineralen. I tabell 2 anges det genomsnittliga innehållet av grundämnen i jordskorpan och i några bergarter.

Moräners innehåll av olika mineral beror till största delen på de ingående nedkrossade bergarterna. I tabell 3 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, till skillnad från övrig redovisning och på kartor.) Utöver det minerogena innehållet finns det också exempelvis kol. På det djup moränproven insamlas är förekomsten av organiskt material mycket lite, 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 moränprover visade det sig att kolinnehållet varierade mellan 0,05 och 0,70 % (medianvärde 0,11 %).

Tabell 1. Bergartstyper med associerade element.

Bergarter	Förhöjda halter
Graniter	Au, Ba, Be, Bi, Cl, K, La, Mo, Pb, Rb, Sn, Th, Tl, U, W, Y, Zr
Sura vulkaniska bergarter (porfyrier m.fl.)	Ag, As, Cd, Cu, Hg, Pb, Se, Zn
Basiska bergarter (gabbror 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

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 totalhalterna 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 pegmatiskt bergartsmaterial ger sig till känna som förhöjningar bland annat av 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 even-

Tabell 2. Genomsnittligt innehåll av grundämnen i jordskorpan och i några bergarter (mg/kg).

Average contents of elements in rock types.

	Medelhalt i jordskorpan	Medelhalt i ultra-mafiska bergarter	Medelhalt i graniter	Medelhalt i sandstenar	Medelhalt i kalkstenar
Aluminium	79	20	73	37	4000
Antimon	0,3	0,1	0,3	0,05	0,15
Arsenik	1,7	0,7	3	0,5	1,5
Barium	584	5	600	300	90
Beryllium	2,4	0,3	5	0,7	0,5
Bly	15	0,05	20	10	5
Fosfor	757	220	750	30	350
Gallium	15	0,5	18	8	1
Guld	0,002	0,0005	0,002	0,0005	0,0001
Järn	43200	94000	20000	10000	5000
Kadmium	0,1	0,05	0,1	<0,04	0,1
Kalcium	38500	25000	9000	13000	380000
Kalium	21400	5000	33000	11000	3000
Kisel	288000	201000	337000	403000	31000
Klor	472	80	200	10	150
Kobolt	24	110	4	0,3	0,1
Koppar	25	40	12	2	6
Krom	126	2300	10	35	5
Lantan	30	1	50	20	6
Litium	18	2	30	10	5
Magnesium	22000	208000	5000	7000	4000
Mangan	716	1200	400	100	700
Molybden	1,1	0,3	1,5	0,3	0,3
Natrium	23600	6000	25000	17000	6000
Nickel	56	2000	5	2	5
Niob	19	1	18	10	0,1
Rubidium	78	2	120	40	4
Selen	0,12	0,07	0,025	0,01	0,025
Silver	0,07	0,03	0,05	0,003	0,01
Strontium	333	10	220	100	500
Svavel	697	600	100	200	500
Tallium	0,52	0,05	1,1	0,4	0,05
Tenn	2,3	0,3	3,6	0,6	0,3
Titan	4010	3000	3000	1500	400
Torium	8,5	0,05	15	5	2
Uran	1,7	0,02	4	1,3	1
Vanadin	98	80	70	20	15
Vismut	0,085	0,01	0,2	0,05	0,1
Wolfram	1	0,3	1,5	1	0,5
Yttrium	24	2	35	15	4
Zink	65	60	50	20	40
Zirkonium	203	30	200	250	20

Tabell 3. Innehåll i 1 kg svensk genomsnittsjord (C-horisont i morän, fraktion <0,063 mm). Uppgifter hämtade från SGUs markgeokemiska databas (2004), sort anges i gram.

Average contents of elements in till.

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

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

Faktorer som ibland kan påverka de geokemiska mönstren är tunna jordtäcken, deposition av svavel och andra luftburna havsaerosoler och föroreningar samt hög nederbörd. Sådan påverkan har exempelvis konstaterats i Västra Götaland (Andersson 2006).

Markprocesser och buffring

Vertikalt i marken varierar den kemiska sammansättningen bl.a. på grund av de markprocesser som bildar markprofilen. Vilken typ av markprofil som bildas beror på ett flertal faktorer, bland dem kan nämnas jordart, mineralinnehåll, markanvändning, klimat och vegetation. Den vanligaste markprofilen i svensk skogsmark är podsol, som utvecklas i näringsfattiga marker. I dess översta mineraljords-horisont, blekjorden, har kemiska och biologiska processer lakat ur de flesta huvudämnen och metaller. Några av dessa, exempelvis järn och aluminium, har fällts ut i den underliggande, ofta rostfärgade, B-horisonten. Halterna av ämnen i dessa båda markskikt orsakas delvis av naturliga, geologiskt betingade markmineral, eller mineral och föreningar som bildats vid vittring. 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 stabiliserats, marken befinner sig i jämvikt och grundämnena förekommer till stor del i primära bergartsmineral och sekundära mineral (t.ex. lermineral).

En annan vanlig markprofil är brunjordar, som utvecklas i mer näringsrik mark. I dessa saknas blekjorden och B-horisonten har en annan karaktär med högre halt organiskt material. Brunjordar kan också vara något mäktigare än podsoler, men det är i princip ingen skillnad på materialet i C-horisonten utom att det är mer näringsrikt.

Om markens buffringsförmåga är låg sjunker pH när försurande vätejoner tillförs, antingen via naturliga processer eller antropogen försurning. Vid låga pH-värden ökar urlakningen av näringsämnen, aluminium och lättlösliga metaller, exempelvis kadmium, och dessa transporteras ut i vattendragen. Andra ämnen som fosfor och molybden binds däremot hårdare i marken. Buffring vid måttligt låga pH-värden, 6,2–4,2, sker genom att vätejonerna byts ut mot 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 oftast av underordnad betydelse. Detta beror på att även om granit och gnejs innehåller kalciummineral, t.ex. plagioklas, är detta silikater med lägre vittringsbenägenhet. Sjunker pH under 4,5 sker buffringen med aluminiumjoner 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. 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 lättlösliga 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.

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 salpetersyra. Detta anger elementets

tillgänglighet på lång sikt för växterna, och för markens neutralisationsförmåga. En låg lakbarhet anger däremot att elementet är mycket hårt bundet i markmineralen och svåråtkomligt.

Olika markmineral har i sin naturliga miljö 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 dock 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 (som bildar bergarten kalksten). Kalium förekommer så gott som enbart i antingen de svårvittrade kalifältspaterna eller i mer lättvittrad biotit, medan magnesium främst återfinns i sådana mineral som vittrar tämligen lätt, dvs. i hornbländegruppen och uppåt. Variationer i lakbarheten av elementen i morän ger därför information om provens mineralogiska sammansättning.

Tillgången på elementen beror således på mineralinnehållet i moränen och miljön moränen befinner sig i, dvs. pH, och om miljön är oxiderande eller reducerande. Genom att kombinera information om ett elements totalhalt i moränen med dess lakbarhet, får man en indikation om en regions geokemiska status.

Förhållandet mellan olika element kan också avslöja lite om mineralinnehållet i marken. Elementen kalcium och strontium är normalt 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 moränerna inte består av en alltför komplex blandning av olika bergarter.

DE KEMISKA ELEMENTEN I NÄRINGSKEDJAN

De kemiska element 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 som direkt kan relateras till markens innehåll av grundämnen har dokumenterats på många håll i världen. I Sverige är sådana samband inte vanliga, till stor del beroende på att den kost som idag konsumeras oftast härstammar från många olika håll varför den lokala markens påverkan inte blir så stark. Det bör alltså betonas att sambanden mellan markkemi och människors hälsa är komplexa och ibland svårutredda. Samband som trots allt har påpekats eller antagits i Sverige är bl.a. markradon–lungcancer, selenbrist–hjärtsjukdomar och kadmium i dricksvatten–barndiabetes. Något som anses ha samband med lägre frekvens av uppkomna hjärt- och kärlsjukdomar är närvaron av hårt vatten, dvs. där kalcium och speciellt magnesium är överrepresenterat i dricksvattnet. Dylika samband har konstaterats vara relativt vanliga internationellt (Karppanen 2002). Under senare tid har även förekomst av

uran i dricksvatten identifierats som en riskfaktor (Kurtzio m.fl. 2002), och källan till detta uran är berg- och jordartsrelaterat. Samma förhållanden gäller för arsenik.

De naturliga ekosystem som omger oss är starkt beroende av den lokala marken och dess innehåll av kemiska element. Oftast har ekosystemen anpassat sig till de förhållanden som råder, men såväl snabba som långsamma miljöförändringar kan innebära starka påfrestningar. Detta kan inträffa om belastningar såsom kraftig förorening av tungmetaller eller sura regn påverkar näringskedjan.

Av de karterade elementen har bl.a. följande element dokumenterat skadliga effekter på levande organismer, om elementet förekommer i ”rätt” form och halterna är tillräckligt höga: aluminium, antimon, arsenik, bly, kadmium, kobolt, koppar, krom, mangan, molybden, nickel, silver, tallium, tenn, uran, vanadin, vismut och zink. Det bör påpekas att även om halter av potentiellt skadliga element i denna rapport klassas som höga på den skala som används, innebär detta inte automatiskt att det finns 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 normalt omfattande undersökningar.

METODIK

Provtagning

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

Avståndet mellan proverna är ca 2,5 km, vilket innebär att det insamlas ungefär 15 prover 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 (normalt 0,7–1,2 meter) genom att material slås loss på några ställen i gropens botten. Analyserna från dessa prover utgör därför en relativt homogen och jämförbar statistisk population, där förutsättningarna för grundämnenas haltvariation bygger på olikheter i ursprunglig kemisk sammansättning.

Sedimentproverna tas på 1 m djup men geografiskt har de oftast inte samma utbredning som moränprover. 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 ute-



Fig. 2. Typisk grop för provtagning i morän.
Typical geochemical sampling site in till.

slutande geologiskt relaterad och kan lättare kopplas till berggrunden. Lerorna och övriga finkorniga sediments elementhalter påverkas av fler faktorer. Sedimentationsprocessen i sig kan t.ex. medföra anrikning av mineral och därmed omfördelning av element.

Provberedning

Moränproverna vakuumtorkas och siktas på nylonsikt med 0,063 mm maskvidd. Anledningen till fraktionering av prov före analys är att den så kallade finfraktionen (<0,063 mm) så gott som uteslutande innehåller monomineralkorn. Grövre fraktioner består av dubbelkorn, vilket ökar haltvariationen vid upprepade provtagning och analys. Det är därmed betydligt svårare att ta representativa prover och att få reproducerbarhet i analyser från grövre fraktioner. Finfraktionen behöver inte heller malas före analys, vilket annars kan ge oönskad kontaminering av proven.

Ett urval av moränproven analyseras även på fraktionen <2,0 mm. Detta görs för att erhålla information om sambanden mellan ämneshalter i de två fraktionerna, eftersom fraktionen <2,0 mm ofta föredras inom miljö- och skogssektorn. Sedimentproven siktas endast på nylonsikt med 2 mm maskvidd.

I samband med siktningen testas samtliga prover med saltsyra (HCl) för att detektera eventuellt kalkinnehåll. Fraktionerna över 0,063 mm samt den mängd material <0,063 mm som inte behövs för analysen, sparas i en provbank 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 flera olika analysmetoder. Moränfraktionen <0,063 mm samt morän och sediment <2 mm analyseras med uppslutning i 7M HNO₃ (salpetersyra) och ICP-MS, moränfraktionen <0,063 mm dessutom med XRF (röntgenfluorescens) och med uppslutning i kungsvatten och ICP-MS. Jordarternas surhetsgrad anges efter en pH-bestämning av proverna med uppslamning i avjoniserat vatten. Med ytterligare en pH-mätning efter tillsättning av vätejoner i form av utspädd svavelsyra (0,005 M), beräknas provets förmåga att motstå surt markvatten, dvs. dess buffertkapacitet eller försurningsresistens (hädanefter används begreppet försurningsresistens). Värt att notera är att pH ofta ligger 0,5–1 enhet lägre i fraktionen <0,063 mm, jämfört med pH mätt i fraktionen <2,0 mm. Detta beror med all sannolikhet på att den finare fraktionen innehåller fler partiklar per gram torkat prov vilket ger större sammanlagd partikelarea. Det är vid markpartiklarna de vätejoner har adsorberats, som man mäter i det uppslammade provet. Fler vätejoner medför alltså lägre pH-värde. Eftersom pH-skalan är logaritmisk innebär varje sänkning med en pH-enhet att halten vätejoner i lösningen ökar tiofalt.

Metallhalter

Naturliga metallhalter överstiger ibland gräns- och riktvärden för förorenad mark. För de flesta metaller inträffar detta relativt sällan, men speciellt elementen arsenik, kadmium och nickel uppträder på grund av geologiska orsaker ibland i halter som kraftigt överstiger riktvärdet för känslig markanvändning. En skillnad mellan SGUs markvärden i morän och Naturvårdsverkets gränsvärden för känslig markanvändning (KM-värden, Naturvårdsverket 1999, 2008) är att de förra mäts i fraktion <0,063 mm, medan de senare mäts i fraktion <2 mm. Analysmetoden är dock densamma med salpetersyralakning av prov. Schablonmässigt kan man räkna med att halterna i moränfraktion <2 mm är ca 2/3 av halterna i fraktion <0,063 mm. SGU-värden som ligger strax över KM-värdet ska därför ses som indikativa. Sedan 1999 har dock SGU analyserat en del av moränproven även på fraktionen

<2 mm, och resultaten visar att korrelationen för metaller mellan de två fraktionerna är utmärkt. Generellt kan man multiplicera analysvärden från finfraktionen i morän med faktor 0,7 för jämförelse med KM-värdena, medan man direkt kan jämföra SGUs sedimentprov eller moränprov som siktas på fraktion <2 mm. Erfarenhetsmässigt vet man också att om en punkt 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 jämförelsevärden när man ska bedöma ett områdes metallbelastning.

Kvalitetskontroll av analyser

Vid all hantering av analyser är en omfattande kvalitetskontroll nödvändig. Varianser, dvs. 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. I denna ingår varianser som uppkommer p.g.a. småskalig inhomogenitet i moräners sammansättning (som normalt är relativt liten, undantaget guld som uppvisar en s.k. kluster- eller nuggeteffekt), varianser uppkomna vid torkning, siktning, uppvägning, uppslutning och analys. Även analysvariansen undersöks, detta med hjälp av internt standardprov. I Lax & Selinus (2005) finns en mer ingående beskrivning av den kvalitetskontroll, provtagning och provberedning som utförs vid geokemiska karteringsprojekt på SGU.

Med hjälp av statistisk och visuell granskning kan fel upptäckas och åtgärdas. För offentliggörande av grundämnenas analyser krävs att dessa har kvalitetsklassats som tillfredsställande och däröver. De olika varianter på kvalitetskontroll som tillämpas vid geokemiska undersökningsprojekt används även av andra länders motsvarighet till SGU.

Parametrar av fullgod eller tillfredsställande analytisk kvalitet som ingår i den geokemiska referenssamlingen är: pH, pH1, Ag, Al₂O₃, As, Au, BaO, 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, Ta, Th, TiO₂, Tl, U, V, W, Y, Zn och Zr. Därutöver finns dessutom ett fåtal grundämnen med analyser av sämre kvalitet, t.ex. brom, gallium och niob som i vissa fall kan användas som indikativa.

Elementkartor

I föreliggande rapport redovisas ett antal analysparametrar i form av singelelementkartor och beräknade (tematiska) kartor utvisande försurningsresistens. För guld, koppar, bly, zink, kobolt, nickel, krom och vanadin kan plottade kartor i skala 1:250 000 eller 1:100 000 framställas efter beställning hos Kundtjänst på SGU.

Färgkartorna är gjorda efter att de geografiskt oregelbundet placerade analysvärdena gjorts om till ett regelbundet punktnät (grid) med interpolerade värden. Den färgade ytan visar därmed endast en matematiskt beräknad halt (eller annan parameter), och ska därför behandlas med viss försiktighet. Detta innebär också att den färgade ytan kommer att täcka även områden med andra jordarter än morän, och i sådana områden kan avvikelser mellan verklig halt och beräknad halt vara stor. För att få en uppfattning om provtagningstäthet för morän är varje provlokal markerad med en punkt på färgkartorna.

Färgskalorna för markgeokemiska elementkartor är satta från grönt (låga halter) till rött (höga halter). För tematiska kartor används andra färgskalor för att undvika sammanblandning. Oberoende av färgskala är det viktigt att påpeka att höga halter eller andra värden inte automatiskt innebär att t.ex. någon risk för negativ miljöpåverkan föreligger – färgskalan används främst för att sätta olika geokemiska regioner i relation till varandra.

Tabell 4a. Projektområde Falun–Gävle–Sala. Bakgrundshalter i morän <0,063 mm, n=709, indelning enligt percentiler p10–p99, p50=medianvärde.

Totalhalter (Röntgenfluorescens, XRF), mg/kg

	Br	Cl	Co	Cr	Cu	Ga	Mo	Nb	Ni	Pb
P10	9	61	10	26	8	12	<2	9	9	22
P30	11	87	13	34	11	14	3	10	11	25
P50	13	106	14	40	15	15	3	12	13	28
P70	15	125	16	48	20	17	4	13	15	31
P90	18	161	20	64	32	20	5	16	21	38
P95	20	180	22	77	44	21	5	17	25	46
P99	25	221	27	109	81	25	7	21	38	82
Max	74	418	33	911	118	27	7	27	282	1436

Totalhalter (Röntgenfluorescens, XRF), mg/kg

	Rb	S	Sr	Th	U	V	Y	Zn	Zr
P10	99	63	101	6	1	32	25	32	229
P30	108	99	116	11	4	42	31	40	270
P50	115	132	128	14	6	50	36	48	300
P70	123	184	137	17	9	59	41	58	332
P90	141	323	150	23	13	79	48	81	383
P95	152	434	159	25	14	91	52	98	415
P99	174	724	173	31	20	113	67	178	478
Max	232	1146	321	54	30	166	83	530	541

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	106	0,53	11	20	25	8	0,3	17	0,9	619	4,1
P30	122	0,58	17	26	27	11	0,4	20	1,2	669	4,6
P50	129	0,62	20	29	30	13	0,5	23	1,4	701	5,1
P70	136	0,67	22	33	32	16	0,6	25	1,6	732	5,6
P90	147	0,75	25	41	35	20	0,7	27	2,1	778	6,4
P95	155	0,78	27	46	37	23	0,8	28	2,4	799	7,1
P99	177	0,90	34	54	41	29	1,3	31	3,5	853	8,4
Max	216	1,11	65	68	47	94	4,0	36	7,2	894	11,5

Bearbetning av data

Percentilindelning

Statistisk indelning efter percentiler görs för att visa ett elements halter i en region, exempelvis undersökningsområdet (tabell 4), och jämföra det med landet i övrigt (rikspercentiler, tabell 5). I tabellerna 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.

Korrelation

I texten nämns hur ett element förhåller sig till andra element i en korrelationsmatris. Här har Spearmans rang-korrelation använts eftersom geokemisk information är icke normalfördelade data. Metoden är relativt okänslig för extremvärden och är ett vanligt instrument för att mäta systematiska samband mellan variablerna (exempelvis elementen) i ett geokemiskt dataset. Ingående studier har dock inte gjorts.

Tabell 4b. Projektområde Falun–Gävle–Sala- Bakgrundshalter och pH i morän <0,063 mm, n=709, indelning enligt percentiler p10–p99, p50=medianvärde. Km-värde i fraktion <2 mm.

Salpetersyralakning med ICP-MS, mg/kg

	Ag	As	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	La	Li	Mo	Ni	Pb	Rb
<i>Km-värde</i>		15			0,4	30,0	120	100				35	80	
P10	0,04	0,5	0,3	0,13	0,04	2,1	5,5	3,4	12,0	3,1	0,10	2,8	5,8	3,1
P30	0,06	0,6	0,4	0,18	0,05	3,1	7,8	6,1	15,0	4,4	0,14	4,0	7,1	5,0
P50	0,07	0,8	0,5	0,23	0,06	3,9	10,2	8,5	17,3	5,7	0,20	5,3	8,5	7,0
P70	0,08	1,2	0,6	0,30	0,08	4,9	13,4	12,0	20,0	7,6	0,29	7,1	10,6	9,9
P90	0,11	2,5	0,9	0,53	0,12	7,1	19,6	20,2	26,4	12,7	0,52	10,8	16,3	16,0
P95	0,13	4,5	1,1	0,77	0,14	8,1	24,6	28,8	31,7	16,4	0,74	14,5	22,1	20,6
P99	0,22	15,4	1,6	1,55	0,25	12,7	39,8	52,5	41,7	26,7	1,33	24,4	46,2	36,9
Max	0,40	76,1	2,7	7,53	0,87	18,8	321,0	79,8	57,0	73,8	2,22	119,0	298,9	51,4

Salpetersyralakning med ICP-MS, mg/kg

Kungsvattenlakning med ICP-MS, mg/kg

	Se	Sn	Sr	Th	Ti	U	V	W	Y	Zn	Au, µg/kg	Bi	Sb	Sn	Ta
<i>Km-värde</i>							120				350				
P10	0,13	0,20	5,4	7,3	0,05	1,4	10,3	0,08	7,7	15,1	0,2	0,15	0,03	0,63	0,004
P30	0,17	0,27	7,0	9,5	0,06	1,8	13,6	0,12	10,0	20,9	0,5	0,22	0,04	0,79	0,009
P50	0,20	0,32	8,7	11,1	0,08	2,2	16,4	0,17	12,0	27,1	0,7	0,28	0,05	0,91	0,017
P70	0,24	0,37	10,4	13,0	0,10	2,7	19,8	0,23	14,0	35,6	1,0	0,38	0,06	1,08	0,026
P90	0,33	0,49	14,0	16,5	0,16	4,1	27,7	0,37	19,0	54,3	1,9	0,62	0,09	1,35	0,042
P95	0,38	0,58	16,6	19,2	0,22	5,2	32,8	0,50	22,0	66,5	3,0	0,89	0,12	1,59	0,056
P99	0,56	0,83	21,0	34,1	0,34	9,0	42,2	0,95	36,0	164,2	7,9	1,90	0,22	2,23	0,081
Max	1,37	1,45	34,7	64,5	0,50	32,0	54,2	7,67	58,5	476,0	46,5	7,53	0,50	3,21	0,277

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
P10	11,8	0,018	1,7	9,8	0,2	2,8	0,141	0,07	0,6	0,7	4,8
P30	16,3	0,026	2,4	13,8	0,4	4,2	0,197	0,10	0,9	0,9	5,1
P50	19,6	0,035	3,1	17,0	0,6	5,3	0,256	0,12	1,0	1,1	5,3
P70	23,3	0,046	3,7	20,7	0,8	6,8	0,325	0,13	1,3	1,3	5,5
P90	29,9	0,065	4,6	28,3	1,3	9,6	0,472	0,17	1,5	1,6	5,8
P95	34,1	0,077	5,2	32,3	1,9	11,1	0,562	0,18	1,8	1,8	6,1
P99	42,3	0,107	7,5	39,4	3,7	14,6	0,922	0,23	2,3	2,2	6,5
Max	76,8	0,142	42,0	47,4	5,6	38,2	3,500	0,33	3,8	2,6	8,5

Faktoranalys

Ytterligare en statistisk metod har använts för att belysa en variabls uppträdande i olika element-associationer (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.

GEOLOGI I OMRÅDET

För utförlig information om berggrund och jordarter i undersökningsområdet hänvisas till annan litteratur som getts ut i SGUs olika publikationsserier.

En översiktlig berggrundskarta med isräfflor inlagda, visas i figur 3. Berggrunden består generellt av granitoider, vulkaniter och basiska bergarter. Sedimentådergnejser (ljusblå färg på berggrundskartan) är ytbergarter som har bildats av ursprungligen leriga och sandiga sediment i havsmiljö och som omvandlats genom högt tryck och hög temperatur. Ytbergarter i form av vulkaniska bergarter betecknas med gul färg och kallas vulkaniter (i äldre litteratur leptiter eller leptitgnejs). De kan också vara mer

Tabell 5. Naturliga bakgrundshalter samt pH. Data från SGUs riksomfattande markgeokemiska kartering. Indelning i percentiler. Indelning enligt percentiler p10–p99, p50 = medianvärde.

FINFRAKTION (<0,063 mm), MORÄN
Totalhalter (Röntgenfluorescens, XRF)

	p10	p30	p50	p70	p90	p99	n
Al ₂ O ₃ g/kg	116	128	136	144	157	180	26343
BaO g/kg	0,44	0,52	0,59	0,67	0,79	1	26343
CaO g/kg	12,9	18,6	21,5	24	29,4	46,4	26343
Fe ₂ O ₃ g/kg	24,6	31,2	36,9	43,6	55,3	74,1	26343
K ₂ O g/kg	23,1	26,4	28,6	31,1	34,7	40,8	26343
MgO g/kg	7,3	10,4	13	15,8	21	31,8	26343
MnO g/kg	0,39	0,5	0,59	0,7	0,89	1,56	26343
Na ₂ O g/kg	18,1	22,9	26,7	30,9	35,9	41,7	26343
P ₂ O ₅ g/kg	1,41	2	2,32	2,62	3,16	4,59	26343
SiO ₂ g/kg*	675	704	721	738	764	825	26343
TiO ₂ g/kg	5,19	6,48	7,36	8,28	9,64	11,68	26343
As mg/kg**	<10	<10	<10	11	16	32	26343
Cl mg/kg	<50	<50	66	91	200	1336	26343
Co mg/kg	13	17	20	23	29	40	26343
Cr mg/kg	24	36	48	61	85	137	26343
Cu mg/kg	6	10	14	19	30	61	26343
Mo mg/kg	<2	<2	<2	2	2	7	26343
Ni mg/kg	8	12	16	21	32	58	26343
Pb mg/kg	16	20	22	26	32	57	26343
Rb mg/kg	62	74	85	98	120	161	26343
S mg/kg	91	117	146	197	356	1109	26343
Sr mg/kg	107	146	173	196	247	328	26343
V mg/kg	36	48	58	71	99	150	26343
Zn mg/kg	30	41	50	61	81	135	26343
Zr mg/kg	323	390	452	534	681	931	26343

*Beräknad SiO₂-halt

**Analysmetoden överskattar halter <30 mg/kg

FINFRAKTION (<0,063 mm), MORÄN
Kungsvattenlakning med ICP-MS

	p10	p30	p50	p70	p90	p99	n
BaO g/kg	0,017	0,027	0,038	0,05	0,075	0,137	9763
As mg/kg	1,2	1,8	2,6	4,5	11,6	31,7	9763
Au mikrog/kg	0,2	0,6	0,9	1,4	2,7	11,9	9763
Bi mg/kg	0,03	0,05	0,1	0,15	0,28	0,84	9763
Cu mg/kg	4,3	7,9	11,4	16,6	27,7	58,7	9763
Mo mg/kg	0,2	0,3	0,4	0,6	1,1	3,3	7818
Sb mg/kg	0,03	0,04	0,08	0,14	0,26	0,62	9763
Sn mg/kg	<1	<1	<1	<1	1,2	1,9	9763

FINFRAKTION (<0,063 mm), MORÄN
Salpetersyralakning (7M HNO₃) med ICP-MS

	p10	p30	p50	p70	p90	p99	n
Al ₂ O ₃ g/kg	9	13	17	21	30	51	12124
BaO g/kg	0,019	0,031	0,042	0,057	0,087	0,184	12124
CaO g/kg	2,2	3,3	3,9	4,6	5,8	56,7	12124
Fe ₂ O ₃ g/kg	9	14	17	23	33	56	12124
K ₂ O g/kg	0,5	0,9	1,2	1,7	2,7	5,4	12124
MgO g/kg	2,4	3,7	5	6,9	10,1	17,2	12124
MnO g/kg	0,12	0,18	0,23	0,32	0,53	1,21	12124
Na ₂ O g/kg	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0,2	0,4	12124
P ₂ O ₅ g/kg	1	1,6	1,9	2,3	2,8	3,9	12124
TiO ₂ g/kg	0,64	0,95	1,18	1,44	1,89	2,8	12124
Ag mg/kg	0,024	0,036	0,046	0,058	0,082	0,15	6830
As mg/kg	0,8	1,5	2,7	5,3	12,5	36,2	12124
Be mg/kg	0,22	0,31	0,4	0,52	0,79	1,31	12124
Bi mg/kg	0,024	0,05	0,087	0,13	0,244	0,72	12124
Cd mg/kg	0,03	0,05	0,07	0,1	0,16	0,37	12124
Co mg/kg	2,3	3,8	5,1	7	10,1	17	12124
Cr mg/kg	5,5	9	12,9	18,1	28,4	50,6	12124
Cu mg/kg	4,5	8	11,7	17	27,8	58	12124
La mg/kg	13,4	17	20	24,1	34	61,9	12124

	p10	p30	p50	p70	p90	p99	n
Li mg/kg	4	6,5	9	12,6	19	33,8	12124
Mo mg/kg	0,13	0,22	0,32	0,5	1,05	4,71	12124
Ni mg/kg	3,5	5,9	8,5	12,5	22,3	44,9	12124
Pb mg/kg	3,3	4,7	6,7	9,7	16	39,5	12124
Rb mg/kg	5,5	9	12,4	16,7	25,2	46,4	12124
Se mg/kg*	0,10	0,15	0,20	0,27	0,47	0,95	12124
Sn mg/kg	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,9	12124
Sr mg/kg	5,6	8,3	10,4	13	18,7	88,8	12124
Th mg/kg	4,2	5,8	7,4	9,3	12,8	20,8	9673
Tl mg/kg	0,05	0,08	0,13	0,19	0,3	0,6	12124
U mg/kg	0,9	1,2	1,5	2	3,3	7,4	12124
V mg/kg	9,9	15,2	20,1	26	36,8	58,4	12124
W mg/kg	0,04	0,06	0,09	0,14	0,23	0,5	12124
Y mg/kg	6,8	9	11,1	13,6	19,1	36,1	12124
Zn mg/kg	13,2	20,2	29,2	41	61,4	111	12124

MORÄN <2 mm

Salpetersyralakning (7M HNO₃) med ICP-MS

	p10	p30	p50	p70	p90	p99	n
Al ₂ O ₃ g/kg	4,8	7,2	9,9	13	19	33	1051
BaO g/kg	0,01	0,016	0,024	0,032	0,05	0,098	1051
CaO g/kg	1,07	1,66	2,1	2,67	3,52	5,44	1051
Fe ₂ O ₃ g/kg	5,3	7,9	10,5	14	20,9	33,6	1051
K ₂ O g/kg	0,36	0,58	0,8	1,14	1,84	3,5	1051
MgO g/kg	1,7	2,5	3,6	5	7,8	13,5	1051
MnO g/kg	0,07	0,1	0,14	0,18	0,29	0,52	1051
Na ₂ O g/kg	0,05	0,07	0,08	0,1	0,14	0,21	1051
P ₂ O ₅ g/kg	0,48	0,71	0,97	1,32	1,76	2,46	1051
TiO ₂ g/kg	0,42	0,62	0,77	0,95	1,27	1,93	1051
Ag mg/kg	0,014	0,019	0,024	0,032	0,053	0,102	1051
As mg/kg	0,4	0,7	1	1,6	2,9	11,4	1051
Be mg/kg	0,12	0,18	0,23	0,31	0,47	0,88	1051
Bi mg/kg	0,013	0,023	0,042	0,071	0,148	0,53	1051
Cd mg/kg	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06	0,17	1051
Co mg/kg	1,3	2,1	3,1	4,2	6,4	13,1	1051
Cr mg/kg	3	4,8	7	10,1	16,7	42,2	1051
Cu mg/kg	2,4	4,5	6,7	9,8	18,3	71,1	1051
La mg/kg	8	10,7	12,7	15	21	36	1051
Li mg/kg	3	4,4	5,7	7,7	12,3	23,6	1051
Mo mg/kg	0,08	0,13	0,18	0,29	0,54	1,9	1051
Ni mg/kg	1,9	3,1	4,5	6,6	11,4	30,1	1051
Pb mg/kg	1,8	2,5	3,1	4,3	7,1	14,4	1051
Rb mg/kg	3,5	5,6	7,4	10,2	16,3	37,8	1051
Se mg/kg*	0,05	0,08	0,11	0,16	0,26	0,56	1051
Sn mg/kg	0,1	0,13	0,17	0,21	0,3	0,5	1051
Sr mg/kg	2,5	3,7	4,7	5,9	8,2	14,9	1051
Th mg/kg	2,7	3,5	4,5	5,7	8,1	15	1051
Tl mg/kg	0,03	0,041	0,06	0,091	0,157	0,37	1051
U mg/kg	0,5	0,8	1	1,3	2,1	5,4	1051
V mg/kg	6	9,4	12,7	16,7	23,6	41,1	1051
W mg/kg	0,03	0,04	0,06	0,08	0,14	0,27	1051
Y mg/kg	3,7	4,7	5,6	6,8	9,4	16	1051
Zn mg/kg	8,2	11,2	15,1	20,8	33,6	66,3	1051

SEDIMENT (<2 mm), dominans av leror
Salpetersyralakning (7M HNO₃) med ICP-MS

	p10	p30	p50	p70	p90	p99	n
Al ₂ O ₃ g/kg	12,4	22,9	30,7	36,2	43,7	56,2	544
BaO g/kg	0,03	0,07	0,09	0,11	0,15	0,23	544
CaO g/kg	1,9	3,7	5	6,2	7,5	51,7	544
Fe ₂ O ₃ g/kg	14,7	28,1	37,3	43,9	52,9	66,4	544
K ₂ O g/kg	1,4	3,1	4,5	5,6	7,1	8,8	544
MgO g/kg	4,1	7,6	10,8	13	16	20,3	544
MnO g/kg	0,17	0,34	0,52	0,67	0,9	1,29	544
Na ₂ O g/kg	0,11	0,24	0,34	0,44	0,62	1,46	544
P ₂ O ₅ g/kg	0,7	1	1,2	1,4	1,7	2,5	544
TiO ₂ g/kg	0,6	1	1,4	1,7	2,1	2,5	544
Ag mg/kg*	0,04	0,07	0,09	0,12	0,18	0,22	544
As mg/kg	1,2	2,3	3,8	5,4	8,3	13,1	544
Be mg/kg	0,31	0,68	0,90	1,14	1,55	1,90	544
Bi mg/kg	0,07	0,13	0,17	0,24	0,49	0,58	544
Cd mg/kg	0,03	0,05	0,06	0,10	0,17	0,30	544
Co mg/kg	3,6	6,8	9,7	12,2	15,7	19,4	544
Cr mg/kg	9,6	17,3	22,9	30,2	44,0	60,2	544
Cu mg/kg	6,4	11,8	14,9	19,3	28,1	43,2	544
La mg/kg	16,1	31,5	42,9	52,1	61,7	84,7	544
Li mg/kg	7,4	14,0	18,7	23,0	31,9	44,7	544
Mo mg/kg	0,14	0,24	0,34	0,54	1,45	6,57	544
Ni mg/kg	5,9	11,2	16,0	20,0	29,6	41,7	544
Pb mg/kg	4,3	8,7	11,2	14,8	22,2	27,9	544
Rb mg/kg	14,3	32,3	45,1	57,2	69,0	82,7	544
Se mg/kg*	0,11	0,22	0,27	0,33	0,48	1,84	544
Sn mg/kg*	0,12	0,19	0,25	0,32	0,39	0,57	544
Sr mg/kg	8,3	16,7	24,0	30,1	38,2	127,6	544
Th mg/kg	5,8	9,4	11,9	14,3	19,0	27,0	544
Tl mg/kg	0,11	0,21	0,28	0,34	0,44	0,58	544
U mg/kg	1,1	1,8	2,4	3,3	5,1	8,8	544
V mg/kg	17,6	32,8	40,6	48,6	59,2	73,0	544
W mg/kg*	0,02	0,03	0,04	0,06	0,10	0,28	544
Y mg/kg	8,0	17,2	23,2	28,5	35,4	47,7	544
Zn mg/kg	22,9	46,9	62,3	74,8	102,7	129,3	544

*Låg kvalitet på låga nivåer

pH

fasta klassgränser

morän	4,6	5	5,5	6	6,5	7	7,5
sediment	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8

eller mindre omvandlade och är oftast sura (kiselrika). Andra ytbergarter finns i form av kristallina karbonatstenar (urkalksten, dolomit), som betecknas med blå färg. Granodioriter och äldre graniter betecknas med brun färg. De är djupbergarter som bildats av magmor. De kallas också gnejsgraniter eftersom de ofta är omvandlade. Tillsammans med nämnda bergarter finns massiv eller inneslutningar av metabasit som utgörs av omvandlade yt- eller djupbergarter (amfibolit, gabbro). De kallades tidigare allmänt för grönstenar och betecknas med grön färg på berggrundskartan. Enstaka smala gångar eller svärmar av diabas genomtränger berggrunden i delar av kartområdet. De markeras med violett, men framträder inte i denna berggrundskartas skala. Med ljus röd färg betecknas yngre graniter och pegmatiter.

Kartområdet ligger i mellersta Sveriges malmprovins och ett stort antal järn-, koppar-, zink-, bly- och silverförekomster finns dokumenterade. Många små förekomster har brutits ut under tidigare sekel

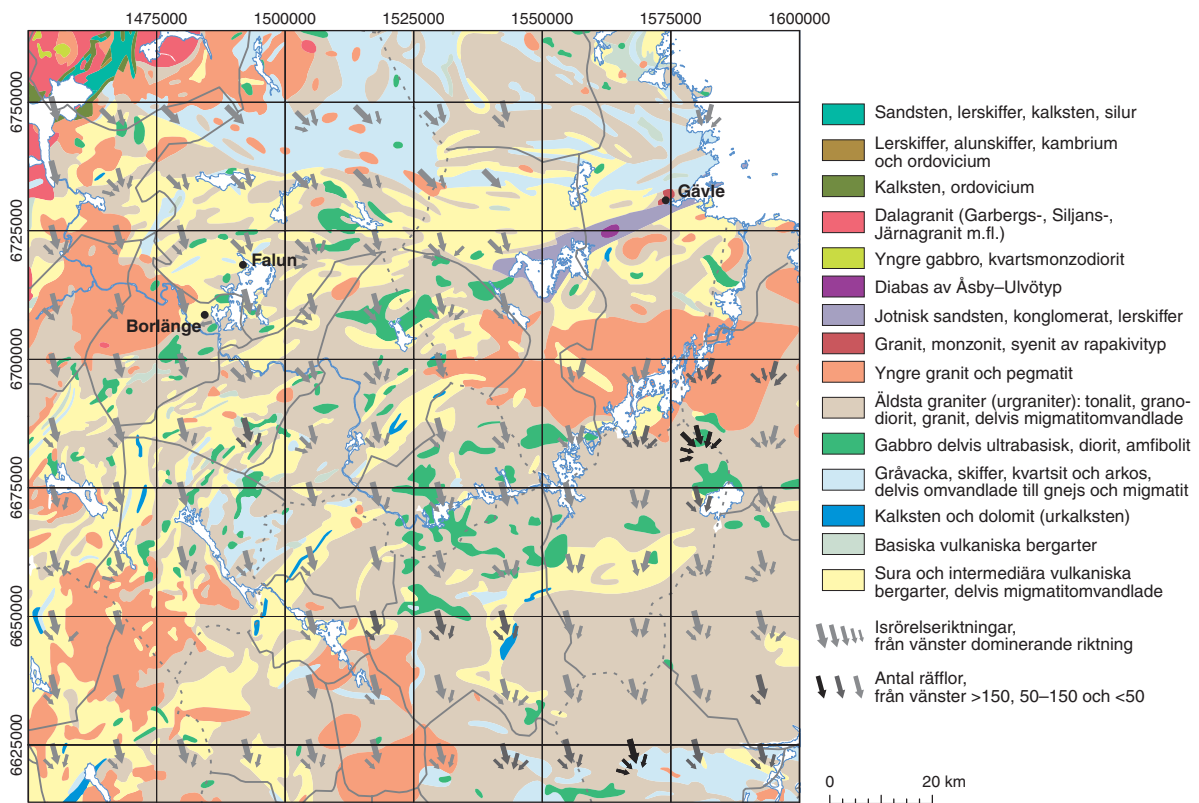


Fig. 3. Översiktlig berggrundskarta med isrörelseriktningar.

Bedrock map with ice flow movement.



Fig. 4. Gruvöppning från Storbergets gruvor, Hofors-Torsåkers malmfält. Foto: Per Wretling.

View from Storberget in the mining area of Hofors-Torsåker.

och står nu övergivna och är helt övervuxna (ex. fig. 4). Inom området finns dock även Falun, Garpenberg, Hofors-Torsåkers bergslag och Sala. Ett stort antal skarn-kalk-järnmalmer finns i området. De uppträder i stråken med vulkaniska sedimentbergarter (vulkaniterna). Ofta finns lager eller linser av kalkstenar och dolomiter i samma bergartskomplex liksom mafiska inneslutningar.

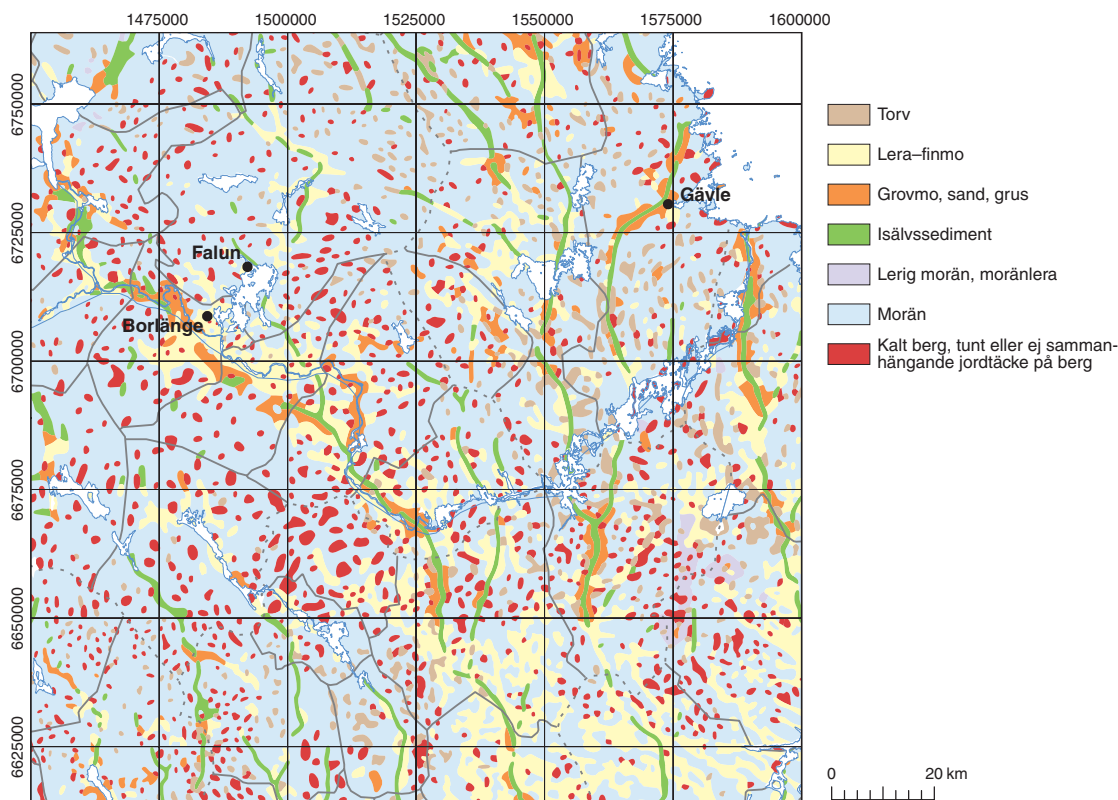


Fig. 5. Översiktlig jordartskarta.

Soil map.

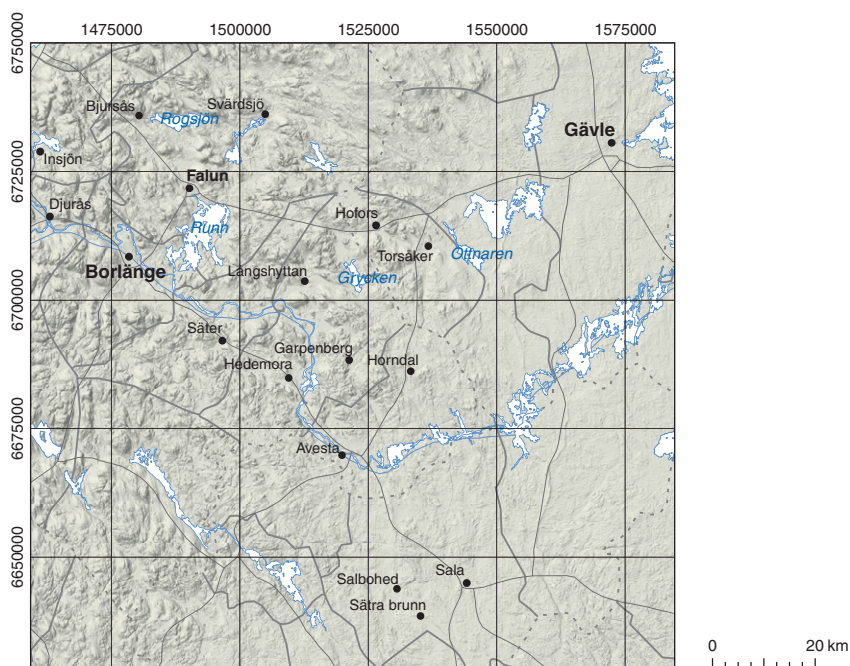


Fig. 6. Platsnamn som nämns i texten.

Places referred to in text.

De olika bergarterna i undersökningsområdet uppträder ställvis i många mindre enheter, ofta tvärs isrörelseriktningen. Bergarterna har ibland ganska lika elementuppsättning och kan ibland innehålla s.k. småmineral (accessoriska) utöver vanliga bergartsmineral. Till småmineralen räknas bland annat magnetit, titanit, oxidmalm och kis, vilket medför att förhöjningar av ett flertal metaller kan uppträda sporadiskt i moränen, exempelvis även i gnejsiga områden.

Den nordvästra delen av undersökningsområdet ligger över högsta kustlinjen, cirka 200 m ö.h. i de norra delarna och ner till 170 m ö.h. i söder. Isrörelseriktningen är från nordnordväst i höjdområdena i nordväst. I söder är riktningen mer nordlig och i nordost finns riktningar från nordnordost. Isräfflor som visar riktningarna är markerade på berggrundskartan i figur 3. Området täcks av morän, som under högsta kustlinjen kan vara kraftigt svallad på vissa håll. Stora såväl som mindre åsstråk finns i hela området. En översiktlig jordartskarta visas i figur 5. I ortsnamnkartan, figur 6, återfinns en del av de platser som nämns i den följande texten.

GEOKEMI I OMRÅDET

I undersökningsområdet har prover från 709 moränlokaler samlats in. Merparten av de insamlade proven är tagna i sandig (normal) morän. Prover har också tagits i grusigare morän (ca 75 lokaler), i siltig morän (ca 155 lokaler) och ett fåtal i lerig morän. Utöver morän har prover från 121 sediment-lokaler samlats in (redovisas ej i denna rapport), bland dessa ett stort antal lokaler med lera respektive silt. Sedimentprovtagningen har främst koncentrerats till åsarnas närområden. Ingen gyttjelera har påträffats vid provtagningen.

Medianhalterna för grundämnen i regionen visar en del skillnader i jämförelse med hela landet, se tabellerna 4 och 5. Generellt har kartområdets moräner högre medianhalter av Ag, Bi, Cl, Pb, Th, U och W och lägre medianhalter av As, Au, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, La, Li, Mn, Na, Ni, P, S, Sb, Si, Sr, Ti, Tl, V, Zn och Zr. För en del element finns skillnader beroende på provberedningsförfarande före analys; t.ex. är medianhalten för barium, kalium, molybden och rubidium högre och medianhalten för aluminium lägre än i övriga landet om man bara ser till totalhalterna, medan medianhalterna för aluminium är högre och för kalium lägre än övriga landet om man ser till de salpetersyralakbara halterna.

Den geokemiska kartläggning över Europa som refereras till i texten är FOREGS, Forum of European Geological Surveys (Salminen m.fl. 2005). Digitala FOREGS-kartor finns att se på www.gtk.fi/publ/foregsatlas. Här kan även databasen som FOREGS-kartorna baseras på laddas ner.

Utöver referenser i avsnitten om elementen på följande sidor, har fakta bland annat hämtats från SGUs periodiska publikationer – Mineralmarknaden, där ett flertal metaller har egna temanummer.

Miljögeokemi

Gränsvärden för känslig markanvändning (KM)

För miljögeokemisk bearbetning används de salpetersyralakade elementhalterna samt kungsvattenlakade halter för guld, antimon, tantal och tenn. Naturvårdsverket har slagit fast gränsvärden i markfraktionen <2 mm för känslig markanvändning (KM) för flera metaller: arsenik 10 mg/kg, bly 50 mg/kg, kadmium 0,5 mg/kg, kobolt 15 mg/kg, krom 80 mg/kg, koppar 80 mg/kg, nickel 40 mg/kg, vanadin 100 mg/kg och zink 250 mg/kg (Naturvårdsverket 1999, 2008). Gränsvärdena uppdaterades i oktober 2008 varvid samtliga (utom kadmium och nickel) sänktes. Nya gränsvärden tillkom för antimon, barium och molybden. Gränsvärden finns även för sexvärt krom och för kvicksilver, men dessa saknas i SGUs databas). Som tidigare nämnts kan en metallhalt i moränfraktionen <0,063 mm multipliceras med en 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 lokal 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 jämförelsevärden 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. 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 lättlösliga kalciummineral mindre frekvent eller saknas och svavelhalterna kan vara höga. Det är väl känt att en del metaller har lätt för att frigöras vid sjunkande pH, likaså att andra element fastläggs. Kadmium, kobolt, mangan, nickel, tallium och zink är exempel på metaller som är lätttrörliga i sur miljö. Generellt sett börjar de mobiliseras när markens pH är under 6. I områden med höga metallhalter och låga pH-värden kan man därför befara att elementen kan ha börjat lösas ut och nått grundvattnet.

I tabell 6 anges metallernas gränsvärden för känslig markanvändning (KM-värden). Jämfört med dessa finns i undersökningsområdet halter av arsenik, kadmium, krom, nickel och bly som överskrider KM-värdena. De höga halterna är med stor sannolikhet ett geologiskt arv och inte orsakade av antropogen aktivitet. Samtliga lokaler bör dock undersökas närmare för att utröna orsaken till anormala metallhalter och eventuell påverkan på grundvattnet. I tabell 7 anges i vilka kommuner halter överstigande KM-värdet har uppmätts.

Metaller i mark och vatten

Metaller i berg och jord påverkar yt- och grundvatten och därmed vårt dricksvatten i olika grad. Livsmedelsverket har satt gränsvärden för metaller och andra ämnen i dricksvattnet med avseende på hur tjänligt vattnet är för konsumtion och för flertalet av de nedan uppräknade ämnena finns ett värde angett för gränsen mellan tjänligt och otjänligt vatten (LIVSFS 2005). Beroende på i vilken form metaller föreligger kan de ge oönskade hälsoeffekter. I Sverige har Socialstyrelsen och Livsmedelsverket gett

Tabell 6. Metaller med gränsvärden för känslig markanvändning (inom parentes motsvarande halt i fraktion <0,063 mm) och antal provtagna lokaler i morän där KM-värden sannolikt överskrids. Sort: mg/kg.

Element	KM-värden	Morän > KM
Antimon	12 (17)	0
Arsenik	10 (14)	9
Barium	200 (285)	0
Bly	50 (70)	6
Kadmium	0,5 (0,7)	3
Kobolt	15 (21)	0
Koppar	80 (114)	0
Krom	80 (114)	1
Molybden	40 (57)	0
Nickel	40 (57)	1
Vanadin	100 (143)	0
Zink	250 (360)	2

Tabell 7. Kommuner i undersökningsområdet där en eller flera metaller har halter över KM-värdena. Inom parentes anges antalet lokaler om de är fler än en.

Kommun	Metall i morän
Sala	As (7 st), Ni, Cr, Pb
Säter	As, Cd (2 st), Pb (3 st), Zn (2 st)
Leksand	Cd, Pb
Hedemora	Pb
Gävle	As

rekommendationer på att dricksvatten inte ska ha halter av arsenik som överstiger 10 µg/l och uran ska inte överstiga 15 µg/l. Världshälsoorganisationen (WHO 2004), har tagit fram riktvärden för bland annat metaller och metalloider i dricksvatten, de flesta är baserade på hälsoeffekter: aluminium (0,2 mg/l), antimon (0,02 mg/l), arsenik (0,01 mg/l), barium (0,7 mg/l), bly (0,01 mg/l), kadmium (0,003 mg/l), 3-värt och 6-värt krom (0,05 mg/l), koppar (2 mg/l), kvicksilver (0,001 mg/l), mangan (0,4 mg/l), molybden (0,07 mg/l), nickel (0,02 mg/l), selen (0,01 mg/l), natrium (200 mg/l), uran (0,015 mg/l) och zink (3 mg/l) m.fl. I USA har EPA (Environmental Protection Agency) angett nära nog identiska hälso-baserade riktvärden, men har också med beryllium (0,004 mg/l) och tallium (0,002 mg/l) i sin lista. Det finns också andra aspekter på det vatten som används i hushållet. Helst vill man ha ett vatten som smakar gott, luktar gott, är färglöst och klart och det ska vara harmlöst mot ledningssystem. Detta har gjort att EPA även tagit fram andra riktvärden som baseras på estetiska, kosmetiska och tekniska effekter. Utöver flera av ovanstående metaller och metalloider har exempelvis silver fått ett kosmetiskt baserat värde på 0,1 mg/l, beroende på att höga silverhalter kan missfärga hud och ögonvitor. Riktvärdena gäller vare sig ämnena är naturligt förekommande i vattnet eller finns där som antropogen förorening.

En vanlig orsak till exponering för metaller är att dricksvattnet innehåller höga halter av metaller och metalloider som på sikt kan ge hälsoeffekter. Med ledning av geokemiska kartor och kännedom om berggrunden kan man få en uppfattning om i vilka regioner det finns en risk för att dricksvatten kan ha oönskade höga naturliga metallhalter. I exempelvis Dalarnas län finns arsenik, bly, kadmium, uran m.fl. i så pass höga koncentrationer i dricksvattnet att Socialstyrelsens riktvärden och rekommenderade värden överskrids (Länsstyrelsen 2005).

I Sverige finns uranrik berggrund i form av alunskiffer och yngre graniter och pegmatiter samt deras moräner. Dessa kan ge upphov till radon i luft och vatten och till löst uran i dricksvatten. I Siljansringen i Dalarna har man mätt upp mycket höga uranhalter i dricksvatten och det rekommenderade värdet på 15 µg/l i dricksvatten överskrids i ett flertal kommuner.

Att högre halter arsenik i vatten förekommer i anslutning till sulfidmalmer och svartskiffer är påtagligt i malmprovinserna i Västerbotten där kraftigt förhöjda arsenikhalter finns i både mark och bäcksystem. Söderut i landet förknippas förhöjda arsenikområden främst med förekomsten av kambrosiluriska skifferbergarter och äldre sedimentbergarter (gråvackor). Undersökningar har visat att höga arsenikhalter i brunnsvatten till största delen kan härledas till sådana geologiska faktorer (Berglund m.fl. 2005). Sverige har ett gränsvärde på 10 µg/l för dricksvatten och provtagningar av brunnsvatten inom Sverige har gett upp till 100 gånger så höga arsenikhalter. Det finns ett presumtivt riskområde i kartområdets södra del. Det arsenikförhöjda moränområdet ligger intill Badelundaåsen (Grällstaåsen) sydost om Salbohed, och har höga arsenikhalter (max 76 mg/kg) bl.a. i närheten av Sättra brunn.

Välkänt är att områden som har eller haft gruvverksamhet eller där avfall från gruvhanteringen deponerats har höga metallhalter i mark och vatten. De utgör naturligtvis riskområden för metall-exponering. Det gör även de metallhöga områdena i den geokemiska kartbilden, om än av lägre dignitet, till dess områdena undersökts vidare.

En annan vanlig orsak till exponering för metaller är via det översta marklagret. Särskilt för barn som vistas på iordningställda lekplatser är risken för att få i sig giftiga ämnen stor (Ljung 2006). Små barn har lika gärna sina fingrar i munnen som i den sand eller jord som ligger bar. Därför är det av stor vikt att den mineraljord som tillförs lekplatser undersöks på sitt innehåll av såväl metaller som andra ämnen. De markgeokemiska kartorna lämpar sig väl för att finna områden med lågt metallinnehåll att hämta jord från.

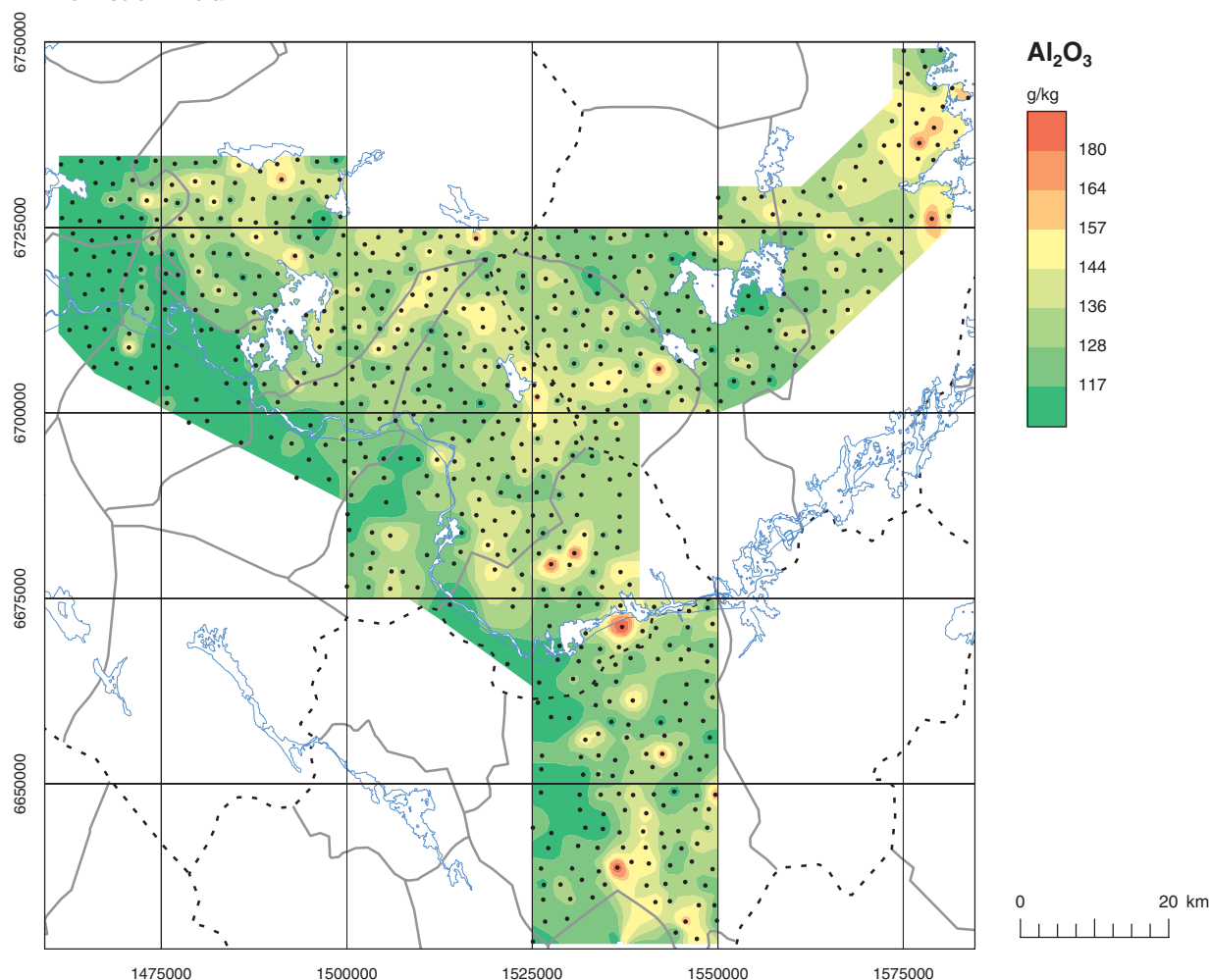
Aluminium (Al₂O₃)

Aluminium är den vanligast förekommande metallen i jordskorpan men uppträder aldrig i ren form. I vår berggrund och våra jordarter uppträder aluminium huvudsakligen i bergartsbildande mineral och till viss andel i sekundära mineral som bildats genom vittringsprocesser. De bergartsbildande mi-

Aluminium (Al_2O_3)

Analysmetod: XRF

Provmedium: Morän



neralen domineras av olika typer av fältspater. Bergarter som omvandlats, t.ex. gnejser och kvartsiter, innehåller ofta jämförelsevis höga aluminiumhalter. Basiska bergarter, skiffrar, diabaser och graniter innehåller också elementet, medan ultramafiska 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 svårvittrade kalifältspater än i plagioklaser och Fe- och Mg-silikater. Löst aluminium binds åter bland annat i sekundära lermineral, exempelvis kaolinleror. Värt att notera är att mineralen i våra leror till stor utsträckning består av olika aluminiumsilikat. Lerfraktionens (material <0,002 mm i kornstorlek) halt av aluminium kan uppgå till 20 vikt-% Al_2O_3 .

Aluminium är en lättmetall och inte lika giftig som en del tungmetaller är för människan. Det har ingen känd funktion i kroppen och i normala doser tar kroppen heller förmodligen inte skada, förutom i de fall en allergisk reaktion inträffar. Det finns dock epidemiologiska studier som antyder ett samband mellan hög aluminiumhalt i dricksvatten och ökad förekomst av Mb Alzheimer, men slutliga bevis saknas (www.occmmed.uu.se/metal/al3.html). Aluminium är mycket svårslösligt i naturliga vatten och intag i samband med mat och dryck passerar ut med urinen. Det har tidigare förekommit indicier på att aluminium orsakar Alzheimers sjukdom, då man funnit förhöjda aluminiumvärden hos dessa personer, men andra studier avfärdar aluminium som *orsak* och ser istället ackumuleringen som en *verkan* av sjukdomen. Den egentliga orsaken är ännu ej klarlagd. Det måste noteras att endast det aluminium som är mobilt och lösligt kan utgöra en risk för levande organismer. En sådan risk

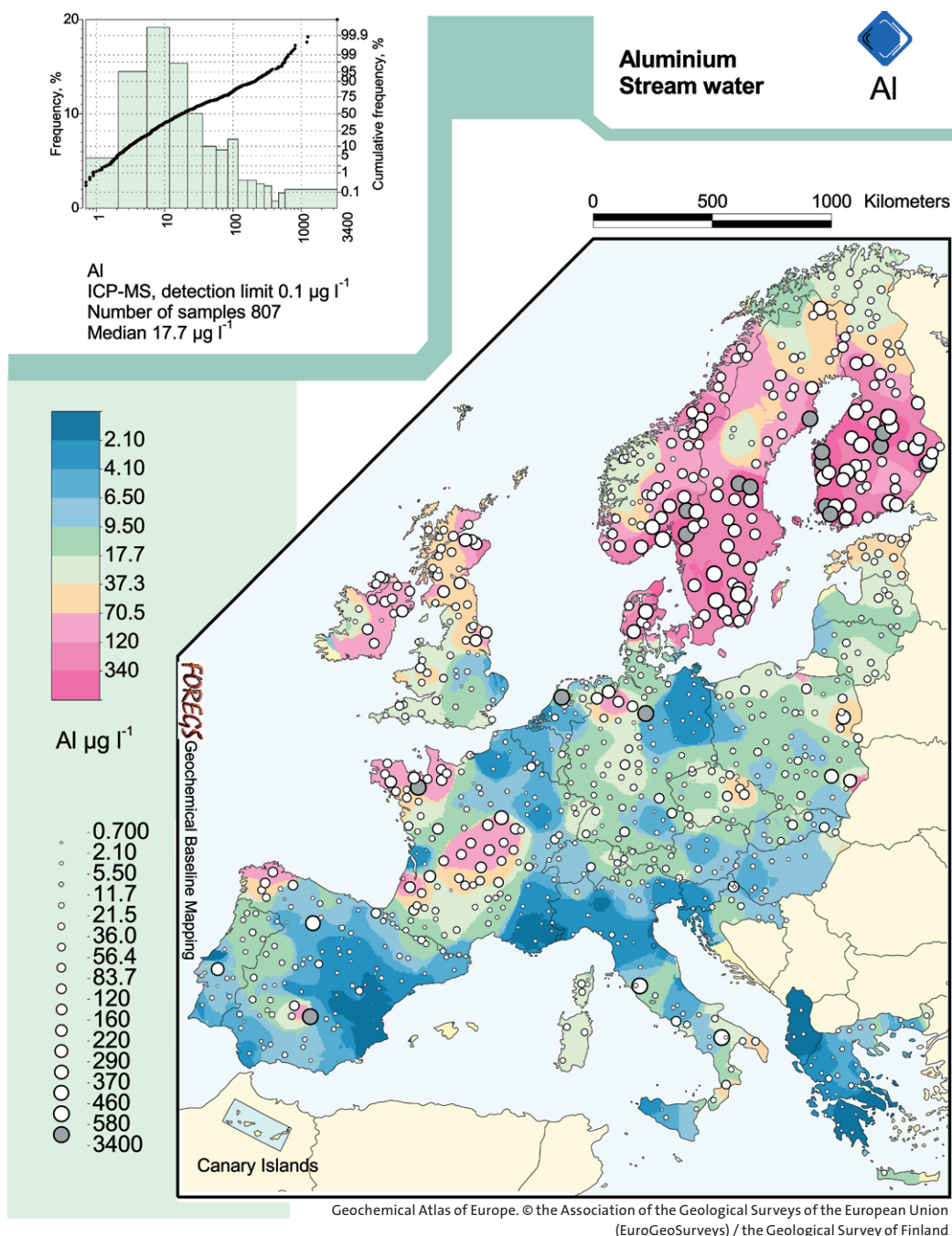


Fig. 7. Aluminium i medelstora ($<100 \text{ km}^2$) vattendrag. Filtererat vatten från 51 platser i Sverige.

Aluminum in stream water ($<100 \text{ km}^2$). Filtered water from 51 sites in Sweden. From Salminen et al. (2005).

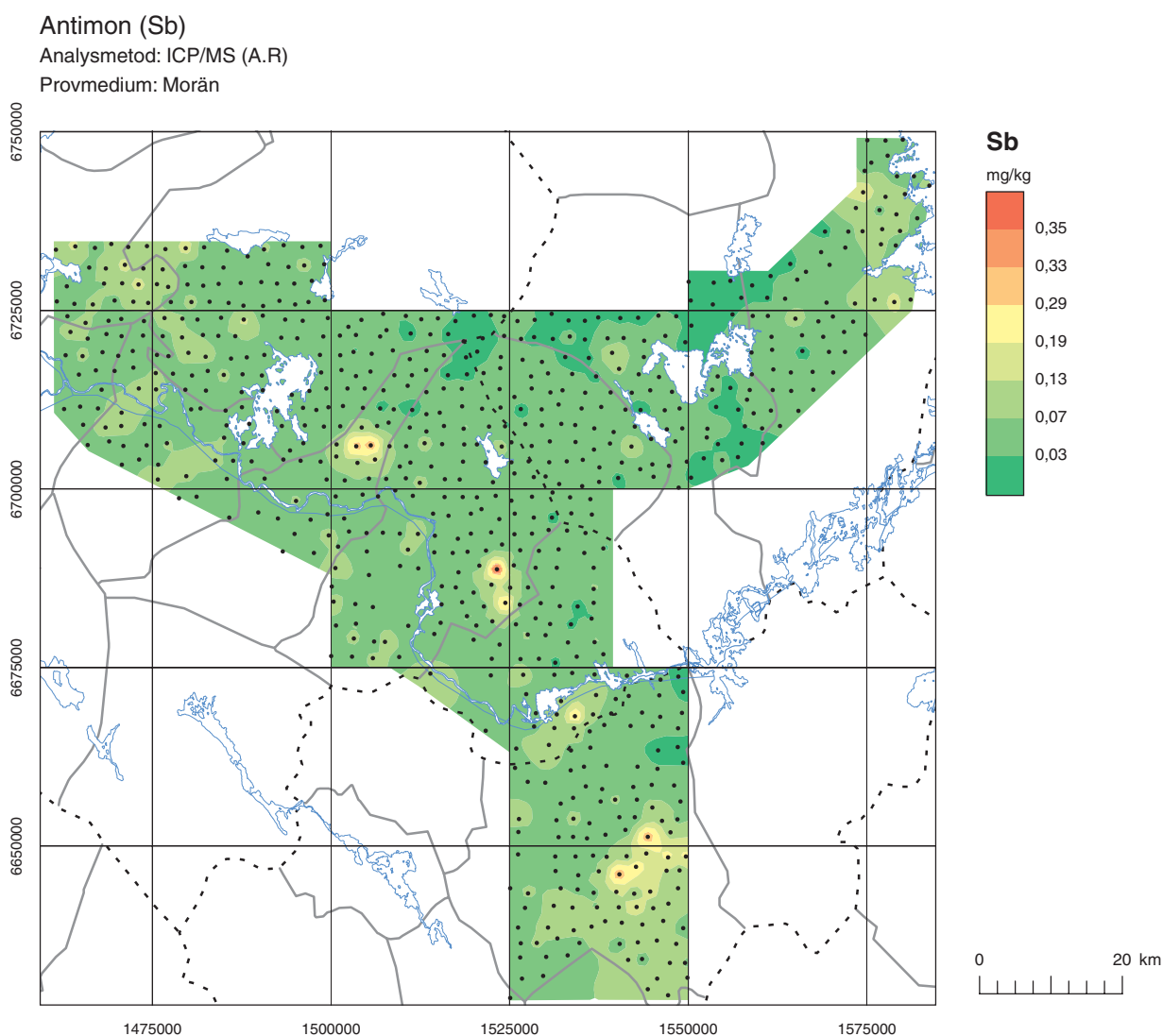
kan vara att aluminium binder fosfor, vilket försvårar upptaget av fosfor i kroppen. Det är främst i samband med försurande miljö som aluminium kan lösa ut ur jordar och nå vattendrag och sjöar. I vissa fall kan det orsaka skador på fisk då aluminiumhydroxid faller ut och sätter sig på fiskgälar och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

Jämfört med övriga landet har kartområdets moräner något lägre medianvärde för totalhalten av aluminium men för syralakbart aluminium är medianhalten högre. Kartbildens förhöjningar av totalhalten av aluminium anknyter i viss mån till områden med omvandlade sedimentbergarter (gnejser, gråvackor) i söder och i nordost. Aluminium korrelerar i moränerna med järn, kalium, magnesium, barium, titan, gallium, kobolt, lantan, litium m.fl.

Aluminiumhalter i naturliga, rinnande vatten kontrolleras till stor del av pH, vilket gör att i stort sett hela Skandinavien har högt innehåll av metallen (Salminen m.fl. 2005, se figur 7). Det är främst berggrundens låga innehåll av vittringsbenägna kalciummineral som leder till lågt pH i Sverige. Istället är det lättlösliga järn-aluminiumsilikater som buffrar vätejonerna men som kommer ut i vattendragen.

Antimon (Sb)

Metalloiden (halvmetallen) antimon förekommer med högst halter i skiffrar, medan graniter, kalksten och basiter har lägre halter. Sandstenar innehåller mycket låga halter. Geokemiskt är antimon närbesläktat med arsenik och vismut och förekommer därför ofta i mineraliseringar tillsammans med andra sulfider såväl med dessa element som med bly, koppar, silver, guld m.fl. Vanligast 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 frigörs sannolikt ganska lätt vid vittring, men anses inte vara särskilt mobil. Kännedomen om hur antimon uppträder är begränsad, men förekomst i järnhydroxider, i kol och i naturliga vatten indikerar viss rörlighet.

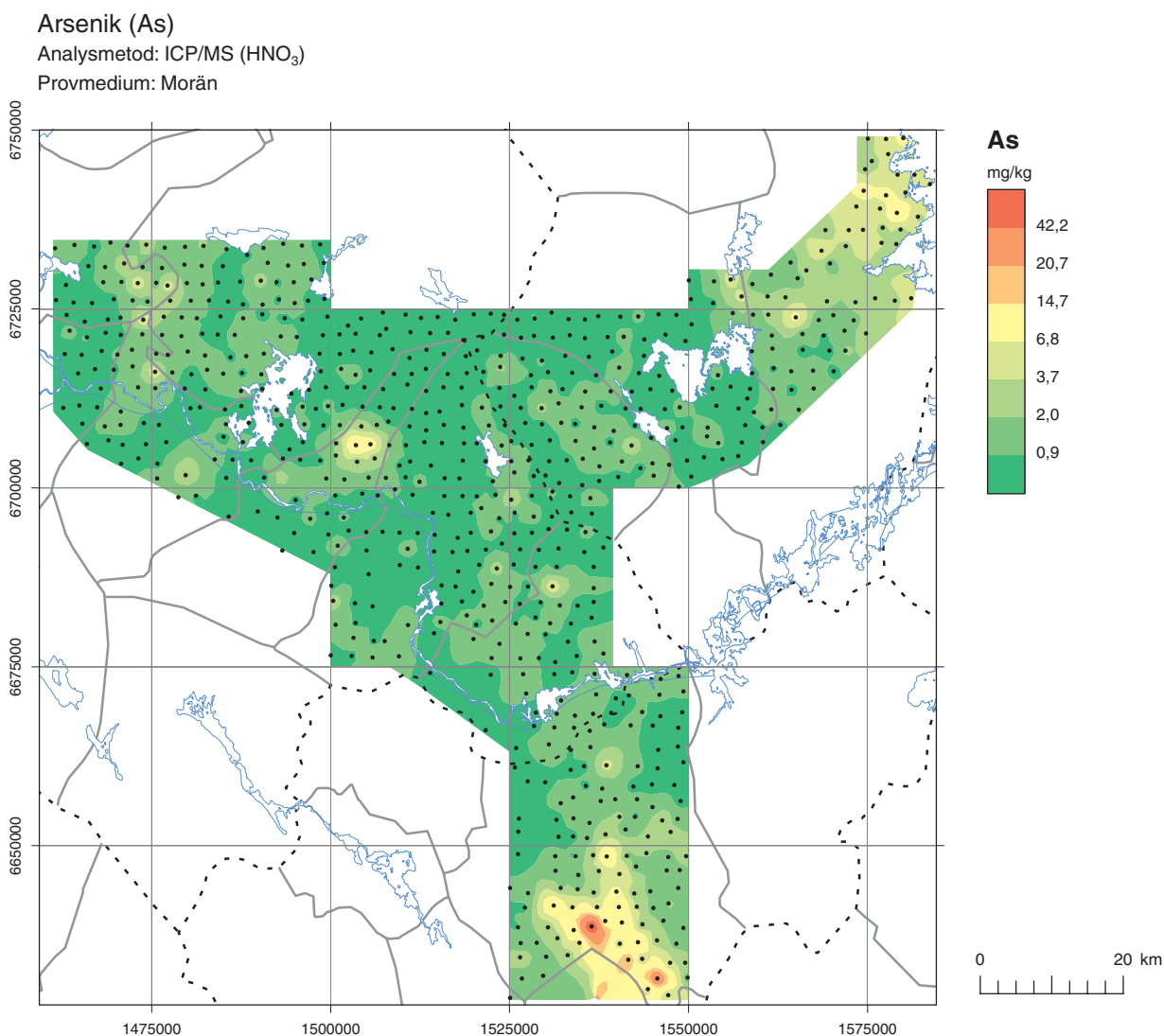


Bland annat i samband med gruvhantering kan antimon spridas i miljön. Antimon kan vara rörligt och många av dess föreningar är mycket giftiga. Antimonexponering kan ge hud- och lungskador.

Halterna i undersökningsområdets moräner är låga. De få förhöjningar som finns i moränen ansluter till gruvområden vid Garpenberg, Lövågruvorna, Bäsinge koppargruva och stråket Sala–Snarpsåtra. Malmen i Sala silvergruva har för övrigt varit mycket rik på antimon, en av beståndsdelarna i det silverrika mineralet pyrargyrit (Ag_3SbS_3) som ingått i Salamalmerna. Från Niclasgruvorna nordost om Sala fann man för första gången ett antimonmineral som fick namnet gudmundit (FeSbS), för övrigt funnet även i Kalvbäcksgruvorna öster om sjön Runn. Korrelation finns med bly, silver, kadmium, zink och mangan och även faktoranalysen placerar antimon i samma elementgrupp.

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. I Sverige finns



arsenikkis (FeAsS) 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 ganska begränsad då arsenik binds till leror, metallhydroxider (järn, aluminium och mangan) och organiskt material. De vanligaste förekomstformerna för arsenikjoner är under oxiderande förhållanden 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 mikrogram 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 $10 \mu\text{g/l}$. 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 symptomen 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).

Arsenikhalterna i undersökningsområdets moräner och sediment är förhållandevis låga jämfört med landet i övrigt. Förhöjningar finns i moränområden anslutande till omvandlade bergarter, oftast med vulkaniskt eller sedimentärt ursprung som sedimentådergnejsen norr om Gävle. De malmstråk som finns inom kartbladets gränser markeras inte med arsenikförhöjd morän, även om det finns en lätt förhöjning i trakten av Lövåsfältets gruvor öster om sjön Runn. Högst arsenikhalter hittar man istället i söder, i området mellan Sala, Salbohed och söderut. Här har moränen sina uppmätta maximala värden inom kartbladet och med halter från 76 mg/kg ner till 14 mg/kg har ett stort område arsenikhalter som överstiger gränsen för känslig markanvändning. Dessutom ligger delar av Badelundaåsens (Gällerståsen) vattenområde inom de arsenikförhöjda områdena vilket innebär att det finns en potentiell risk för att dricksvatten från enskilda brunnar kan ha arsenikhalter överstigande gränsvärdet för vatten på $10 \mu\text{g/l}$ (SLV 2005). Statistiska korrelationer med andra element är svaga men finns med kalium, rubidium, tallium och järn.

Barium (BaO)

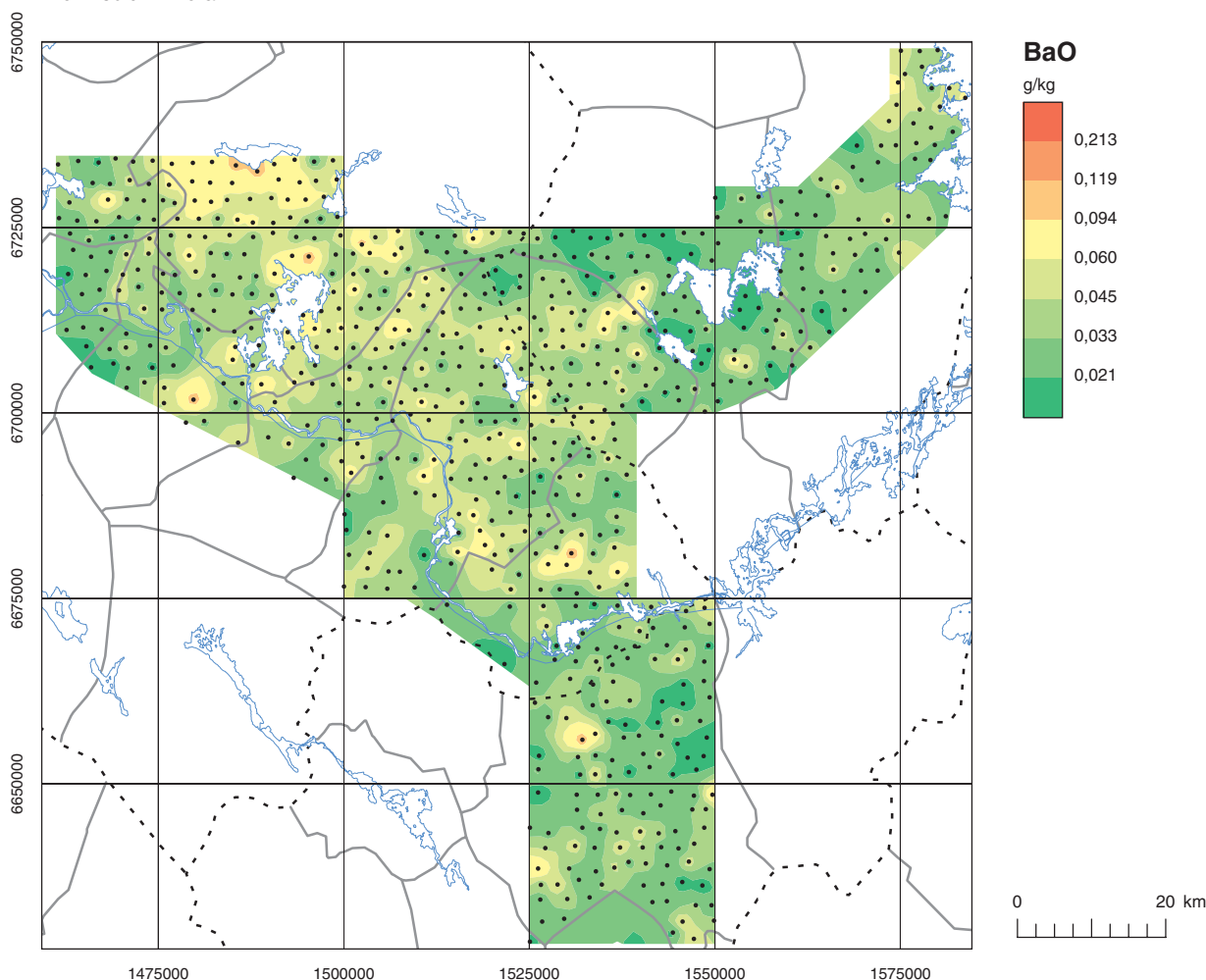
Bariuminnehållet är generellt högst i finkorniga yngre graniter, något lägre i gnejsgranit och lägst i basiska bergarter. Geokemiskt associeras barium med kalium och rubidium. Barium förekommer främst i fältspater och glimrar, men kan även bilda baryt (BaSO_4), ett mineral som ofta förekommer i samband 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, t.ex. av strontium. Elementet är inte särskilt mobilt och vid vittring adsorberas barium effektivt till Fe- och Mn-hydroxider och oxider, fälls ut som sulfat eller karbonat eller binds till lermineral.

Totalhalternas medianvärde av barium i kartområdets moräner är obetydligt högre än i landet i övrigt, medan salpetersyralakat barium ligger på samma nivå. Svaga förhöjningar av syralakbart barium

Barium (BaO)

Analysmetod: ICP/MS (HNO₃)

Provmedium: Morän



i moränen syns bl.a. söder om Rogsjön, norr om sjön Runn. Totalhalterna av barium korrelerar med totalhalter av gallium, aluminium, järn, kalium, natrium och vanadin. Syralakbart barium korrelerar med kobolt, aluminium, järn, magnesium, kalium och titan. I faktoranalysen placerar sig barium tillsammans med sistnämnda elementgrupp.

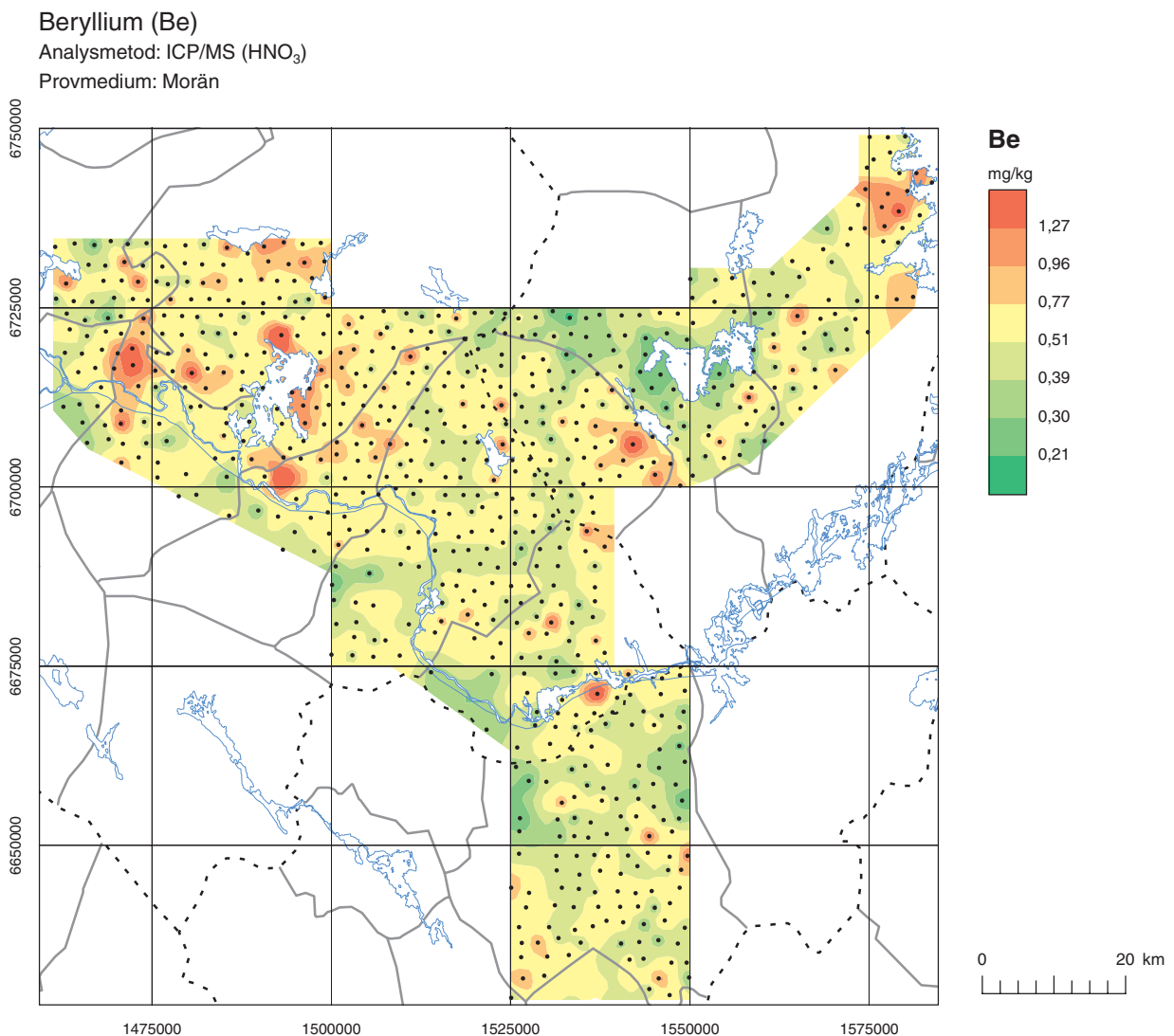
Beryllium (Be)

Beryllium är ett sällsynt grundämne. Det förekommer 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 pyroxener, glimrar, plagioklaser och lermineral. Mineralen beryll kan påträffas i pegmatiter och svenska fyndigheter finns bland annat i Västmanland. Mer exotiska berylliummineral är bl.a. smaragd och akvamarin. Vid vittring är beryllium inte särskilt rörligt, väl löst binds beryllium åter lätt till organiskt material samt till lermineral där det kan ersätta bland annat aluminium.

Beryllium och dess föreningar är mycket giftiga, troligen p.g.a. 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 syralakbart beryllium i undersökningsområdets moräner ligger något högre än i landet i övrigt. Förhöjningar kan ses i områden med yngre graniter och pegmatiter, exempelvis nordväst om Borlänge och sydost om Torsåker. I Gävletrakten kan det vara omvandlade sedimentära bergarter som gett berylliumförhöjd morän. Då man även kan finna beryllium i skarn, återfinns förhöjningar även i de malmförande stråken. Beryllium korrelerar med ett flertal element, bl.a. med silver, kobolt, lantan, litium, tenn, aluminium, järn och magnesium. I faktoranalysen återfinns beryllium i ett par grupper, dels i en grupp med ovannämnda element, dels i en grupp med torium, yttrium, lantan, uran m.fl.

FOREGS kartläggning över Europa visar att stora delar av Sverige och södra Finland har sammanhängande områden med högt innehåll av beryllium i vattendragen, se figur 8. Huvudorsakerna är yngre granitisk berggrund, lågt pH och organiskt material i vattendragen som beryllium binds till.



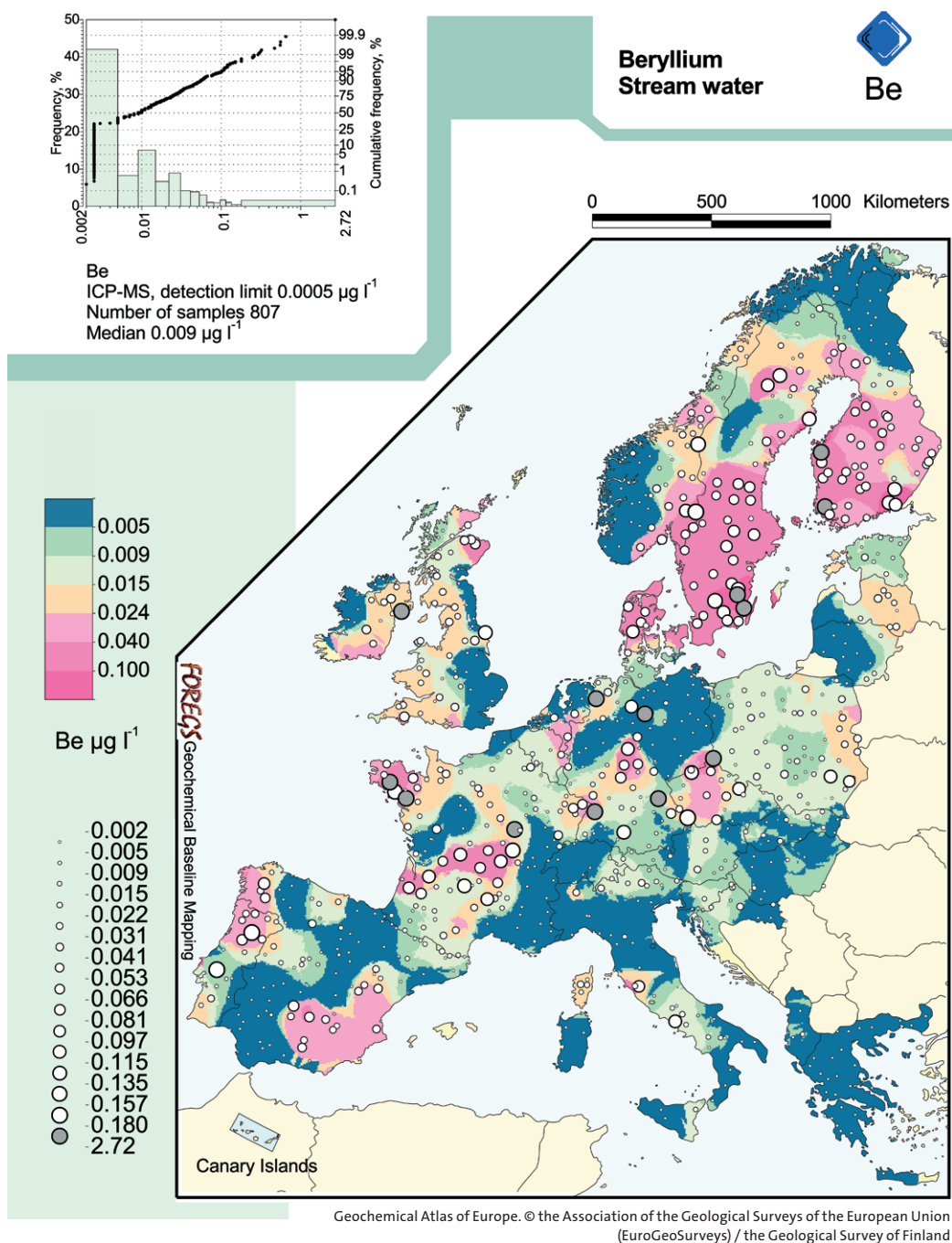


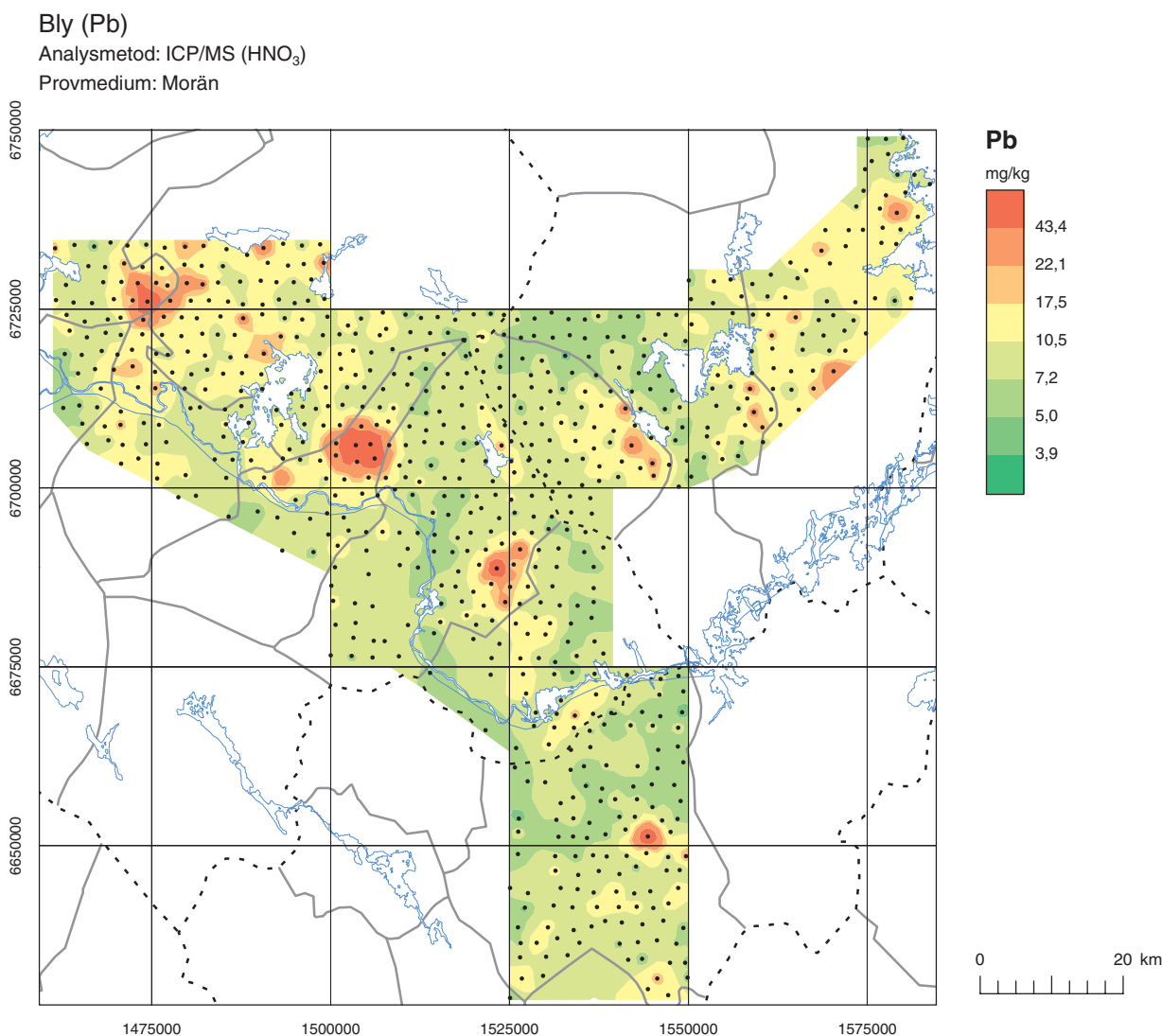
Fig. 8. Beryllium i medelstora (<100 km²) vattendrag. Filtrerat vatten från 51 platser i Sverige.

Beryllium in stream water (<100 km²). Filtered water from 51 sites in Sweden. From Salminen et al. (2005).

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 är den helt dominerande blymalmen. 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 och kan ersätta kalium, barium, strontium och även kalcium, 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 lätttröligt i vittringsprocesser, men i löst form binds blyjonerna lätt bland annat till sekundära lermineral, Fe- och Mn-oxider 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 i 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 istället från nedfall av föroreningar och har ansamlats under lång tid. Bly är en av metallerna som sprjuts 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 m.fl. 2001).

Hälften av det bly som befolkningen tar upp kommer från födan, och resten från luften, medan koncentrationerna i vatten i allmänhet är låga. Normalt orsakar därför inte dricksvatten 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 symptom på blyförgiftning rörelsestörningar, kramper, förstoppning i matstrupen eller tarmen, samt blodbrist. Blyförgiftning har t.ex. konstaterats hos kungsörn och havsörn, som misstänks ha förgiftats via döda hagelskjutna djur.

Förhöjningar av syralakbart bly i undersökningsområdets moräner ansluter så gott som helt till malmförande regioner och områden med mindre mineraliseringar. Några exempel är i nordväst där Vargbergsgruvan, Bjursås och Falun återfinns. Sydöst om sjön Runn ligger Kalvbäck och Lövsålfältet och ytterligare mot sydost återfinns Garpenbergs bergslag. Söder om Gävle finns en lokal blyanomali vid Jordåsens gamla gruva. Nordost om Sala återfinns Snarpsätra järnmalmgruva, där även blyglans finns. Bly är korrelerat med silver, kadmium, zink, antimon och mangan. I faktoranalysen återfinns bly endast tillsammans med nämnda element. Associationen avspeglar tydligt att blyinnehållet i moränerna domineras av den mineraliserade miljön. Morän med blyhalter högre än KM-värdet finns i gruvområdena Vargberget, Lövsålfältet, Garpenberg samt nordost om Sala. I markområden med så förhöjda blyvärden finns det anledning att undersöka om grundvattnet är naturligt blypåverkat.

Fosfor (P_2O_5)

Fosfor är det 11:e 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, pyroxener, olivin, fältspater, granater 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 konkretioner 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.

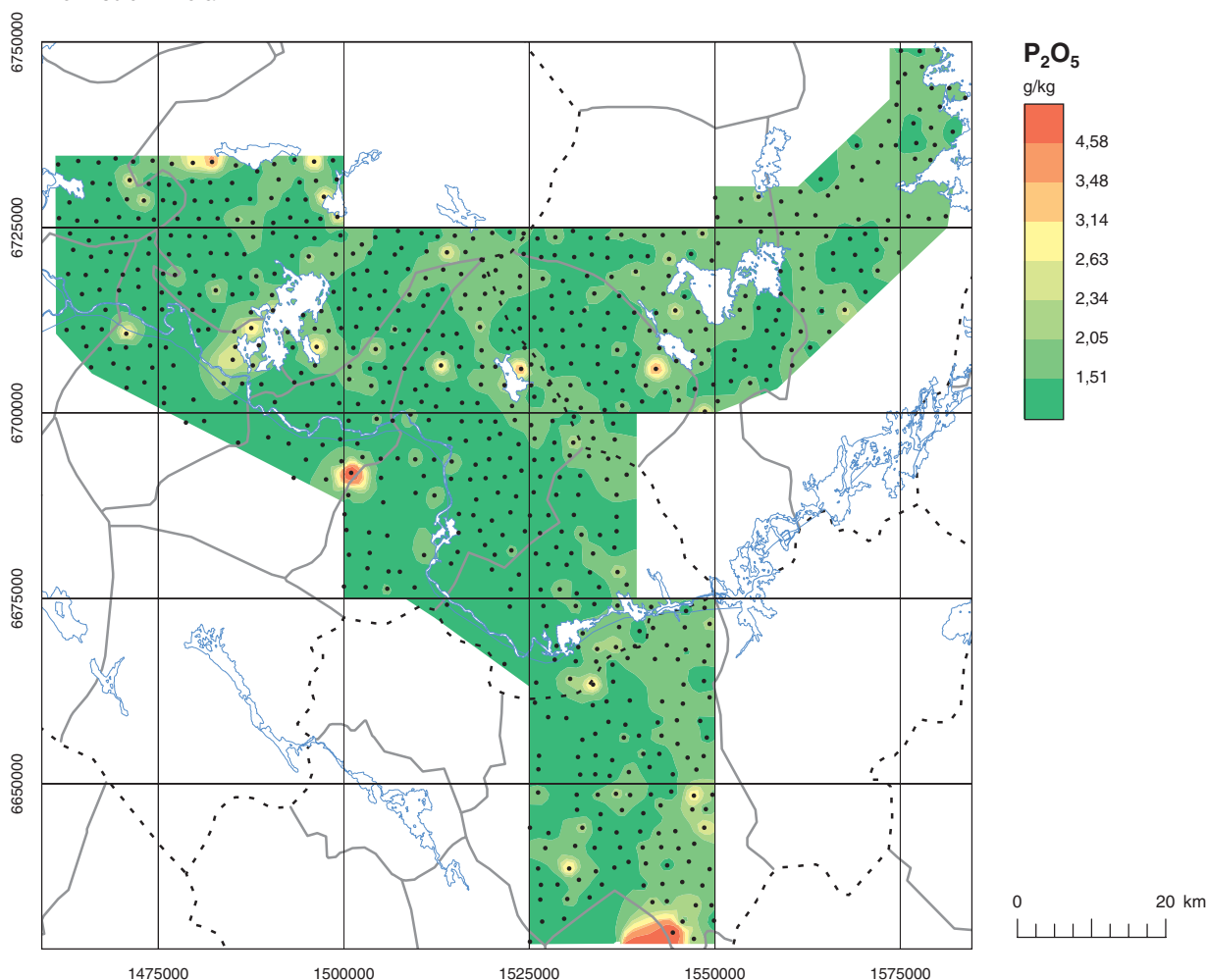
Brytning av fosfatmineral görs huvudsakligen för framställning av fosforsyra samt fosfater för främst jordbrukets behov av konstgödsel. Fosfor har en avgörande betydelse för ämnesomsättningen hos både djur och växter. Det är en väsentlig beståndsdel i levande vävnader och finns framför allt i skelettets 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 mycket lågt jämfört med landet i övrigt. Några enstaka förhöjda punkter kan dock ses på kartbilden, dels öster om Säter, dels längst i söder. Totalhalterna av fosfor saknar i stort sett korrelationer med andra element. För syralakbart fosfor finns dock svaga korrelationer med kalcium, kobolt och totalhalterna av järn och strontium. I faktoranalysen placerar sig fosfor i samma grupp som kalcium och natrium, sannolikt kopplat till fältspater. Associationerna knyter an till vanliga bergartsbildande mineral som pyroxener, glimmer m.fl.

Fosfor (P_2O_5)

Analysmetod: XRF

Provmedium: Morän



Gallium (Ga)

Gallium är spritt i hela jordskorpan och är ungefär lika vanligt som bly. Metallen förekommer ofta som spårelement i t.ex. bauxit och stenkol. Gallium finns i ett flertal bergarter, både magmatiska och sedimentära och kan ingå i mineral som fältspater och amfiboler. Ultramafiska bergarter och kalkstenar har mycket lågt innehåll. Gallium förekommer mest tillsammans med de kemiskt besläktade metallerna aluminium och zink men finns även i låga halter (0,01–0,08 viktprocent) i fosfatmineral och stenkol. Gallium erhålls som biprodukt i samband med utvinning av zinkmalmer (exempelvis Zinkgruvan), aluminium och koppar. Rena galliummineral, t.ex. gallit, $CuGaS_2$, är sällsynta och saknar praktisk betydelse. Vid vittring beter sig gallium som aluminium och kan bindas till lermineral och Fe- och Mg-silikater.

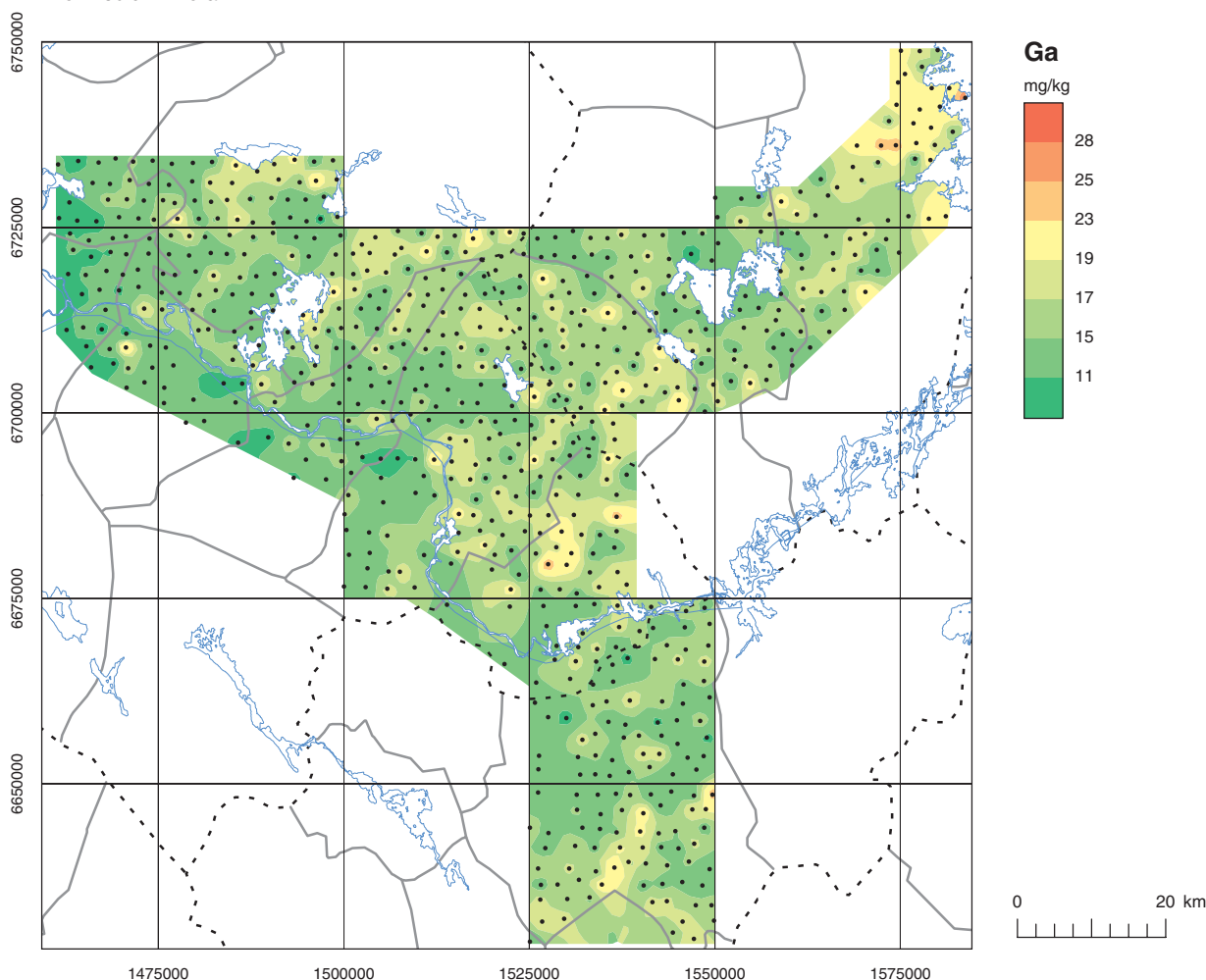
Gallium är inte särskilt rörligt, så vitt man vet har den ingen biologisk roll och inte heller finns rapporter om någon miljöpåverkan av själva metallen. Exponering för trevårt gallium kan ge andnings-svårigheter och bröstsmärtor.

Analys av totalhalter av gallium har nyligen införts i de geokemiska databaserna och moränens innehåll av metallen kan endast jämföras med resultat från östra Mälardalen (Andersson m.fl. 2007). Medianvärdet för gallium i undersökningsområdet är något lägre än i östra Mälardalen. Så är också fallet för aluminium och de båda metallernas släktskap visar sig även i kartbilderna. Korrelation finns

Gallium (Ga)

Analysmetod: XRF

Provmedium: Morän



bland annat med totalhalter av aluminium, barium, kalium, järn, magnesium, kobolt, litium, rubidium, dvs. ler- och glimmergruppen.

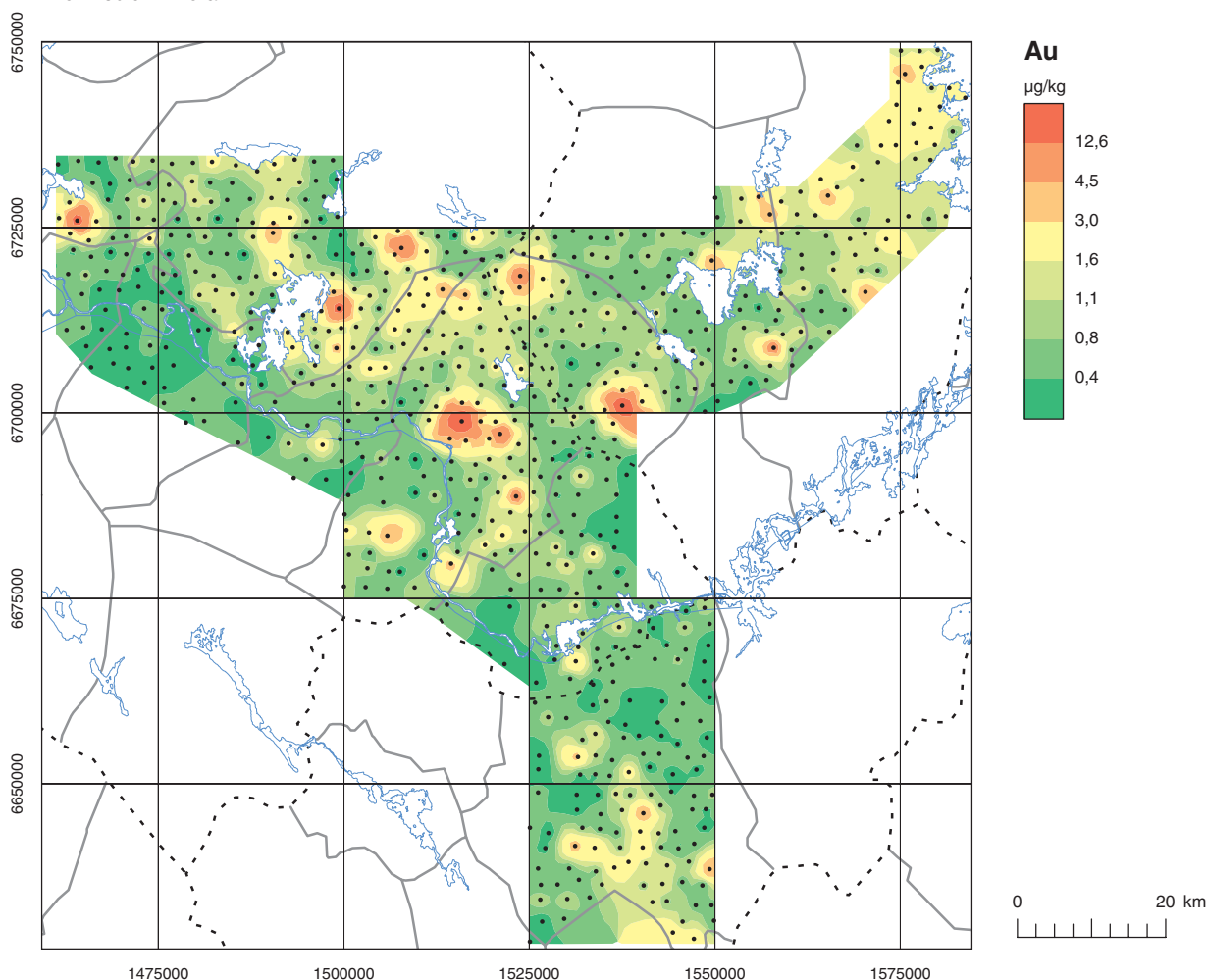
Guld (Au)

Ädelmetallen guld är ett av de mest sällsynta grundämnena i naturen. I jordskorpan finns i genomsnitt endast ca 0,004 g guld per ton. Metallen är emellertid mycket ojämnt fördelad, huvudsakligen beroende på de anriktningsprocesser som ägt rum på jordytan eller i jordskorpan. Geologiska processer har ibland anrikat guld till halter och mängder som kan brytas och utvinnas, 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 och i hydrotermala gångar, ofta tillsammans med kvarts eller där berggrunden är deformerad, kan miljön vara gynnsam för guldmineraliseringar. Kemiskt är guld en ädelmetall vilket betyder att den inte reagerar nämnvärt med vatten, luft, syre, ozon, kväve, väte, fluor, jod, svavel och svavelväte under vanliga förhållanden. Mineralsyror och organiska syror har ingen effekt på metallen, varken i utspädd eller koncentrerad form eller vid höga temperaturer. Kungsvatten (saltsyra och salpetersyra i förhållandet 3:1) är det klassiska lösningsmedlet. Alkalimetallcyanider i närvaro av syre eller andra oxidationsmedel är grunden

Guld (Au)

Analysmetod: ICP/MS (A.R)

Provmedium: Morän



för cyanidlakning vilket också löser metallen. Guld reagerar även med torr klorgas. Kolloidalt guld i vatten ger lösningar med intensivt röda, blå eller violetta färger.

Tidigare var guld svårt att analysera på grund av de ytterst låga halterna i marken, men moderna metoder är såväl snabba som säkra. Problem ligger i stället i provtagningen, eftersom guld, till skillnad från många andra element inte ligger jämnt utspritt i moränen utan ofta uppträder med s.k. nuggeteffekt, dvs. som små korn. Detta gör det vanskligt att bedöma om ett område är förhöjt på guld utgående från resultat från ett enda enskilt prov. Vid vittring är metallen ganska stabil, men kan under vissa förutsättningar bilda olika föreningar som har högre rörlighet. I löslig form 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 jordprofiler är därför vanligtvis högre i humus än i djupare marklager.

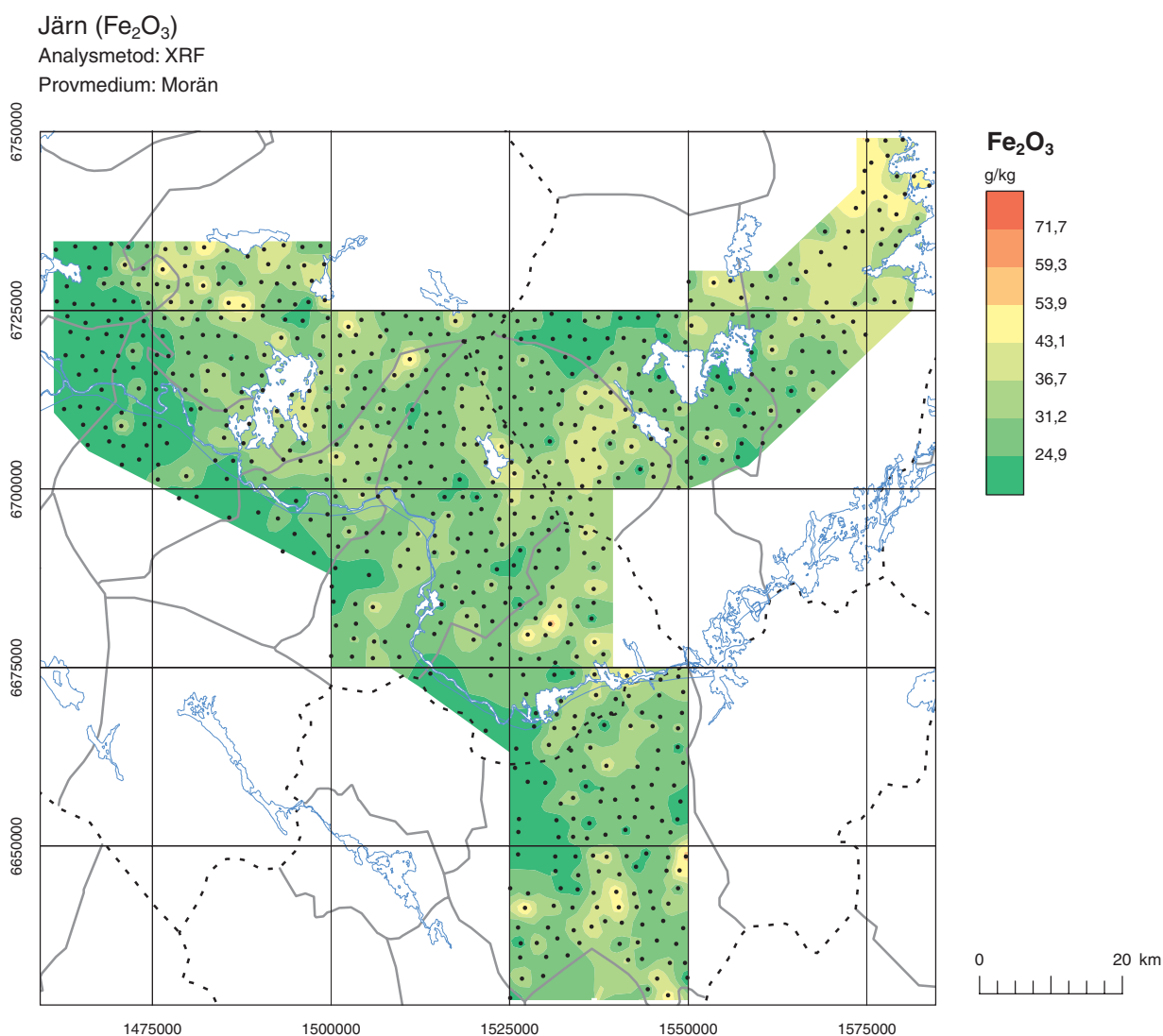
Det geokemiska mönstret för guld i undersökningsområdet visar en hel del fläckvisa förhöjningar, ibland tillsammans med andra element i de malmförorenade regionerna. Medianhalten, <1 µg/kg, är något lägre än i landet i övrigt. Maxhalten 46 µg/kg, återfinns sydost om Långshyttan i ett område med ett flertal förhöjda guldvärden i moränen. Näst högsta värde, 34 µg/kg, återfinns också i ett på guld förhöjt moränområde som ligger ”nedströms” Bodåsgruvans malmfält. De nämnda moränområdena saknar i stort sett förhöjningar av andra element. Mindre guldförhöjningar finns också bland annat vid Insjön, öster om sjön Runn, sydost om Svärdsjö och vid Garpenberg. Några signifikanta korrelationer med andra element i undersökningsområdet finns inte.

Järn (Fe_2O_3)

I vår berggrund och våra 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 sulfid-mineral, t.ex. arsenikkis, kopparkis och pyrit (svavelkis) och i oxider som t.ex. järnmalms-mineralen magnetit, hematit och limonit. De högsta koncentrationerna i bergarter återfinns i ultramafiska och basiska bergarter samt skiffrar medan järninnehållet är lågt i kalkstenar, sandstenar och graniter.

I markprocesser och vid vittring bildas olika komplexa järnföreningar. I dessa sitter järnet mer eller mindre löst bundet och sådana järnoxider och järnhydroxider kan adsorbera ett flertal andra lösta metaller. När olika järnföreningar vittrar i en markprofils sura, översta lager (blekjorden), transporteras metallen med markvattnet nedåt och fastläggs sedan 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.

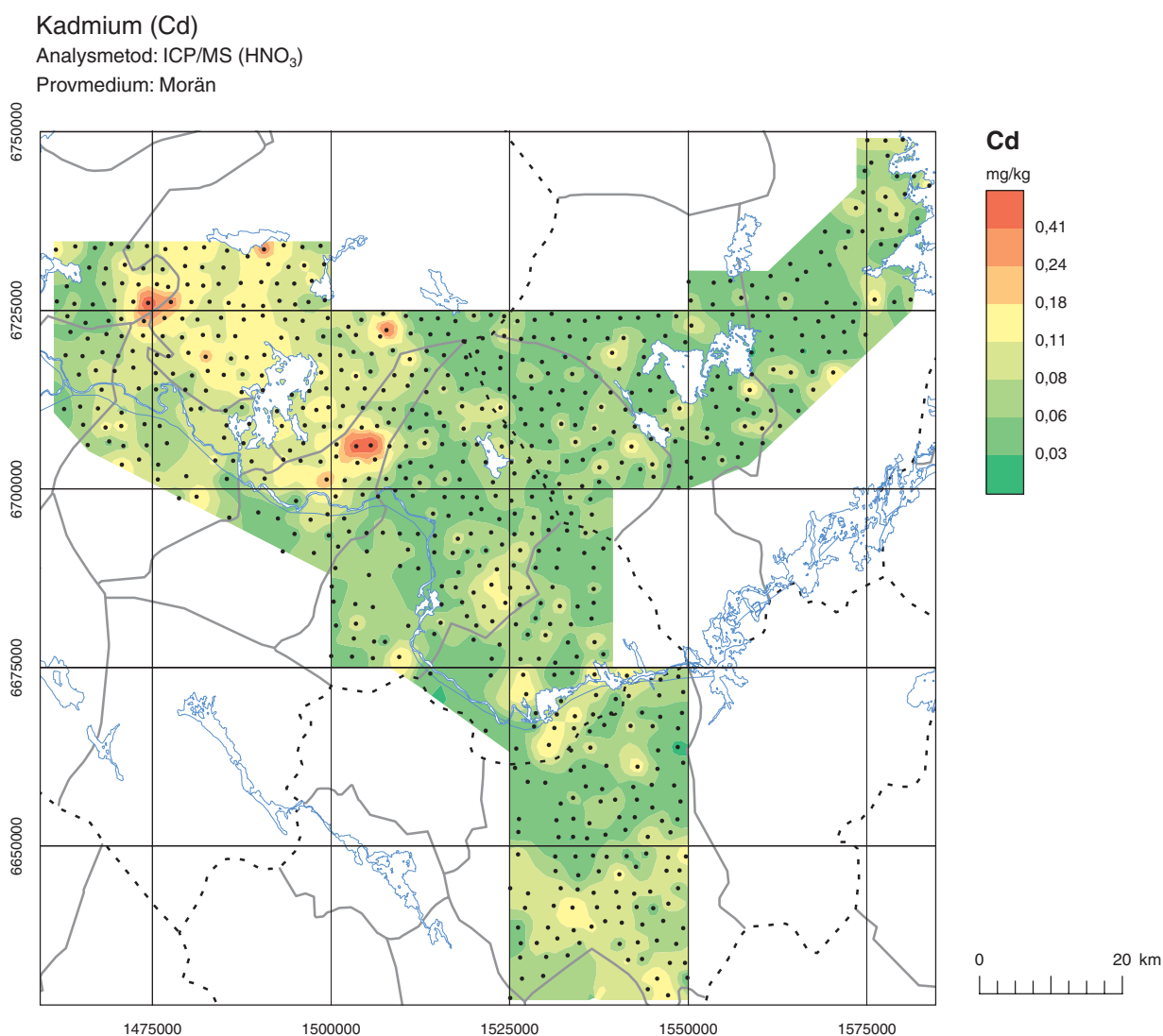
Järn är essentiellt för alla organismer. Det sörjer för ett stabilt blodvärde och är nödvändigt för funktionerna hos kroppens organ. Det är giftigt för människor i dricksvatten om halten överstiger 200 mg/l. Överskott av järn lagras i lever och mjälte, men kan ge förgiftningsskador. Järnbrist är vanligt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



Medianvärdet för totalhalten av järn är lägre än i landet i övrigt, medan den syralakbara medianhalten ligger på samma nivå. Kartbildens måttligt förhöjda järnhalter i nordost kopplas till morän med inslag av sedimentådergnejs. Ett flertal järnberoende element har liknande elementmönster som järn. Starka korrelationer finns med magnesium, aluminium, kalium, mangan, barium, titan, kobolt, koppar, molybden, nickel, rubidium, zink m.fl. Järn associerar till den mafiska elementgruppen. Även faktoranalys placerar järn i samma elementgrupp. Sannolikt är det mörka mineral som hornblände och biotit som har störst inverkan på fördelningen av järn i undersökningsområdet.

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 mineraliserade sandstenar t.ex. 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. Eftersom kadmium geokemiskt är associerat med zink följer elementen vanligtvis varandra i den geokemiska cykeln. 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 regional fördelning av metaller i svensk åkermark (Eriksson m.fl. 1997). I Skåne är den dominerande källan för kadmium i alv och matjord kadmiumförande mineral i berggrund och mineraljord (Kornfält m.fl. 1996).

Kadmiumhalterna i undersökningsområdets moräner är ganska låga jämfört med landet i övrigt. Det geokemiska mönstret visar förhöjningar vid Vargbergsgruvan, Grönbo, Logården och Lövåsfältet.

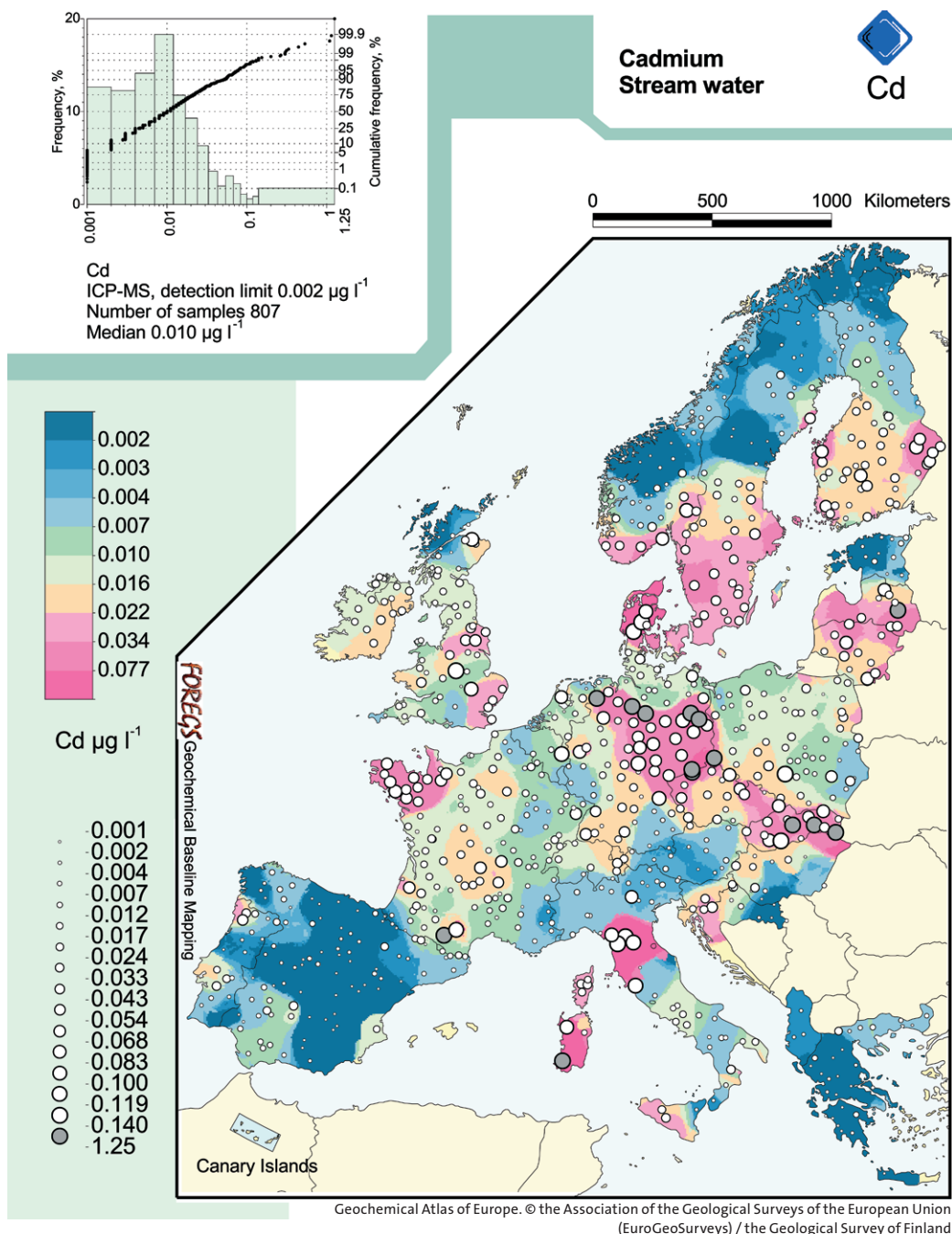


Fig. 9. Kadmium i medelstora (<100 km²) vattendrag. Filtrerat vatten från 51 platser i Sverige.

Cadmium in stream water (<100 km²). Filtered water from 51 sites in Sweden. From Salminen et al. (2005).

Moränområdena vid de två senare har så höga kadmiumhalter i finfraktionen att gränsvärdet för känslig markanvändning sannolikt överskrids i ett område större än vid de två provtagningsplatserna. I markområden med hög kadmiumhalt (även bly är förhöjt) finns det anledning att undersöka om även grundvattnet har påverkats. Kadmium korrelerar främst med zink, silver, bly och mangan, och faktoranalysen placerar kadmium enbart i en faktor tillsammans med nämnda element vilket är en mineraliseringsassociation.

I ett europeiskt perspektiv har Sverige ganska lågt innehåll av kadmium i marken. Att kadmium har mobiliserats till vattensystemen i Götaland och södra Svealand framgår däremot av FOREGS kartläggning, se figur 9. Huvudorsaken är att kadmium kontrolleras av pH och mobiliseras vid sura förhållanden. Längre söderut i Europa påverkas vattensystemen mer av antropogent tillskott av kadmium (Salminen m.fl. 2005).

Kalcium (CaO)

I vår berggrund och våra 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 omkring tre gånger så höga halter och förmodas vara påverkad av sedimentära kalkstenar. Vid vittring är kalcium mycket lättlösligt 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 lermaterial, 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 och i Jämtland utan också på havsbotten mellan Sverige och Finland.

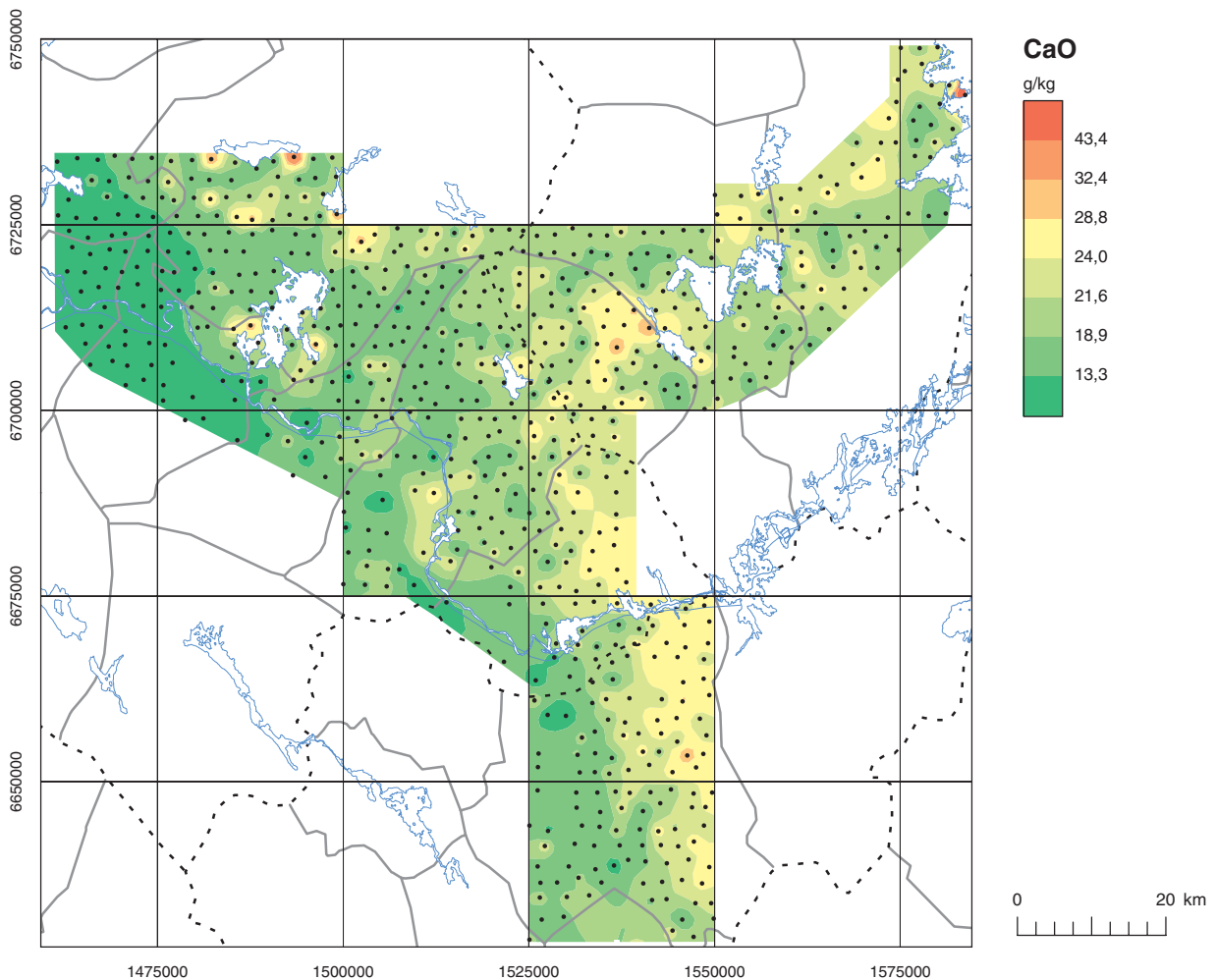
Kalcium är ett livsnödvändigt ämne för växter, djur och människor. Kalciumfosfat ingår i benstomme och tänder. Kalciumjonen är viktig för hormonella aktiviteter och väsentlig vid celledelning.

Kalciuminnehållet i undersökningsområdets moräner är generellt lågt och medianvärdena är lägre för såväl kalciums totalhalter som den syralakbara delen jämfört med övriga landet. Ett ensamt högt analysvärde på Eskön vid Harkskärsfjärden norr om Gävle har totalhalten 65 g/kg och halten syralakbart kalcium är 42 g/kg. Här är lakbarheten således 65 %. pH-värdet ligger på 8,6. Allt visar på närvaro av lättlösliga karbonater i moränen; sannolikt transporterat med inlandsisen från nuvarande Gävlebuktens havsbotten och inlagrat i moränen i samband med isavsmältningen. Det näst högsta kalciuminnehållet i morän återfinns sydost om Rogsjön. Totalhalten är där 46 g/kg och den syralakbara kalciumhalten är 13 g/kg vilket ger en lakbarhet i moränen på 28 %. pH-värdet är 5,4. Fläckvisa förhöjningar i morän väster om Rogsjön och Runn och vid sjön Grycken markerar basiska massiv i de omgivande sura bergartsområdena. Vid Torsåker syns en relativt skarp avgränsning mellan kalciumförhöjd morän och morän med lågt kalciuminnehåll. Gränsen markerar tydligt övergången till unga graniter. Inom den utbredda förhöjningen i sydost (från Torsåker och söderut) återfinns en del urkalk och basiska massiv samt mindre frekvens sura vulkaniter vilket sannolikt är förklaring till denna skillnad i kalciuminnehåll i moränen. Korrelationer med totalhalter av kalcium finns med fosfor, magnesium, natrium, strontium och pH. I faktoranalysen bildar kalcium (totalhalterna), fosfor och klor en grupp, vilket associerar till apatit.

Kalcium (CaO)

Analysmetod: XRF

Provmedium: Morän



Kalium (K₂O)

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). Geokemiskt är kalium associerat med rubidium och barium. Särskilt rubidium ersätter ofta kalium i mineralens kristallgitter. Generellt sett är det i svårslösliga mineral som kalium ingår. I biotit är kalium mer lösligt. Vid vittring har kalium en benägenhet att bindas till lermineral.

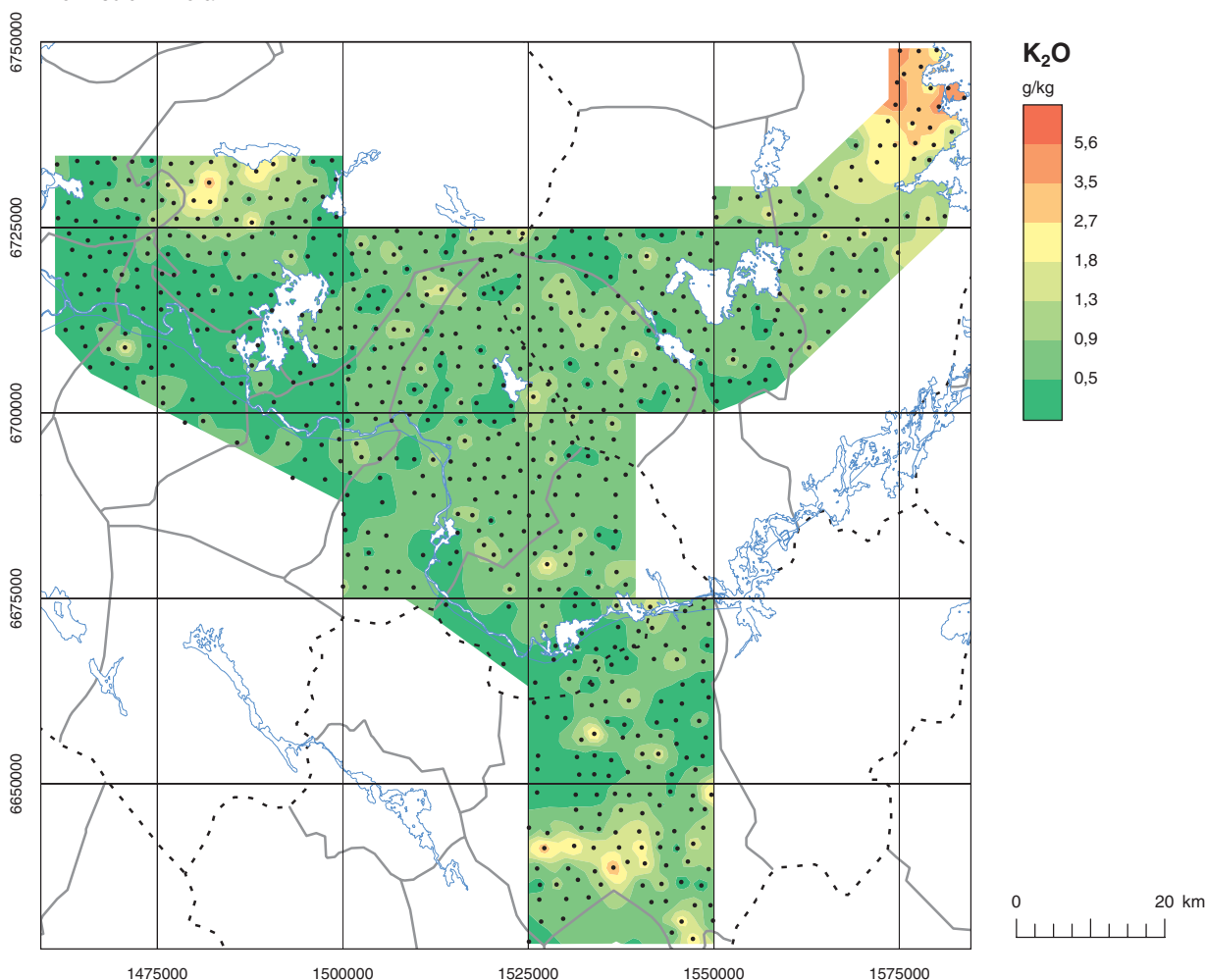
Kalium är ett essentiellt ämne för allt levande. För människor är ämnet nödvändigt för alla levande celler i kroppen, för nervsystem och muskelfunktion. Brist på kalium är inte särskilt vanligt, men kan bland annat uppstå vid sjukdomstillstånd med långvariga diarréer, njurproblem och anorexi. Överskott 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.

Medianvärdet för totalhalten kalium är något högre än i landet i övrigt, till skillnad från medianen för syralakbart kalium som är lägre. Förhöjningar av syralakbart kalium syns i nordost och anknyter till sedimentådergnejsers moräner. Kalium uppträder här i lösliga mineral, sannolikt glimmermineral. Korrelation finns mellan totalhalterna av bl.a. kalium, rubidium och gallium vilket anger fältspater

Kalium (K_2O)

Analysmetod: ICP/MS (HNO_3)

Provmedium: Morän



som huvudbärare av svårslösligt kalium. Korrelationer som avspeglar en annan mineralogisk miljö med glimmer- eller lermineral finns för de syralakbara halterna med järn, magnesium, aluminium, natrium, titan, rubidium, kobolt, vanadin m.fl.

Kisel (SiO_2)

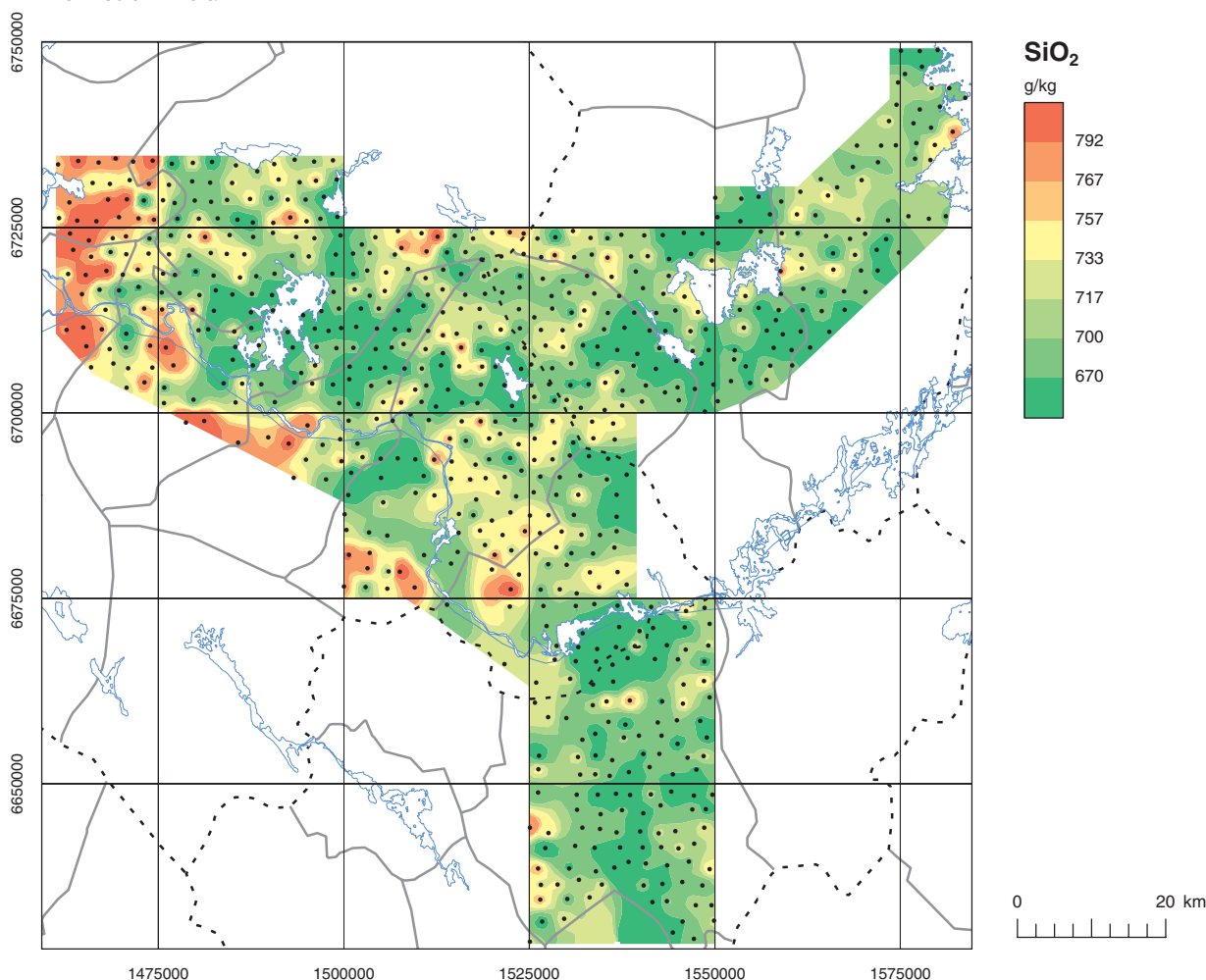
Elementet kisel är en av huvudkomponenterna i bergarter och det grundämne som uppträder med högst halter tillsammans med aluminium i bergartsbildande mineral. Alla silikatmineral är uppbyggda av kisel och det vanligaste, kvarts, är ett mycket svårslösligt mineral som i princip består vid vittring. Kisel ingår också i hög grad i fältspater, amfiboler, pyroxener, granater, glimrar och lermineral. I bergarter är kiselinnehållet högst i sandstenar, därefter i graniter och skifferar. Basiska bergarter har betydligt lägre halter och i kalksten är halterna mycket låga. Vid vittring av lättlösliga mineral är kisel lätttrösligt, 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 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.

Kisel (SiO₂)

Analysmetod: XRF

Provmedium: Morän



Kiselinnehållet i morän i undersökningsområdet ligger i nivå med landet i övrigt. I nordväst markerar kisel som enda element det stora moränområdet med yngre graniter och pegmatiter nordväst om Borlänge, sannolikt även med inslag av kiselsyrarika bergarter från nordväst. Förhöjningar vid Salbohed i sydväst och söder om Torsåker anknyter även de till moränområden med inslag av yngre granit. Kartbilden ger dock ingen enhetlig koppling till granit-, pegmatit- eller vulkanitmoräner. Kisel korrelerar svagt med totalhalter av kalium, natrium och wolfram.

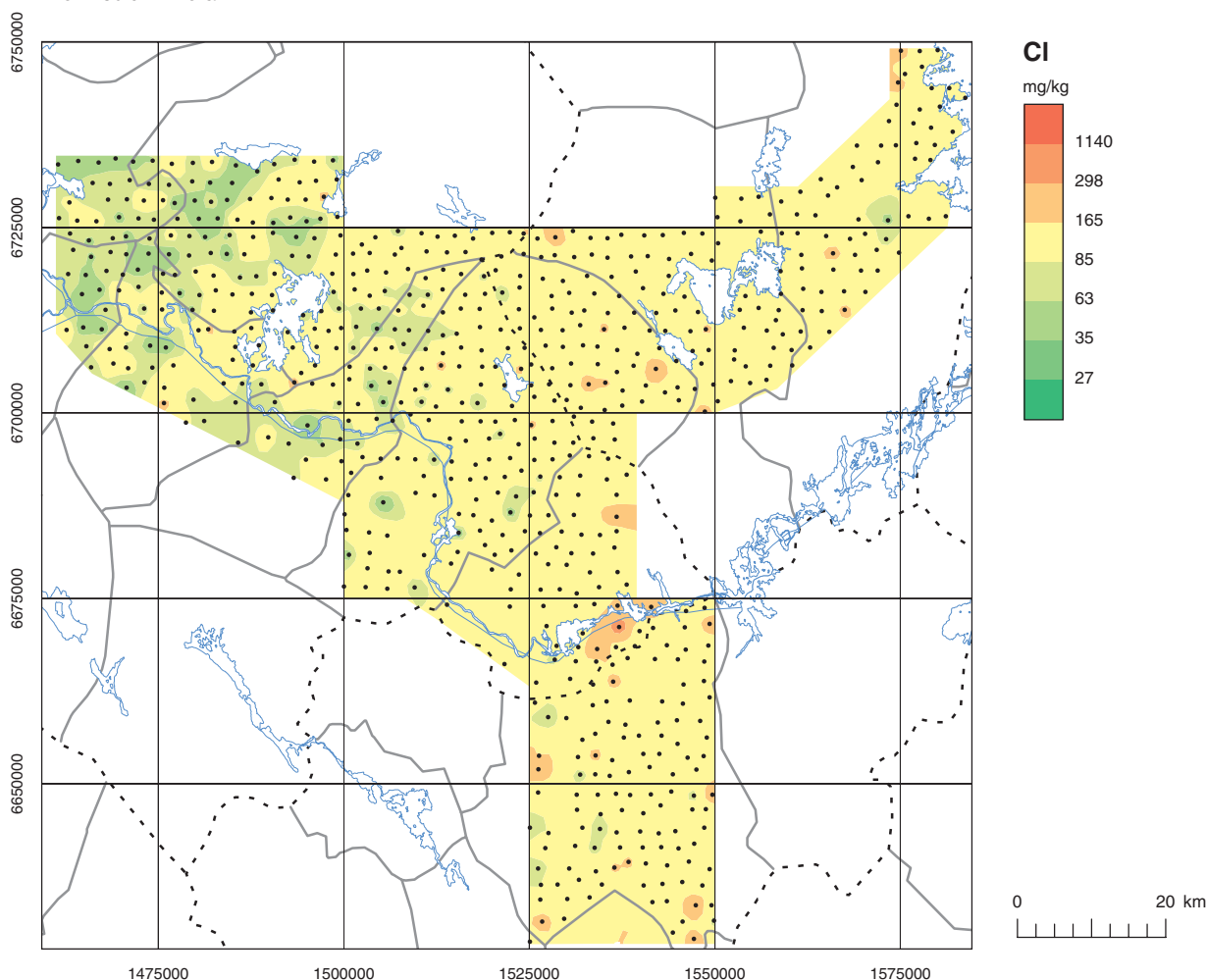
Klor (Cl)

Klor är det sjuttonde vanligaste grundämnet i jordskorpan. Dessutom innehåller havsvatten stora mängder klor (i medeltal ca 2 %) i form av lösta klorider. 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 skiffer har vanligen högre klorhalter än kalkstenar och basiter. 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 har, som en av huvudbeståndsdelarna i havsvatten, 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

Klor (Cl)

Analysmetod: XRF

Provmedium: Morän



och bildar inte heller några komplex utan förs i princip med ytvrinning, 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.

Trots sin starka giftighet är klor i reducerad form ett livsnödigt 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. Klor är en av få anjoner (negativt laddad jon) som ingår i SGUs geokemiska karteringsprogram.

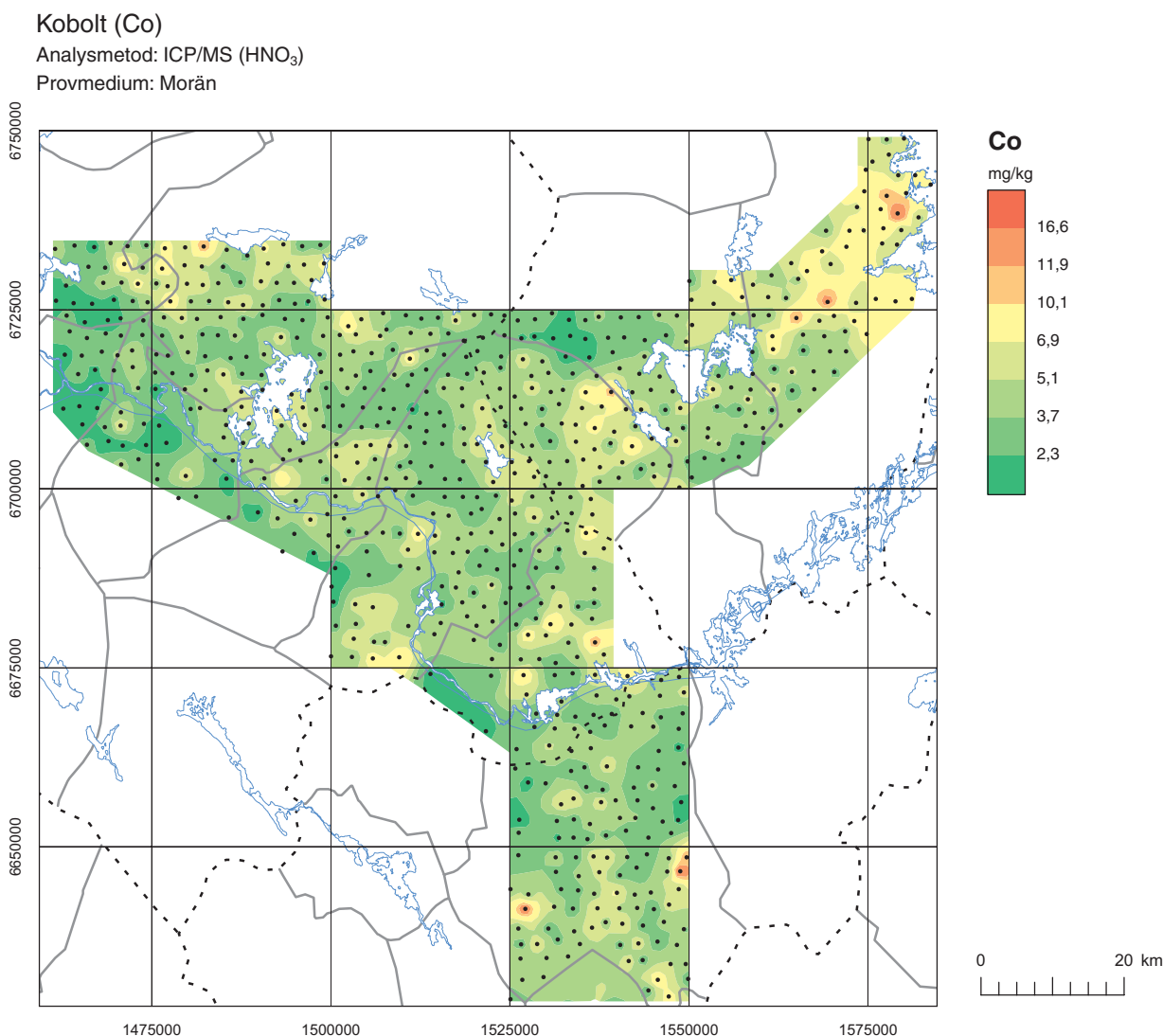
Totalhalten av klor är allmänt förhöjd i större delen av undersökningsområdet och medianhalten är högre än riket i övrigt. En svag korrelation finns med brom, aluminium och selen och totalhalter av kobolt och järn. I faktoranalysen placerar sig klor i en faktor med totalhalter av kalcium och fosfor och i en annan med natrium och brom. Associationen kalcium, klor, fosfor antyder apatit som klorbärare, den senare sannolikt glimmermineral.

Kobolt (Co)

Kobolt förekommer i basiska bergarter som gabbro, amfibolit och diabas, och kan uppträda med mycket höga halter i ultramafiska 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. Löst kobolt binds vanligen 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 nödvändigt för vitamin B12-syntesen i tarmfloran. För människan är kobolt essentiellt då det ingår i vitamin B12. Kobolt används vid blodbrist hos gravida kvinnor då det kan öka produktionen av röda blodkroppar. De största källorna till kobolt för människan är genom mat och dricksvatten. Alltför höga doser kan dock vara skadliga och påverka lungor och hjärta.

Innehållet av kobolt i undersökningsområdets moräner är lägre än för landet i övrigt. Måttliga förhöjningar finns i moränområden med basiskt bergartsinslag, exempelvis i Hedemoratrakten, Torsåker, söder om Hofors och Horndal. I söder finns förhöjningar i Salatrakten, sydväst om Salbohed och längst i sydost vid Ransta. Förhöjningarna kopplas främst till det basiska bergartsinslaget i moränerna.



Förhöjningarna i nordost anknyter delvis till sedimentådergnejsernas basiska inslag. Här finns också, utöver smala diabasgångar och basiter, Mackmyradiabasen, som är en olivindiabas med stort inslag av biotit och malmkorn. Utöver att reflektera basiskt bergartsmaterial i moränen kan också såväl kisleförekomst i gnejsiga bergarter som förekomst av sulfidmalm bidra till koboltförhöjningarna i morän. Kobolt korrelerar med element ur den mafiska gruppen, starkt med vanadin, järn och magnesium, men också med beryllium, koppar, krom, litium, nickel, rubidium m.fl. Även faktoranalysen placerar kobolt i den mafiska elementgruppen.

Koppar (Cu)

Koppar förekommer som spårelement främst i basiska bergarter och i lägre grad i skiffer även om skiffer med högt organiskt innehåll (alunskiffer) kan ha betydande kopparhalter. Granitiska bergarter och sandstenar har normalt lågt innehåll. Koppar ingår accessoriskt i mineral som pyroxener, amfiboler, magnetit och biotit. Elementet uppträder också i såväl sulfider som karbonater och hydroxider och sällsynt även som elementärt koppar. Gedigen koppar förekommer i klumpar och gångar som skär genom sandsten (sällsynt i Sverige). Den brukar också innehålla små mängder silver, vismut och bly. I förening med svavel förekommer koppar ofta, men vanligen i ganska små mängder. Dessa föreningar utgörs av kopparglans Cu_2S och kovellit CuS . De vanligaste malmmineralen är kopparkis (kalkopyrit), CuFeS_2 , och brokig kopparmalm (bornit), Cu_5FeS_4 . Detta innebär att koppar kan ingå i olika typer av mineraliseringar, exempelvis 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 oorganiska och organiska föreningar.

Allmänbefolkningen exponeras för koppar huvudsakligen genom dricksvattnet. Vanligt är att dricksvattnet kontamineras med koppar från vattenledningar och varmvattenberedare. Vid en 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 gallen till avföringen.

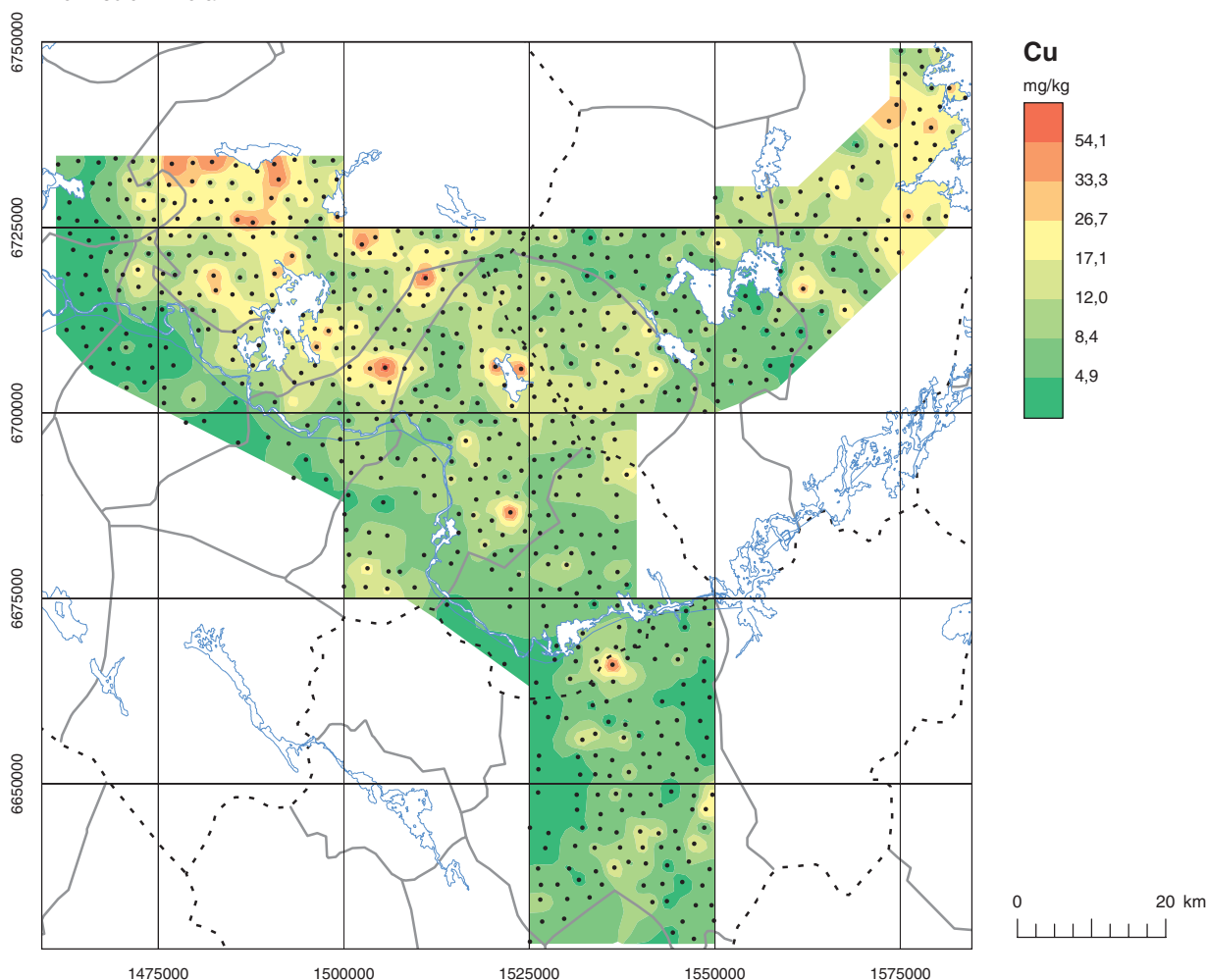
Koppar finns normalt i både växt- och djurorganismer men dess fysiologiska funktion är i många fall inte helt känd. Man vet att koppar är nödvändigt för järnomsättningen för människor och djur och för produktionen av melanin. Hos hästar är det väl känt att kopparbrist ger en blekning av färgen – t.ex. 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 älgarnas miljö.

Undersökningsområdets halter av syralakbart koppar är tämligen låga. Några smärre förhöjningar i moränerna ansluter till sulfidmineraliseringar vid Bjursås och söder om Rogsjön, Grönbo och Falun. Andra exempel är vid Logården, Lövåsfältet och vid sjön Grycken där Skällingsbergsgruvan ligger på östra stranden. Även i Garpenbergsfältet finns en blygsam anomali markerad. Söder om Dalälven ligger Bäsinge koppargruva med Barsjön åt sydost. Även här finns en liten förhöjning. Marken närmast Falu gruva har förorenats genom den 1000-åriga gruvdriften och omgivningarna har ökade halter av bl.a. koppar på 60 cm djup (Ek m.fl. 2001). Denna föroreningseffekt kan dock inte spåras i denna markgeokemiska undersökning. I faktoranalysen placerar sig syralakbart koppar svagt i en enda faktor, i samma som kadmium, bly, zink, mangan och silver. I korrelationsmatris finns däremot en association med järn, magnesium, mangan, zink, kobolt och vanadin.

Koppar (Cu)

Analysmetod: ICP/MS (HNO₃)

Provmedium: Morän



Krom (Cr)

Krom kan förekomma med mycket höga halter i ultramafiska bergarter men är också anrikat 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 pyroxener, amfibol och glimrar, 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 (FeCr₂O₄). Vid vittring binds elementet lätt till järn- och manganoxider samt till lermineral. Generellt har krom liknande geokemiska egenskaper som järn och aluminium.

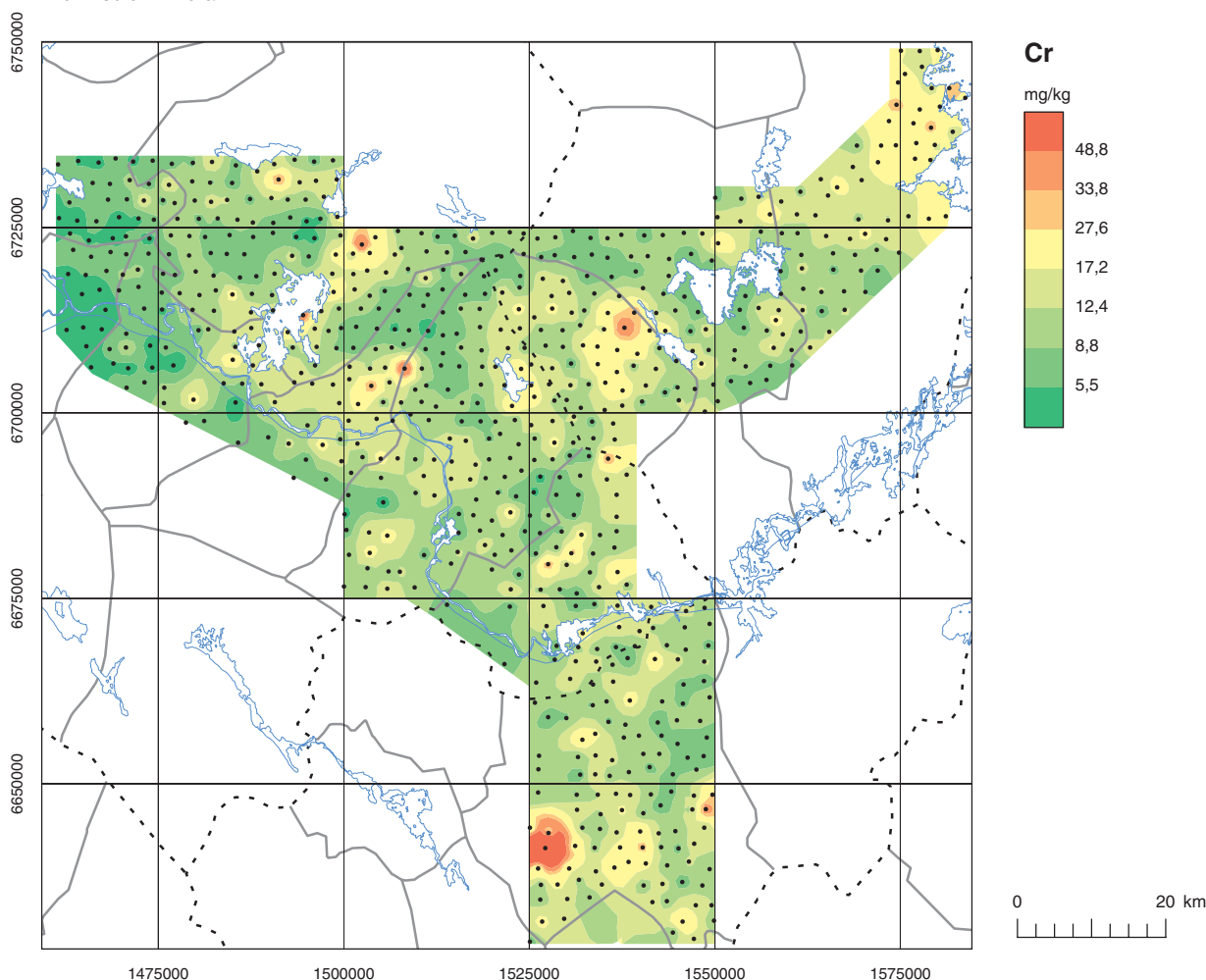
Krom förekommer i flera olika oxidationstal. De sexvärda föreningarna är de mest giftiga. Mobiliteten hos krom är ganska låg, men beror på med vilket oxidationstal (vanligaste är två-, tre- och sexvärt krom) metallen uppträder. Trevärt krom är svårslösligt i vatten med pH runt 7 och kromkoncentrationen i naturliga vatten är låg. Sexvärt krom är mer mobilt än trevärt. Normalt finns små mängder krom i dricksvatten och föda.

Krom medverkar till omsättningen av blodsocker, kolhydratomsättning och cellernas insulin-känslighet. Krom reducerar blodfetterna och kontrollerar kolesterolhalten i blodet. Brist på krom är ovanligt. Symptom på krombrist kan vara sämre utnyttjande av blodsockret (minskad insulin-kän-

Krom (Cr)

Analysmetod: ICP/MS (HNO₃)

Provmedium: Morän



lighet), sämre proteinsyntes samt fettomsättning, trötthet, nervösa besvär, koncentrationssvårigheter och ögonproblem.

Medianvärdena av såväl totalhalter som syralakbara halter av krom i kartområdet är lägre än i landet i övrigt. De kromförhöjningar som trots allt påträffats kan knytas till bergarter med basiska komponenter, till gabbror och dioriter t.ex. vid Torsåker, Hedemora och Salbohed. Moräner med riktigt lågt krominnehåll finns i granit-pegmatitområdet nordväst om Borlänge och i de sura vulkanitstråken öster om Runn och mellan Hofors och Torsåker och söderut. Ett mycket högt kromvärde (totalhalt 911 mg/kg, syralakbar halt 321 mg/kg) återfinns i den kraftiga kromanomalin sydväst om Salbohed. Sannolikt överskrider KM-värdet för krom i ett område större än vid den enstaka punkten. Här är det sannolikt stort inslag i moränen av korttransporterade mafiska intrusivbergarter. Starka korrelationer med magnesium, kobolt, nickel och vanadin visar kromets generella anknytning till mafiska mineral. Kopplingen till järn är däremot ganska svag. Faktoranalys placerar krom i en faktor tillsammans med den mafiska elementgruppen.

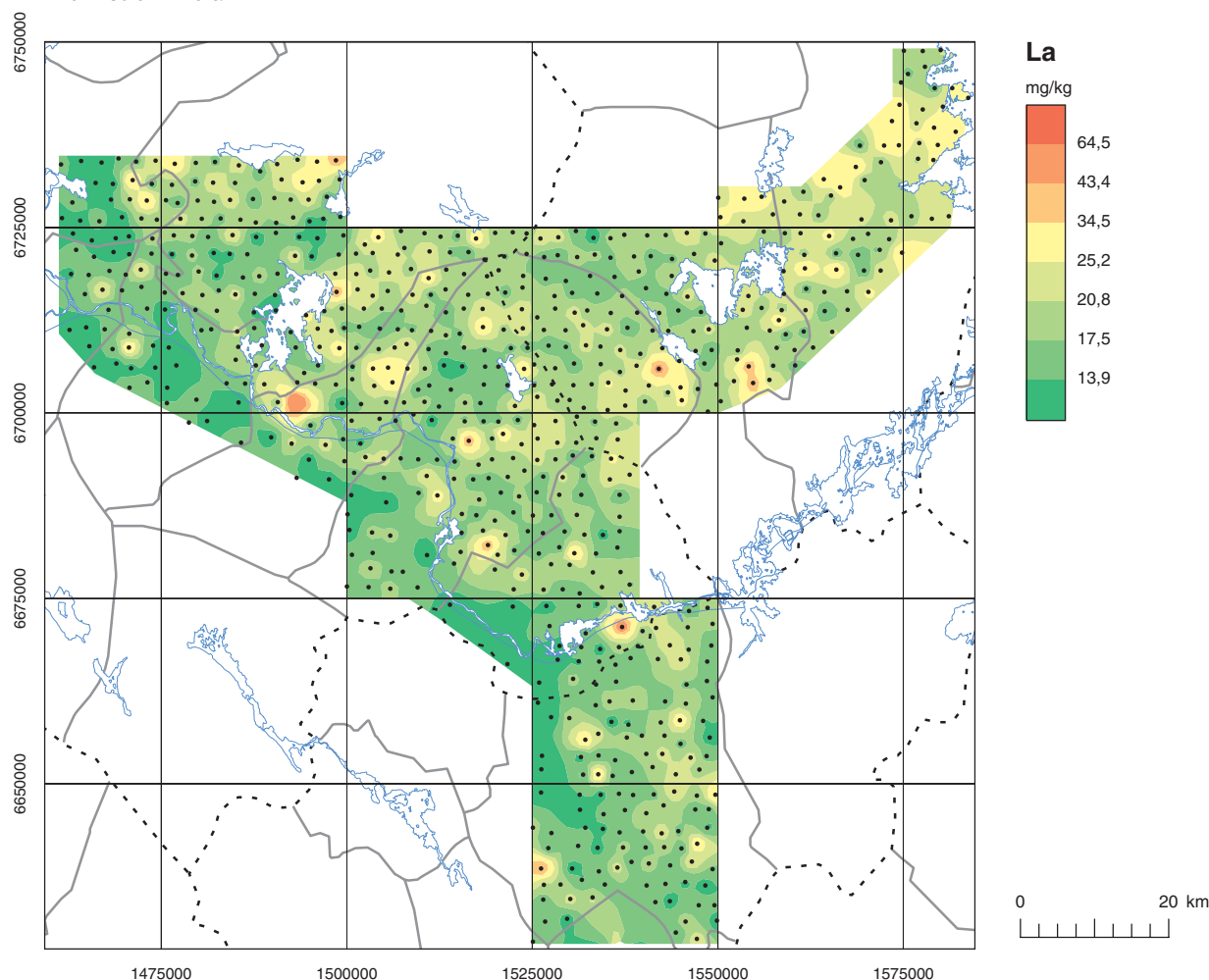
Lantan (La)

Lantan är inget ovanligt grundämne i jordskorpan, det är t.ex. 2,7 gånger vanligare än bly. Lantan uppträder framför allt i granitiska bergarter men även skifferar kan ha höga halter. I basiska bergarter

Lantan (La)

Analysmetod: ICP/MS (HNO₃)

Provmedium: Morän



och kalkstenar är innehållet betydligt lägre. Lantan finns alltid i naturen som jonen La^{3+} . Elementet tillhör de sällsynta jordartsmetallerna och förekommer ofta tillsammans med torium, yttrium, uran, beryllium och ett flertal sällsynta grundämnen, ofta anrikat i t.ex. pegmatiter. Som för de flesta lantanider är monazit, LnPO_4 , bastnäsit, LnCO_3F , och cerit (ett lantanidsilikat) de viktigaste mineralen; Ln betecknar de trevärda lantanidjonerna. Elementet lantan kan också ingå i allanit, fältspater, zirkon, hornblände, biotit och apatit. Vid vittring kan lantan fallas ut som karbonater och hydroxider, eller adsorberas av lermineral. Lösligheten för lantan är ganska låg.

Lantanhalterna i undersökningsområdets moräner är låga jämfört med övriga landet. Lantan är starkast korrelerat med yttrium, torium, beryllium, aluminium och järn. Lantan placerar sig i en faktor tillsammans med torium, yttrium m.fl. i faktoranalys, och dessutom antagonistiskt mot den mafiska elementgruppen. Associationerna visar att lantan företrädesvis ingår i granitiska bergarter.

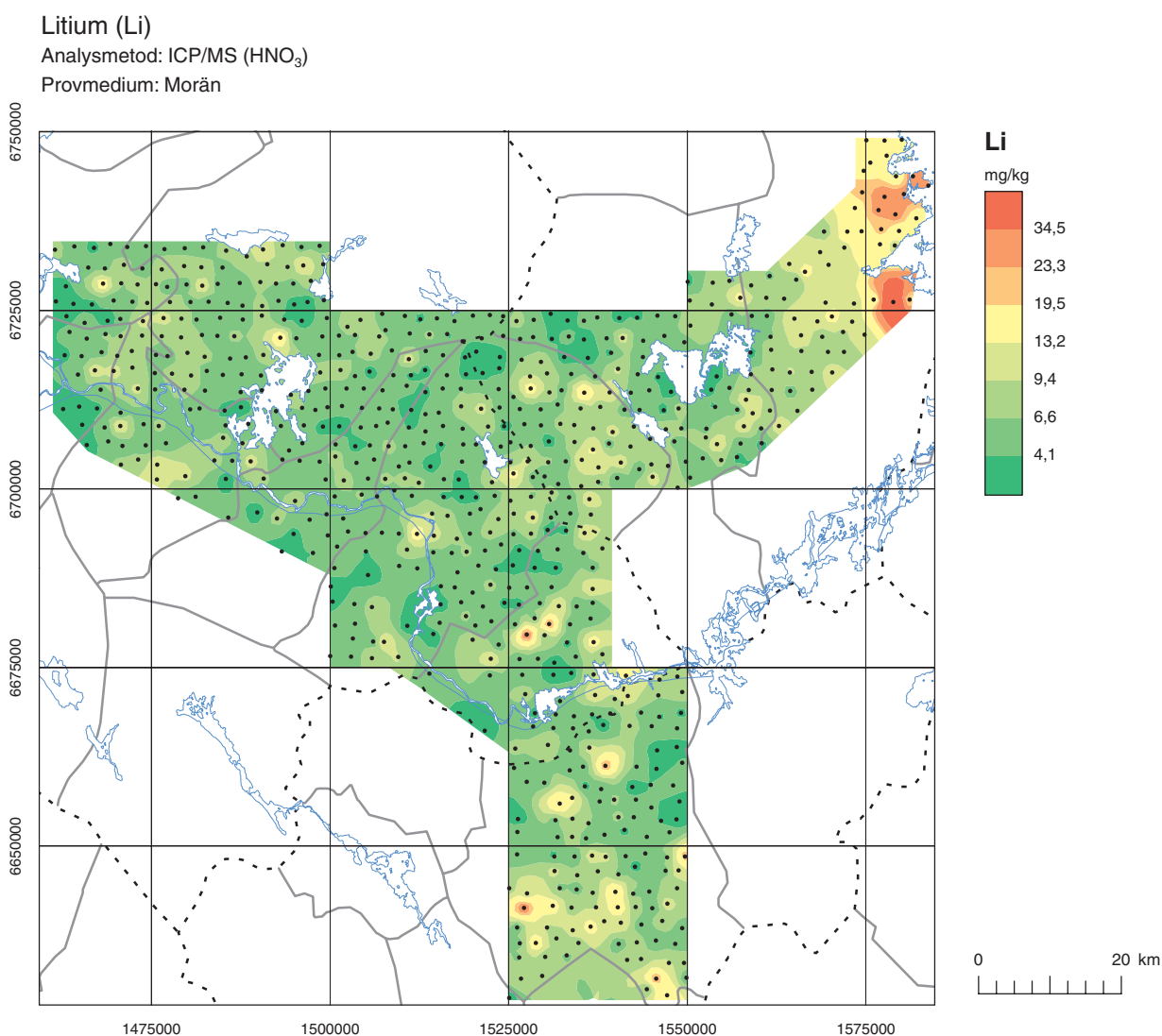
Litium (Li)

Litium är en alkalimetall som förekommer som spårämne i ett flertal mineral, exempelvis amfiboler, pyroxener, turmalin och glimmer. Litiummineral som spodumen, petalit och lepidolit förekommer, men det är troligen glimmermineralet biotit som är det mest utbredda värdmineralet för litium. Metal-

len förekommer i framför allt i pegmatiter, graniter och skiffrar, medan basiska bergarter och sandsten har betydligt lägre innehåll. Vid vittring adsorberas litium lätt till lermineral och manganoxider.

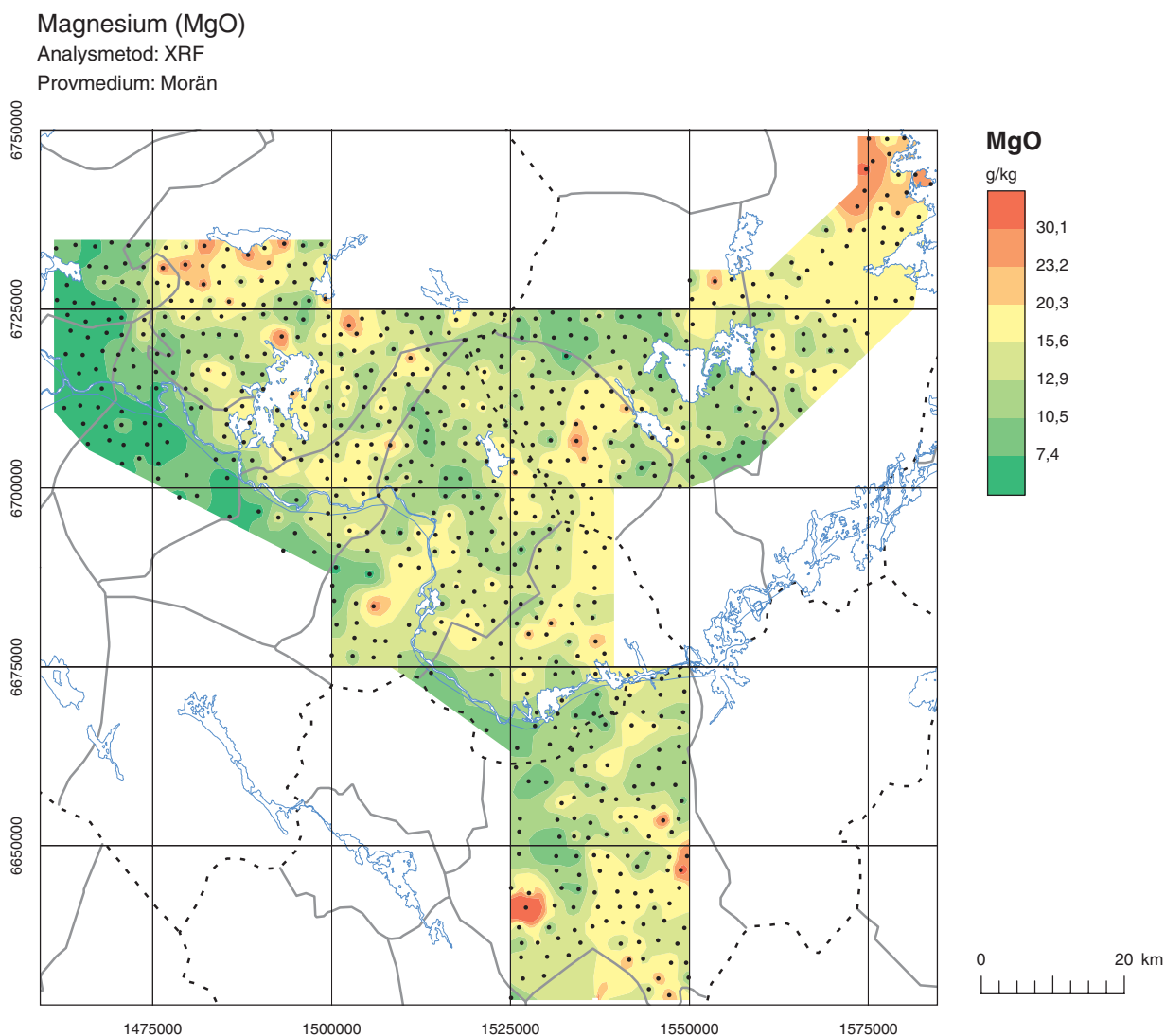
Spårämnet litium anses numera som viktigt i människokroppen och brist kan eventuellt ge ökad benägenhet för magsår, mentala problem, artros, reumatism och hjärt- och kärlsjukdomar. Överdoser ger hämmad ämnesomsättning med trötthet, svullnader, viktökning, låg puls och lågt blodtryck som följd. Tack vare 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 manodepressiva psykoser.

Medianvärdet för litium i undersökningsområdets moräner är lägre än för landet i övrigt. Utöver en del fläckvisa förhöjningar finns norr respektive söder om Gävle lite större områden med litiumhaltig morän. Litium korrelerar med ett stort antal element: beryllium, gallium, tallium, vanadin, rubidium, nickel, kobolt, vanadin, aluminium, järn, kalium, magnesium, titan. I faktoranalysen placerar sig litium i två grupper, den ena med kalium, rubidium och tallium, den andra med aluminium, järn, magnesium, titan m.fl. De olika elementassociationerna antyder litiums närvaro i flertalet bergartsbildande mineral, bland dem glimmer och lermineral.



Magnesium (MgO)

Den övervägande delen av magnesium som finns i urberget uppträder i form av magnesiumsilikater såsom olivin, serpentin, enstatit, granat, talk, asbest, flogopit och biotit m.fl. mineral. Många ingår i pyroxen- och amfibolgrupperna. Populärt brukar dessa mineral föras till gruppen "basmineral" eller mörka mineral. 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 som exempelvis gabbror oftast uppvisar förhöjda magnesiumhalter i jämförelse med vanliga gnejser och graniter. De vanligaste exemplen på grönstenar är gabbro, hyperit, diorit, diabas, basalt och amfibolit (metabasit). 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 genom magnesiummetasomatos då bidragit till omvandling av mineral och uppkomst av specifika magnesiumhaltiga mineral. 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.

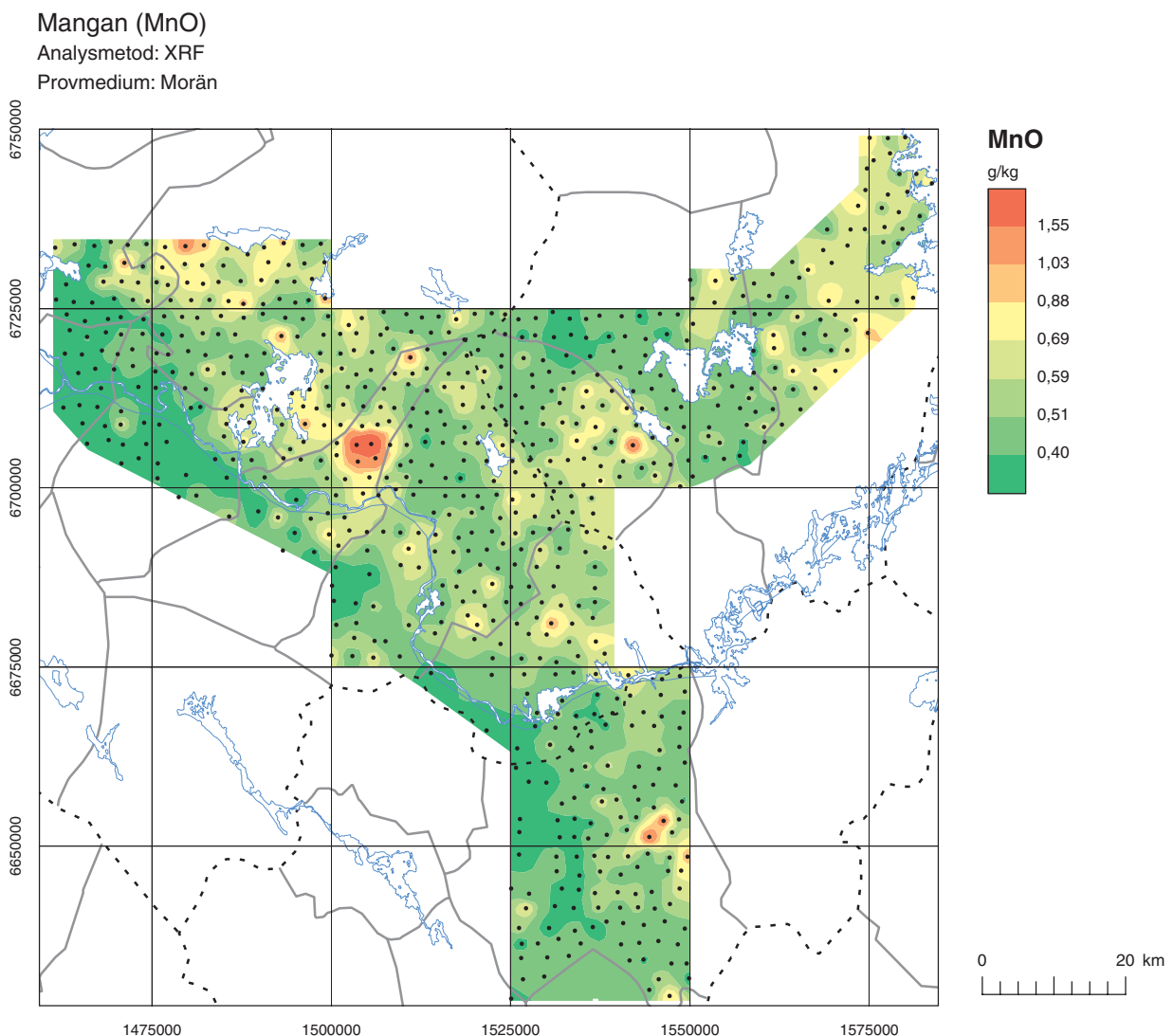


Elementet magnesium ingår i klorofyll, det gröna växtämnet i växter. Det är därför nödvändigt för alla gröna växter. Magnesium samverkar med kalcium och fosfor och 60–70 % av kroppens magnesium finns i skelettet. Magnesium aktiverar enzymer och är nödvändigt för cellandningen och viktigt vid hårt muskelarbete.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

Medianhalterna av magnesium i morän i kartområdet ligger i nivå med landet i övrigt. Förhöjningarna kan knytas till mängden basiskt bergartsinslag i moränmaterialet, men även i malmrika moränområden är magnesium ibland förhöjt. I områden med inslag av yngre graniter, pegmatiter och sura vulkaniter är magnesiumhalten betydligt lägre. Magnesium är korrelerat med en stor elementgrupp som kännetecknar främst olika basiska, oftast mörka mineral, bl.a. järn, aluminium, kalium, mangan, kobolt, krom, nickel och vanadin. I faktoranalysen placerar sig magnesium uteslutande i denna mafiska elementgrupp.

Mangan (MnO)

De högsta manganhalten förekommer i basiska och ultramafiska bergarter, 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, kalcit och dolomit, och kan ersätta



bl.a. järn i kristallgittren. De ekonomiskt viktiga manganmineralen utgörs av olika typer av malm-mineral. Viktigast är malmer som oxider och oxidhydroxider. 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 väl känt från internationella geokemiska undersökningar att en kartbild över mangan ofta ter sig rörig på grund av att kartbilden också reflekterar effekten av sekundära processer (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 Mn(II) . 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.

Totalhalterna av mangan i kartområdets moräner är ganska låga. De kraftigaste förhöjningarna i morän finns i anslutning till gruvområden som Bjursås och Lövåsfältet i nordväst och Snarpsåtra i sydost. I faktoranalysen återfinns mangan enbart i samma faktor som kadmium, bly, zink, silver och koppar vilket tolkas som en dominerande mineraliseringsfaktor. Både totalhalterna av mangan och syralakbart mangan korrelerar med ovanstående element. En svag korrelation finns även mellan mangan, järn, magnesium och kobolt, vilket kan antyda mangan i bergartsbildande mineral.

Molybden (Mo)

Molybden är, liksom wolfram, betydligt mer sällsynt än det lättaste elementet i samma grupp i periodiska systemet, krom. I bergarter ingår spårämnet i silikatmineral och molybdeninnehållet är vanligen högst i alunskiffer, näst högst i övriga skiffer samt lägre i graniter och basiter. Metallen förekommer inte i gedigen form i naturen, utan endast som kemiska föreningar. Det enda mineralet av praktisk betydelse är molybdenglans, MoS_2 . Typiskt för mineralet är att det påträffas i kisel-syrarik miljö i anslutning till graniter, pegmatiter, skarn och 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. Ett undantag är Uddgruvan i Grängesbergstrakten, där man brutit molybdenmalm. Molybden uppträder där i skarnmiljö tillsammans med wolfram som det har geokemisk släktskap med. 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.

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 hög 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.

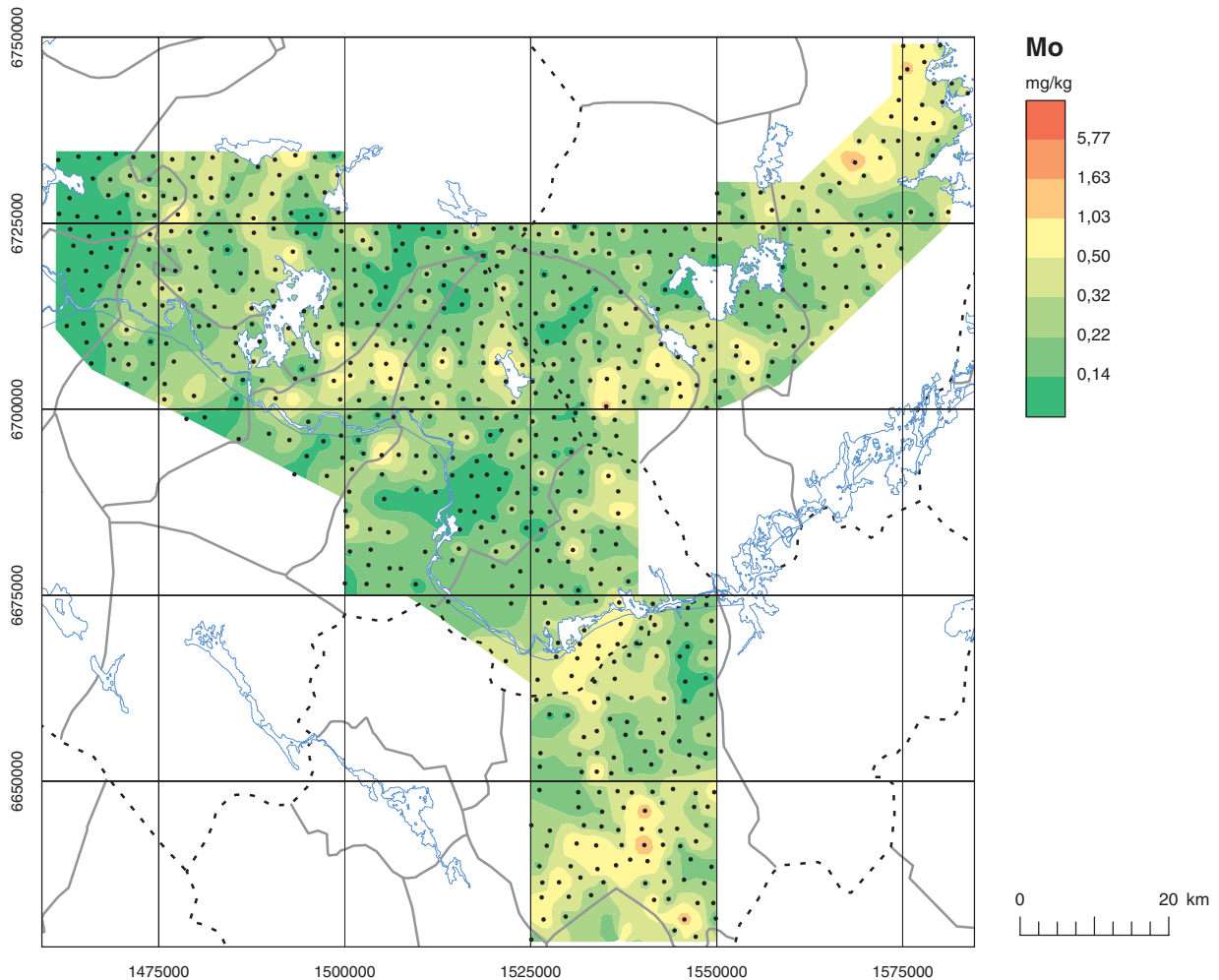
Molybden antas vara ett essentiellt spårelement under fosterlivet och hos nyfödda. Stora mängder molybden är däremot toxiskt och det kan också orsaka brist på koppar och svavel. Även om molybdenbrist inte beskrivits hos människa anses för små mängder av elementet ge bristtillstånd.

Medianhalten av syralakbart molybden är lägre i kartområdet än i landet i övrigt. Kraftiga förhöjningar saknas, men viss förhöjning finns i anslutning till en del kisleförande områden, exempelvis Lövåsfältet och Sala–Salbohed. I delar av kartområdet kan molybdeninnehållet i morän knytas lokalt till yngre graniter som söder och öster om Torsåker. I de gnejsiga områdenas moräner i nordost härstammar sannolikt mo-

Molybden (Mo)

Analysmetod: ICP/MS (HNO₃)

Provmedium: Morän



lybdenet från glimmerrika och kanske också kisrika partier i de omvandlade bergarterna. Korrelation med järn, selen och syralakbart vanadin antyder association med kiser. I faktoranalysen placerar sig molybden i ett par grupper, dels med torium-gruppen (torium, yttrium, lantan, uran, tenn), dels med rubidium, kalium och tallium. Båda grupperingarna kan kopplas till en granitisk-pegmatitisk bergartsmiljö.

Natrium (Na₂O)

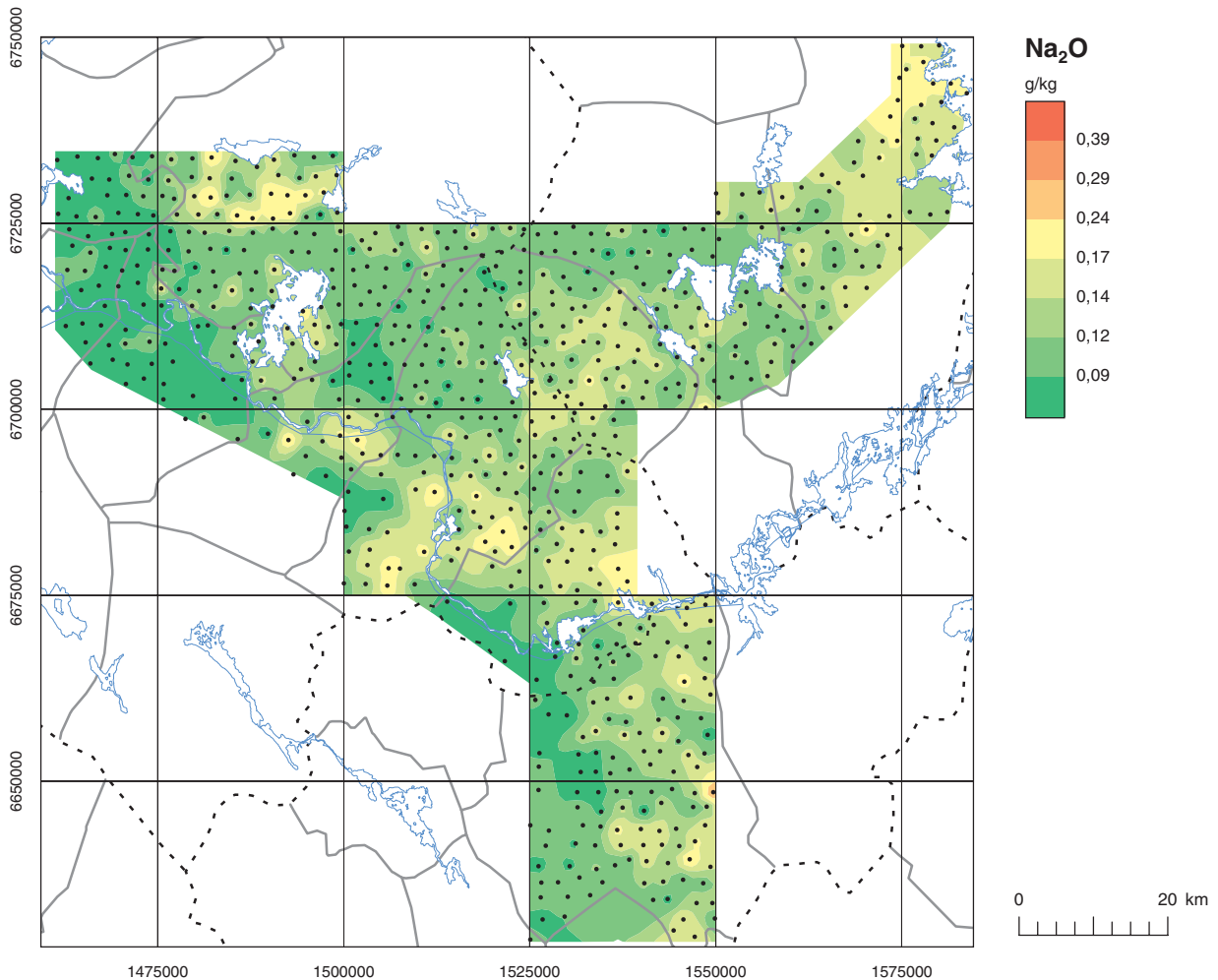
Natrium förekommer främst i olika fältspater såsom i plagioklasseriens olika mineral (albit, oligoklas) och kan där vara olika hårt bundet. I mer löslig form finns natrium i amfiboler, pyroxener och glimrar. Natrium kan också substituera kalium i kristallgittret och därmed ingå i ett stort antal bergartsbildande mineral. Natrium återfinns i såväl basiska bergarter som mer kiselrika. Lägst är innehållet i alunskiffer och sandsten. Vid vittring är natrium i fältspater tämligen svårslösligt, men i stället mycket lösligt när det sitter i mafiska mineral, glimrar och plagioklaser.

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 (natriumklorid, NaCl) 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.

Natrium (Na₂O)

Analysmetod: ICP/MS (HNO₃)

Provmedium: Morän



Medianvärdena av såväl totalhalt som syralakbar halt natrium är lägre i undersökningsområdets moräner än i landet i övrigt. Måttliga förhöjningar av syralakbart natrium återfinns i moränområden med basiska bergartskomponenter. Totalhalterna av natrium korrelerar med totalhalter av strontium, kalcium, barium, wolfram och yttrium. Syralakbart natrium korrelerar med syralakbara halter av järn, kalium, titan samt med strontium, kalcium, magnesium, kobolt och vanadin. Associationerna antyder natriums hemvist i olika mineraliseringsmiljöer.

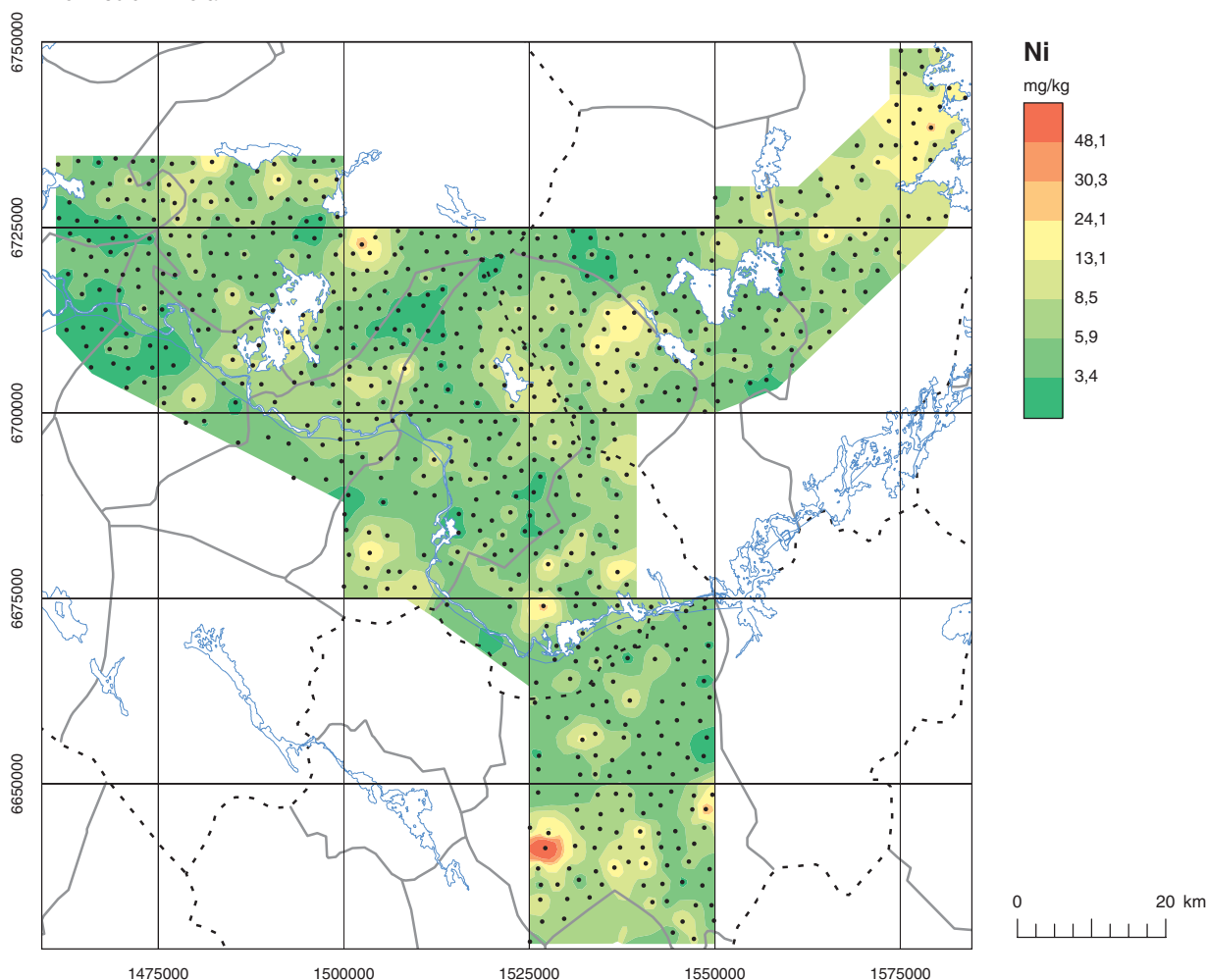
Nickel (Ni)

Nickel förekommer i basiska bergarter som gabbro, amfibolit och diabas, och kan uppträda med mycket höga halter i ultramafiska bergarter. Skiffrar är också vanligtvis nickelförande medan granitiska bergarter och kalkstenar har betydligt lägre innehåll av nickel. I sandstenar är innehållet mycket lågt. Metallen ingår i såväl silikatmineral som i 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 mafiska till ultramafiska djupbergarter. Nickel har brutits på flera ställen i Sverige, från Kleve i Småland till Lainijaur i Västerbotten. Vanligen förekommer pentlandit i nickelhaltig magnetkis som följer framför allt de mellansvenska sulfidmalmen. De nästan lika atomradierna för järn, kobolt och nickel gör att de lätt byts ut mot varandra i kristallgittren. Nickel

Nickel (Ni)

Analysmetod: ICP/MS (HNO₃)

Provmedium: Morän



och kobolt följer av samma orsak även gärna koppar och i mineraliseringar kan också platinametallerna följa med. Nickel kan också ersätta järn och magnesium i mineralgittret. 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 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. Omkring 3 % av det nickel som finns i födan tas upp i magtarmkanalen. Utsöndringen sker framför allt med urinen.

Medianvärdet för nickel är lägre i kartområdets moräner än i landet i övrigt både vad gäller totalhalter och syralakbara halter. Måttliga förhöjningar finns främst i områden med basiska bergarter, exempelvis i trakten av Torsåker, vid sjön Grycken, norr om Gävle och nordost om Avesta. Strax öster om Salbohed ligger Silverberget där nickelhaltig magnetkis förekommer i äldre mafiska intrusivbergarter. I samma typ av geologisk miljö återfinns den kraftiga nickelanomalin i morän sydväst om Salbohed. Nickelhalten är mycket hög (totalhalt 282 mg/kg och syralakbar halt 119 mg/kg) liksom halterna av krom och magnesium. I moränområdet finns således minst ett nickelvärde som överstiger gränsen för känslig markanvändning. Området kan anses vara ett riskområde avseende vattenkvalitet. Exempel från södra Södertörn (ett par mil söder om Stockholm) visar att det finns nickelhalter i dricksvatten

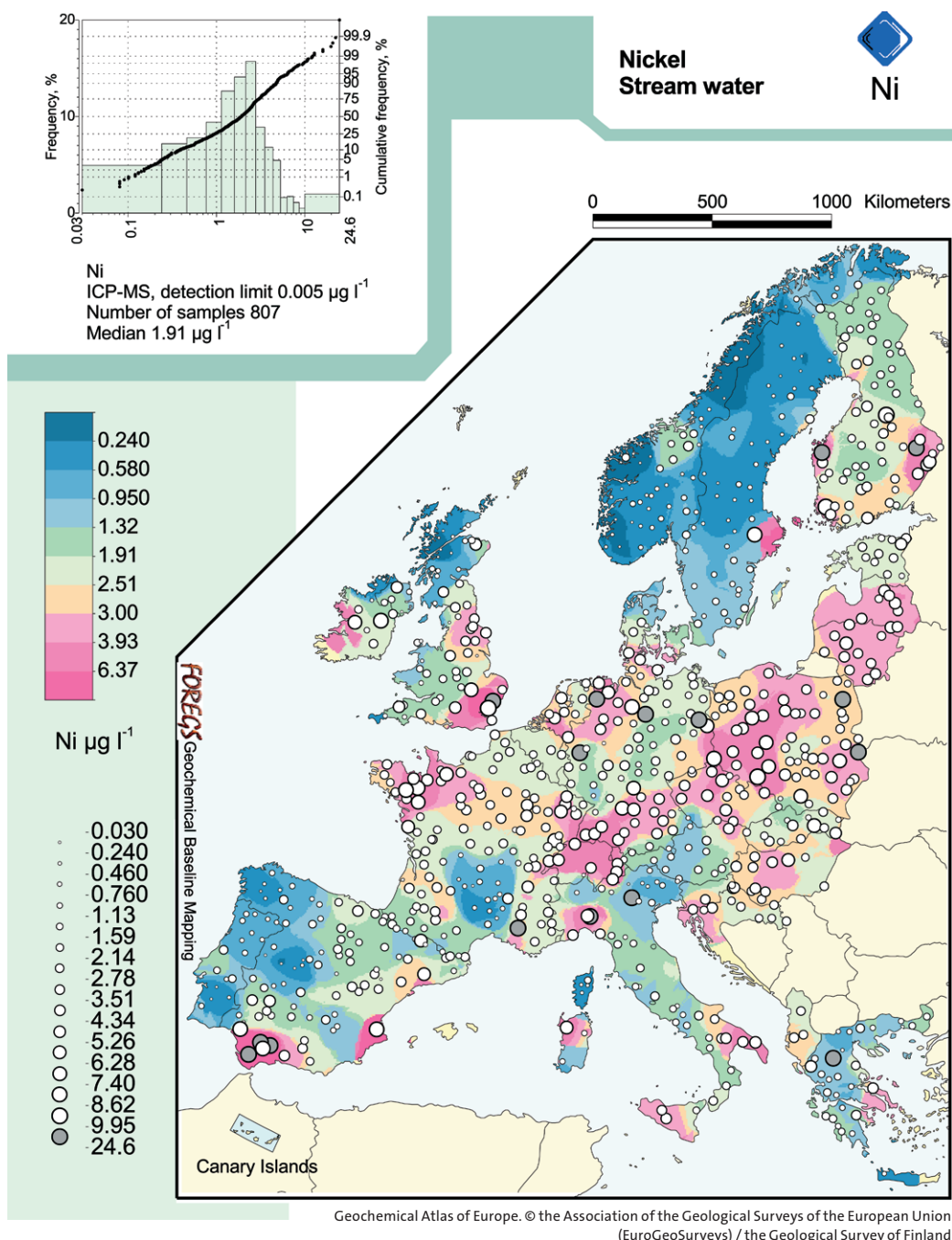


Fig. 10. Nickel i medelstora ($<100 \text{ km}^2$) vattendrag. Filtreerat vatten från 51 platser i Sverige.
 Nickel in stream water ($<100 \text{ km}^2$). Filtered water from 51 sites in Sweden. From Salminen et al. (2005).

som överskrider WHO:s riktvärde $20 \mu\text{g/l}$ i ett område med förhöjda nickelvärden i såväl morän som berggrund (Andersson 2007). Nickel är korrelerat med den mafiska elementgruppen med magnesium, järn, krom, kobolt, vanadin, litium, rubidium m.fl.

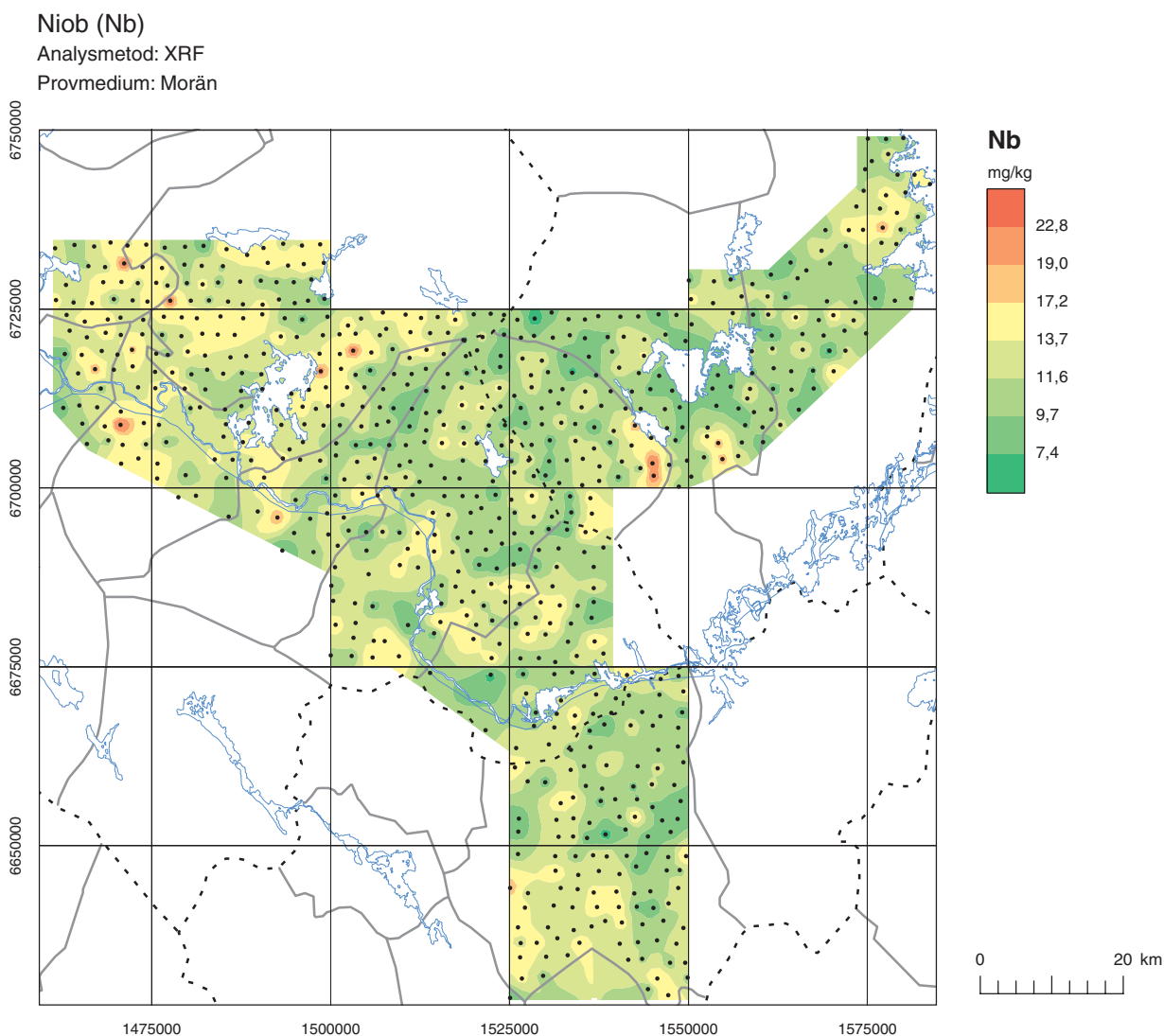
I det europeiska perspektivet har Sverige lågt nickelinnehåll i marken. Så har även de medelstora vattendragen i FOREGS kartläggning. Högst nickelhalt i de svenska vattnen uppmättes dock i avvattningsområdet från Salbohed, vilket framgår i figur 10.

Niob (Nb)

Niob, som är vanligare än bly men mer sällsynt än koppar, förekommer i jordskorpan endast som kemiska föreningar och ofta tillsammans med tantal. Metallen kan exempelvis ingå i biotit, amfibolit, titanit och zirkon. De viktigaste mineralen är dock pyroklor och columbit. Niob återfinns främst i graniter och pegmatiter och ofta tillsammans med sällsynta jordartsmetaller och uran, torium, titan och kalcium. Lägst är niobinnehållet i mafiska och ultramafiska bergarter. Niob kan vara lösligt i både sur och alkalisk miljö, och det beror på värddmineralets löslighet om niob mobiliseras. Niob tas upp av växter och en del har förmåga att anrika metallen över niobmineraliserade områden, vilket på vissa håll i världen utnyttjats i prospekteringssyfte.

Niob och dess föreningar har ingen känd biologisk roll eller toxicitet. Den radioaktiva isotopen ^{95}Nb bildas vid radioaktivt sönderfall av ^{95}Zr , som är en fissionsprodukt vid kärnklyvning. ^{95}Nb påvisades i tyska floder efter kinesiska kärnvapenprov 1980, men halterna var låga.

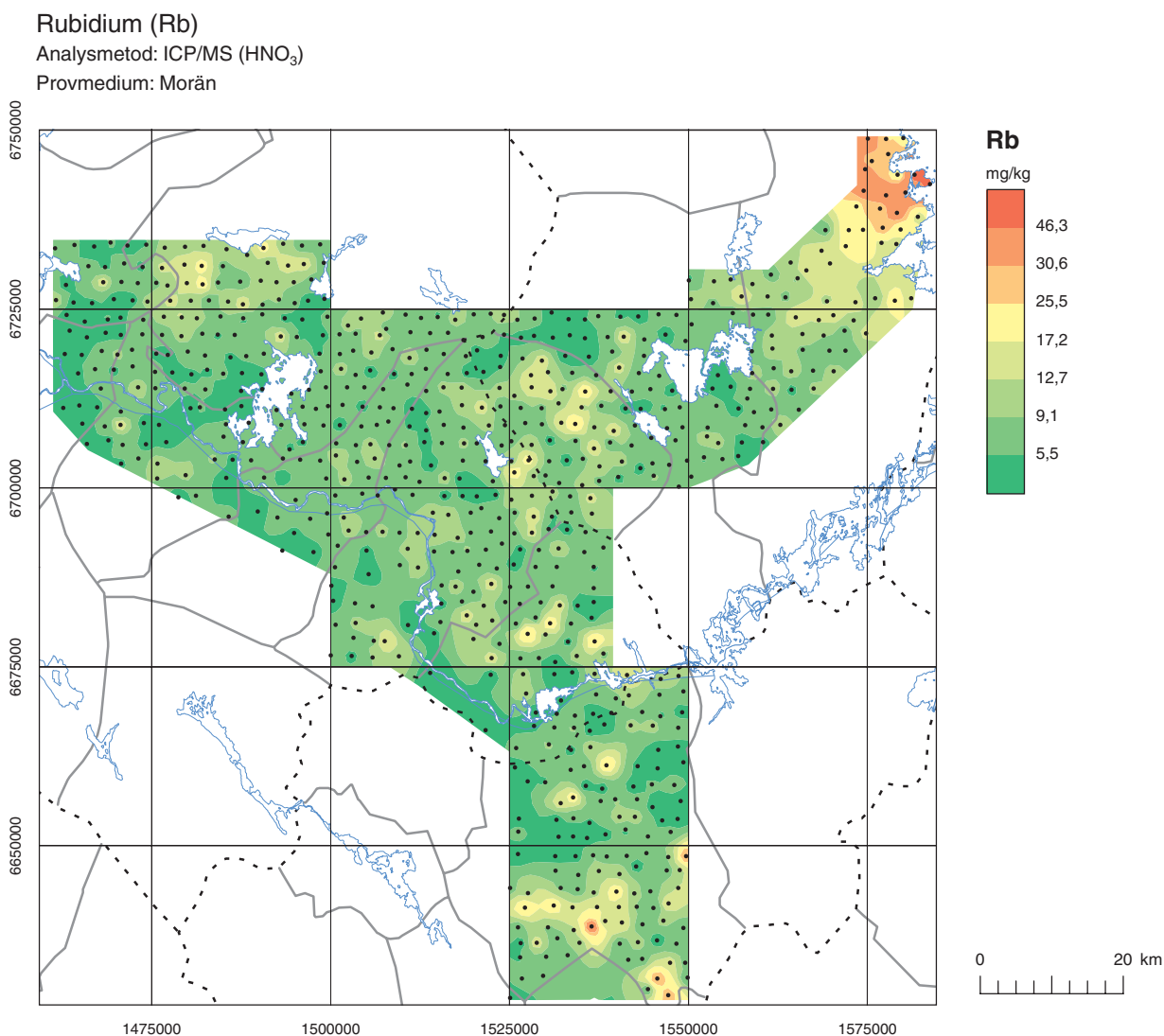
Innehållet av niob i undersökningsområdets moräner är lågt. En del förhöjningar i nordväst och vid sjön Ottnaren anknyter till granitisk–pegmatitisk berggrund. Korrelationen med totalhalter av rubidium och titan och svagt med tenn, gallium och totalhalten av kalium associerar också till granitisk–pegmatitisk miljö. Niob placerar sig i faktoranalys tillsammans med torium, uran och tenn, vilket visar på en koppling till yngre graniter.



Rubidium (Rb)

Alkalimetallen rubidium är relativt vanlig och förekommer i jordskorpan i ungefär samma utsträckning som nickel, koppar och zink. Det ingår i många mineral, t.ex. pollucit och leucit (silikater) och carnallit (kaliummagnesiumklorid), dock ej 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 % av metallen. Rubidium ingår i kalifältspater och glimmermineral och förekommer vanligen i skiffrar, graniter och pegmatiter. Sandstenar kan ha måttligt höga halter medan basiska bergarter har betydligt lägre innehåll. Rubidium bildar inga egna mineral utan följer kalium i geokemiska processer och kan ersätta såväl kalium som barium i mineralens kristallgitter. 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.

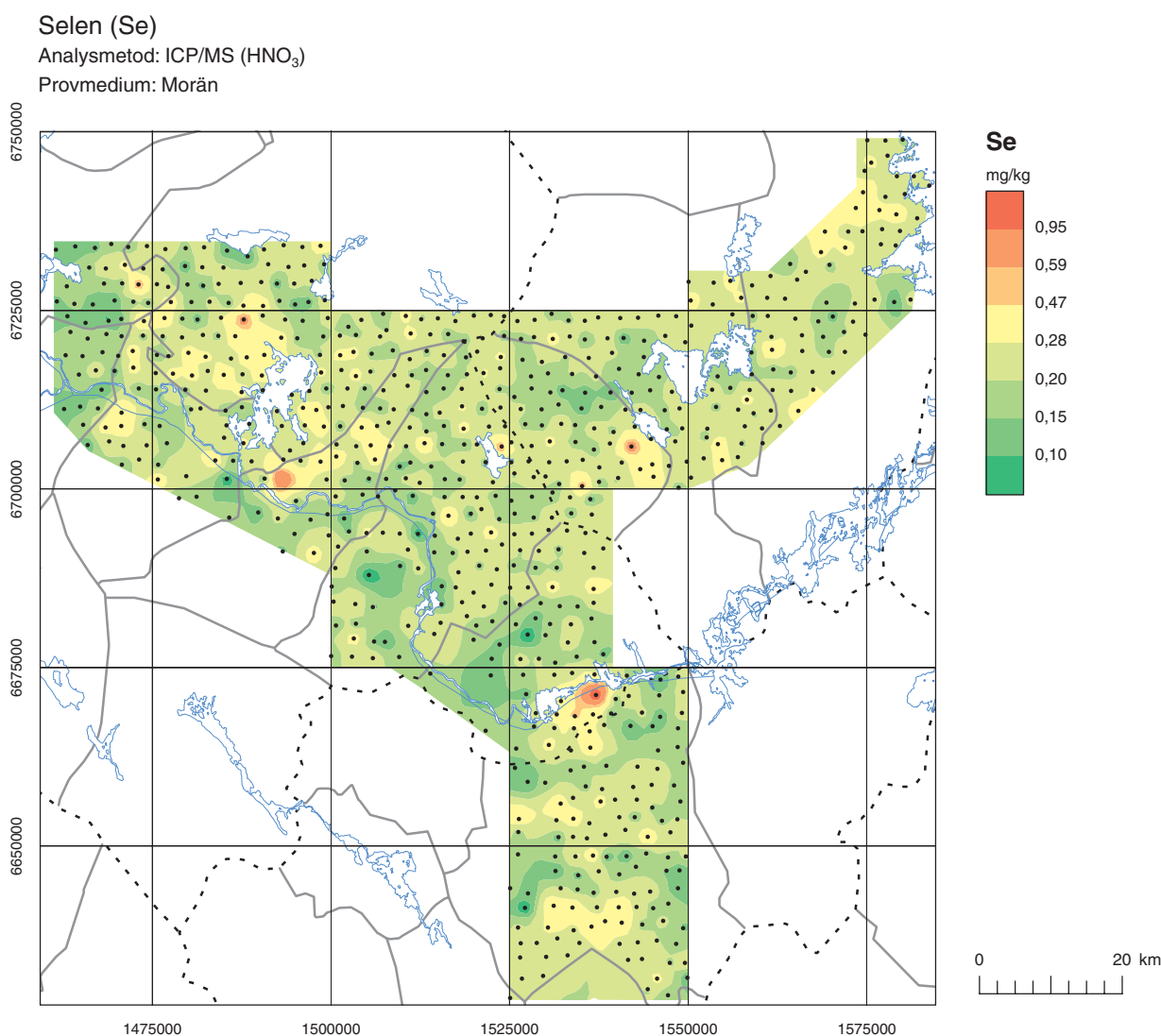
Medianvärdet för rubidiums totalhalt är högre i kartområdets morän än i landet i övrigt, men för syralakbart rubidium är det lägre. Kartbildens förhöjningar med rubidium i syralakbar form avspeglar elementets närvaro i relativt lösliga mineral. Sedimentådergnejsernas moräner i nordost markeras med en rubidiumförhöjning. Förhöjningarna i söder kan även de knytas till omvandlade sedimentbergarter. Sannolikt är det glimmermineral som är bärare av rubidium. Totalhalterna av rubidium



korrelerar starkt med totalhalterna av kalium, men också med titan, niob, gallium, litium och tallium. Syralakbart rubidium korrelerar med litium och tallium, men också med kobolt, aluminium, järn, magnesium, kalium, m.fl. Faktoranalys placerar rubidium i flera elementgrupper. Rubidium i syralakbar form återfinns i en faktor starkt kopplat till järn, magnesium, aluminium, litium m.fl. Totalhalter av rubidium uppträder i en faktor tillsammans med kalium och kisel. Den förra associationen knyter huvudsakligen rubidium till glimmermineral, den senare till fältspater.

Selen (Se)

Selen har låg medelhalt i jordskorpan. Selen är lika sällsynt som silver och kvicksilver och mycket ovanligare 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 skiffrar 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 g selen per ton. Selen finns också i halter av 1–5 g per ton i vissa kol- och petroleumförekomster. Selen kan ersätta svavel i olika processer. Vid vittring är rörligheten hög hos selen. I basisk miljö bildas lättlösliga och biologiskt tillgängliga selenater, men om pH är lågt (<7) bildas i stället svårösliga selenider och selsulfider. 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 svårösliga föreningar.

Selen är ett livsnödvärdigt näringsämne. Det ingår i enzymet glutathionperoxidas, som behövs för kroppens hantering av fria radikaler. Selen är också ett antagonistiskt element som motverkar toxiska

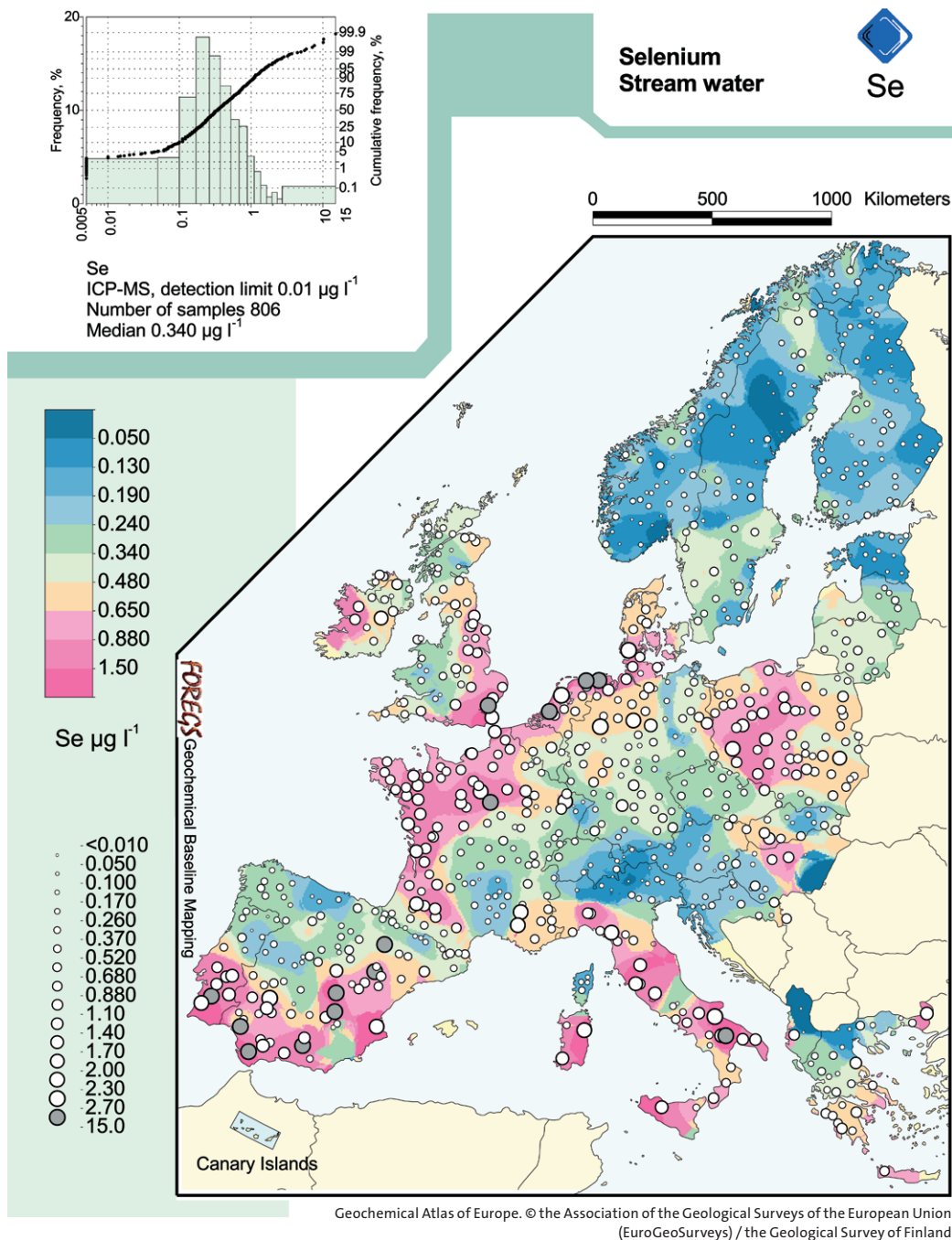


Fig. 11. Selen i medelstora (<100 km²) vattendrag. Filtrerat vatten från 51 platser i Sverige.

Selenium in stream water (<100 km²). Filtered water from 51 sites in Sweden. From Salminen et al. (2005).

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. 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 känt för att vara selenfattigt. 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. Förgiftning hos boskap på grund av selensamlade växter förekommer i bl.a. USA. Hos hästar och kor kan selenförgiftning bl.a. ge hov- och klövsprickor, hälta och håravfall.

Medianhalten av selen ligger på samma nivå som landet i övrigt. De svaga förhöjningarna runt sjön Runn, sydost om Torsåker, i Salatrakten och öster om Bälinge koppargruvor finns alla i moränområden som har förhöjda halter av sulfidelement. Selen följer svavel i den geokemiska cykeln och selen i undersökningsområdet har också viss korrelation med svavel och molybden. I faktoranalysen hamnar selen i samma faktor som svavel, silver, bly, antimon, zink m.fl., vilket antyder selens förekomst i mineraliseringar.

FOREGS kartläggning visar att de nordiska länderna har lågt seleninnehåll i medelstora vattendrag, se figur 11. Detta stämmer väl överens med de relativt sura förhållanden som dominerar norra Europa.

Silver (Ag)

Jordens mantel innehåller i medeltal ca 10 g silver per ton. I den del av jordskorpan som är tillgänglig för gruvdrift förekommer silver i en uppskattad medelhalt av 50–100 mg/ton. Huvuddelen av jordskorpan silvermineral utgörs av sulfidföreningar av envärt 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 sura graniter, vulkaniter och gnejser oftast är lägre. Silver



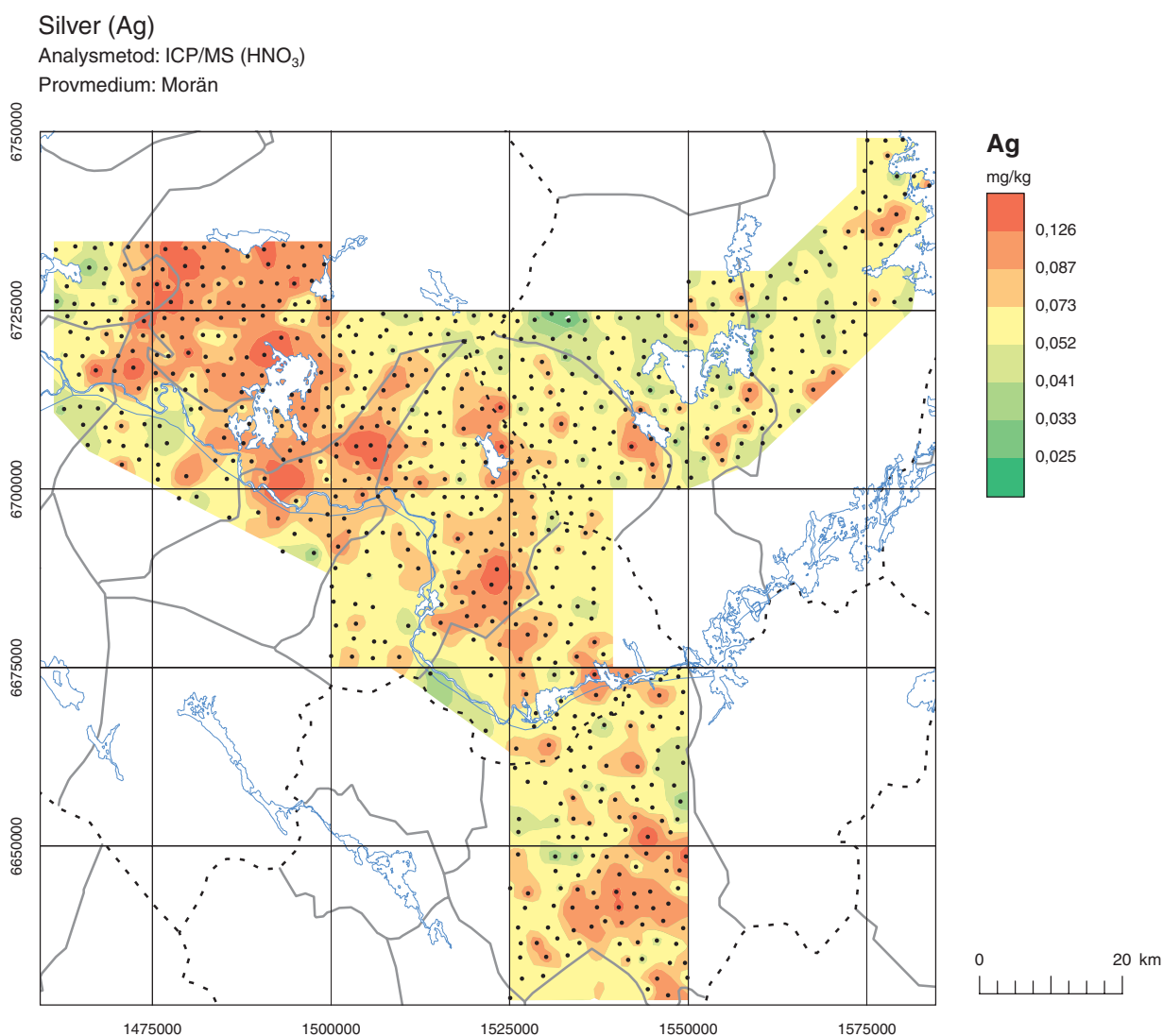
Fig. 12 Trådsilver från Lovisagruvan. Foto Per Wretling.

Silver in string from the Lovisa mine.

kan uppträda i hydrotermala gångar, i kambrisk sandsten och i skiffer. Silver förekommer i ren form i naturen och i malmer, ofta bundet till sulfidmineral som blyglans, zinkblände och kopparkis eller arsenider med kobolt och nickel. I Sala silvergruva var det t.ex. blyglans och zinkblände som bröts för att kunna utvinna silvret. Blyglansen där var bland de silverrikaste i världen. Silver förekommer sällsynt också i gedigen form som argenit, Ag_2S , och hornsilver, AgCl . Gediget silver ingår bl.a. i Harmsarvets malmer. Svenska fyndigheter med silver är kända från i stort sett hela landet (exempel i fig. 12, från Ramsberg i Örebro län). Vår äldsta silvergruva är Östra Silvberg i Dalarna, där gruvdriften började i mitten av 1300-talet. Ädelmetallen silver är dock känd av människan och brukad i över 5 000 år. Vid vittring är silver lättflyktigt, men fastläggs och bildar stabila komplex eller adsorberas av markpartiklar med järn och mangan eller lerpartiklar.

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 silvernitrat 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.

Silverinnehållet i kartområdets moräner är generellt högt jämfört med landet i övrigt. Förhöjningar finns bland annat i moräner i kända malmstråk som Falun, Sala, Garpenberg med flera. Många av de

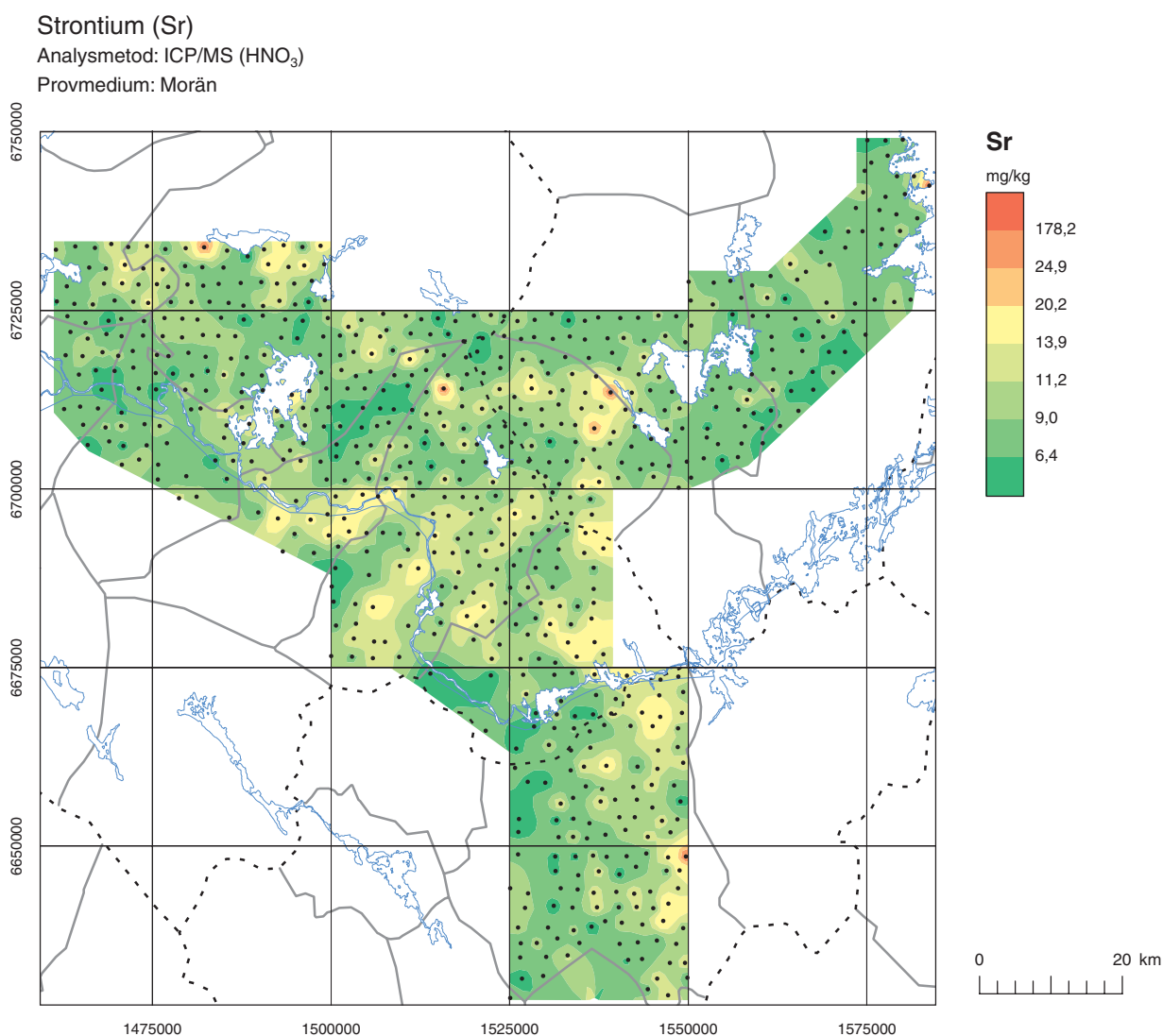


kända malmerna med blyglans och zinkblände är kända för sin silverrikedom, exempelvis Sala och Harmsarvet. Den senare återfinns sydost om Bjursås, i kartområdets nordvästra mest uthålliga silverförhöjning. Ett flertal mindre sulfidmineraliseringar ligger också i moränområden med högt silverinnehåll, exempelvis Tomtebo och Lövåsfältet, söder respektive öster om sjön Runn. Silver är korrelerat med bly, kadmium, zink, antimon och mangan, och i faktoranalysen återfinns silver endast tillsammans med nämnda element. Associationen avspeglar tydligt silvers uppträdande i mineraliserad miljö.

Strontium (Sr)

Strontium är en av de s.k. alkaliska jordartsmetallerna. I naturen förekommer den 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. pyroxener och plagioklaser, i basiska bergarter och i lägre grad i skiffrar och graniter. Strontium följer och kan ersätta kalium och barium tack vare liknande jonradier och kan därmed också uppträda i kalifältspat. Vid vittring fixeras mobiliserat strontium till karbonater, lermineral och organiskt material.

Medianvärdet för totalhalten respektive den syralakbara halten strontium är lägre i undersökningsområdets moräner än i landet i övrigt. Strontium förekommer med låga förhöjningar i moränen främst

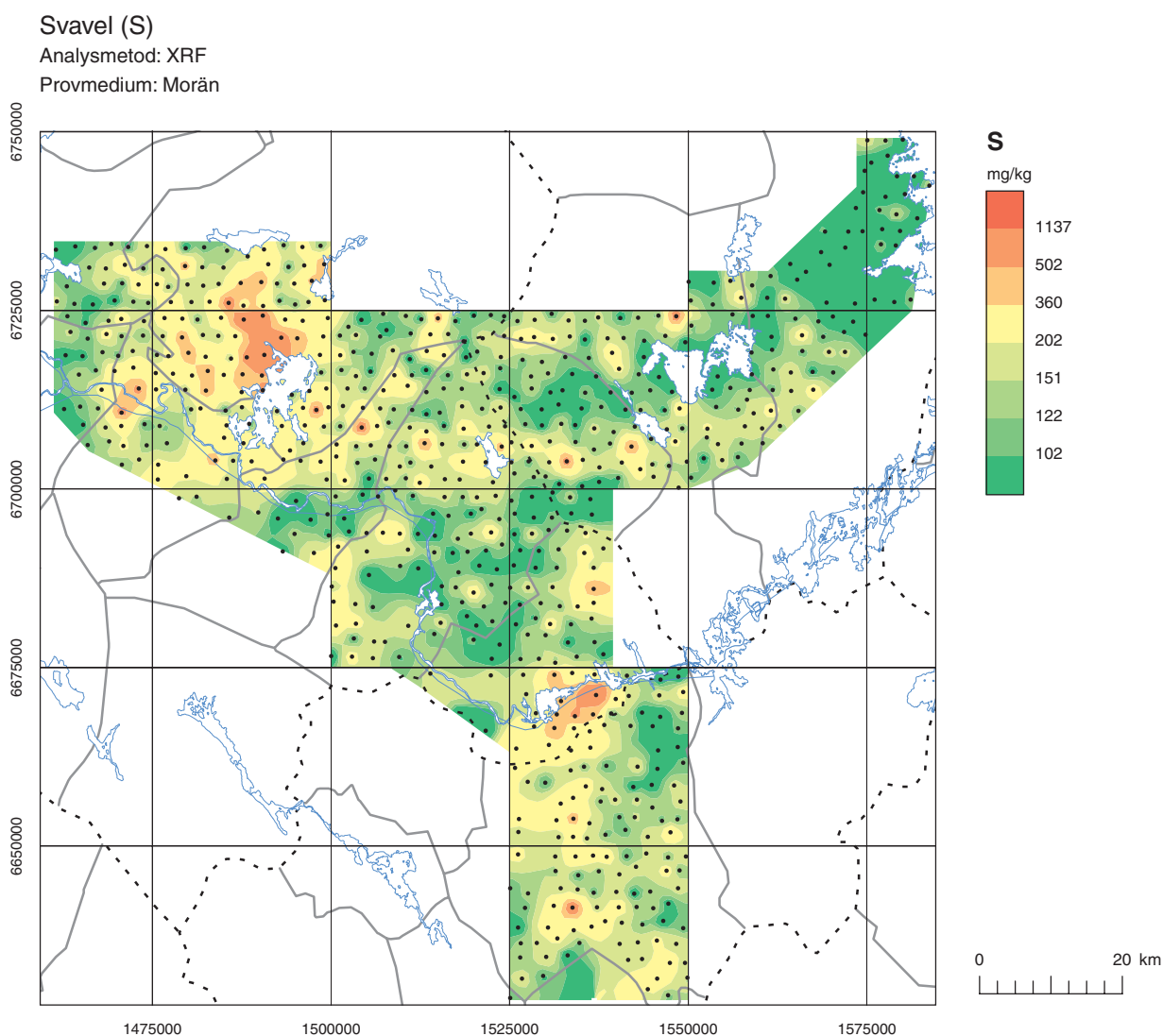


i samma områden som kalcium och natrium. Korrelationer finns med kalcium och natrium och associationen följer det gängse uppträdandet av strontium i olika mineral.

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 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 kan 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, förekom-



mer 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 svavelreducerande 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 tillgodoses 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.

Medianhalten svavel i kartområdets moräner är något lägre än i landet i övrigt. Svavelförhöjd morän ansluter till malmstråken, men också till områden med massiv av basiska bergarter. Den utbredda förhöjningen i morän i Falunområdet har svavelhalter under 1 000 mg/kg. Maximalt uppmätt svavelhalt i undersökningsområdet ligger i förhöjningen öster om Bäsinge koppargruva. Svavelinnehållet i en punkt är här 1146 mg/kg. Korrelationen med andra element är svag, men finns med selen. I faktoranalysen placerar sig svavel tillsammans med silver, kadmium, bly, antimon, selen, tallium och zink, en sulfidfaktor. Till viss del finns ett samband mellan svavel och pH på så sätt att där pH-värdena är högre än 7, alltså basiska, är svavelhalterna låga. Däremot gäller inte det motsatta förhållandet, även om man återfinner några av de högsta svavelhalterna i sur miljö.

Tallium (Tl)

Tallium är ett vanligt grundämne i jordskorpan. Det förekommer bland annat i mineralen crooksit, lorandit och hutchinsonit, men egna mineral är sällsynta. Elementet associeras till kalium och rubidium och kan ingå i ett flertal mineral. Tallium uppträder vanligen 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). Metallen finns naturligt i olika bergarter, främst i skifferar, graniter och granodioriter. Innehållet i basiska bergarter är vanligtvis mycket lågt. Vid vittring är tallium lätttrögligt, 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, vars giftighet jämförs med kadmium, metylkvicksilver och bly, 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).

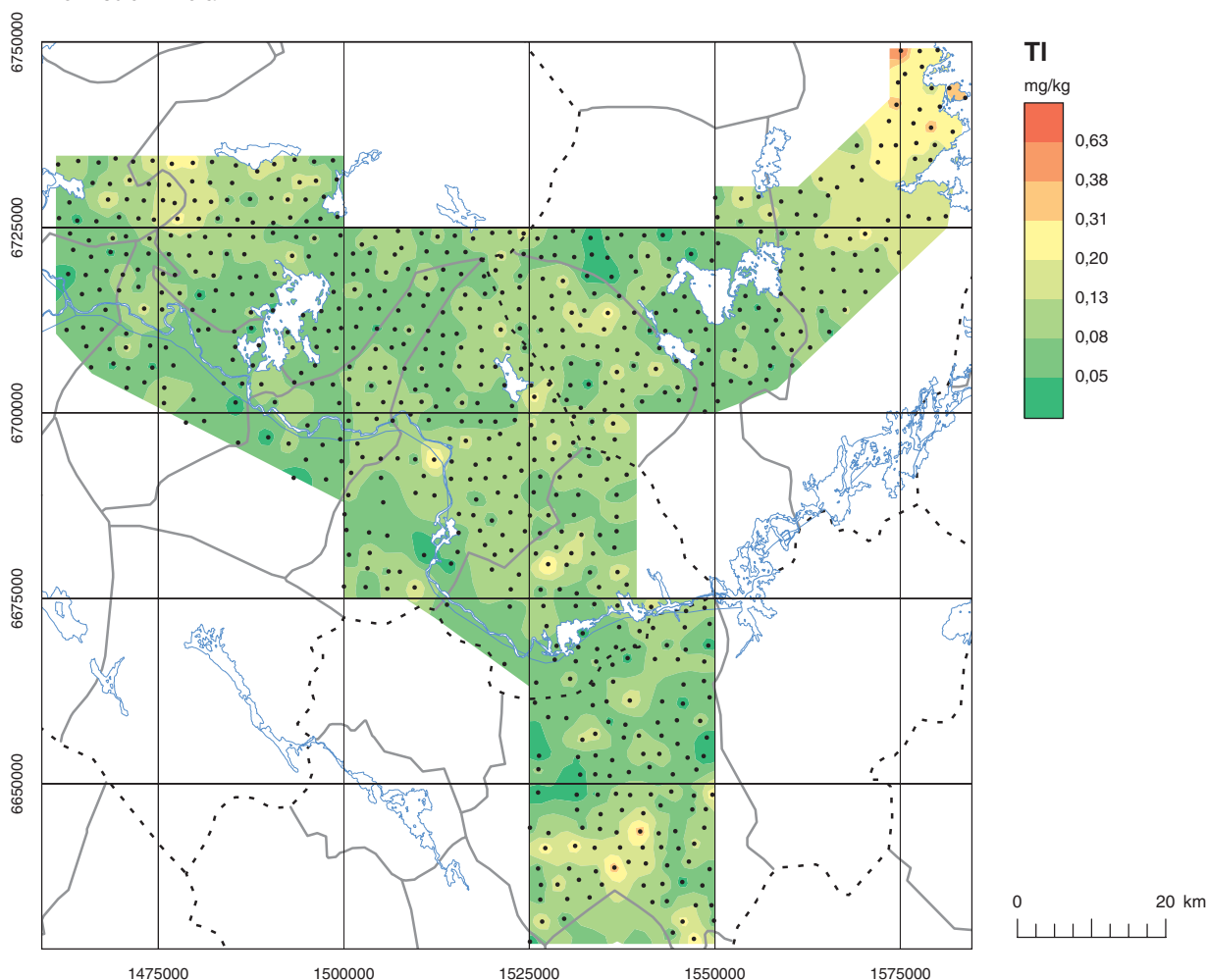
Det är inte känt om tallium är ett nödvändigt ämne, men miljöanalysdata indikerar att det bioackumuleras i akvatiska organismer. Tallium har spårats i fisk och växter. Så vitt man vet har människan inga behov av tallium, det är enbart toxiskt. Talliumföreningar är mycket giftiga och på grund av att de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

Talliumhalterna i moränerna är låga i kartområdet. Medianhalten är lägre än i landet i övrigt. Associationen till kalium och rubidium är stark och både faktoranalysen och korrelationen med andra element (litium, magnesium, järn, nickel m.fl.) knyter tallium till glimmermineral och lermineral.

Tallium (Tl)

Analysmetod: ICP/MS (HNO₃)

Provmedium: Morän



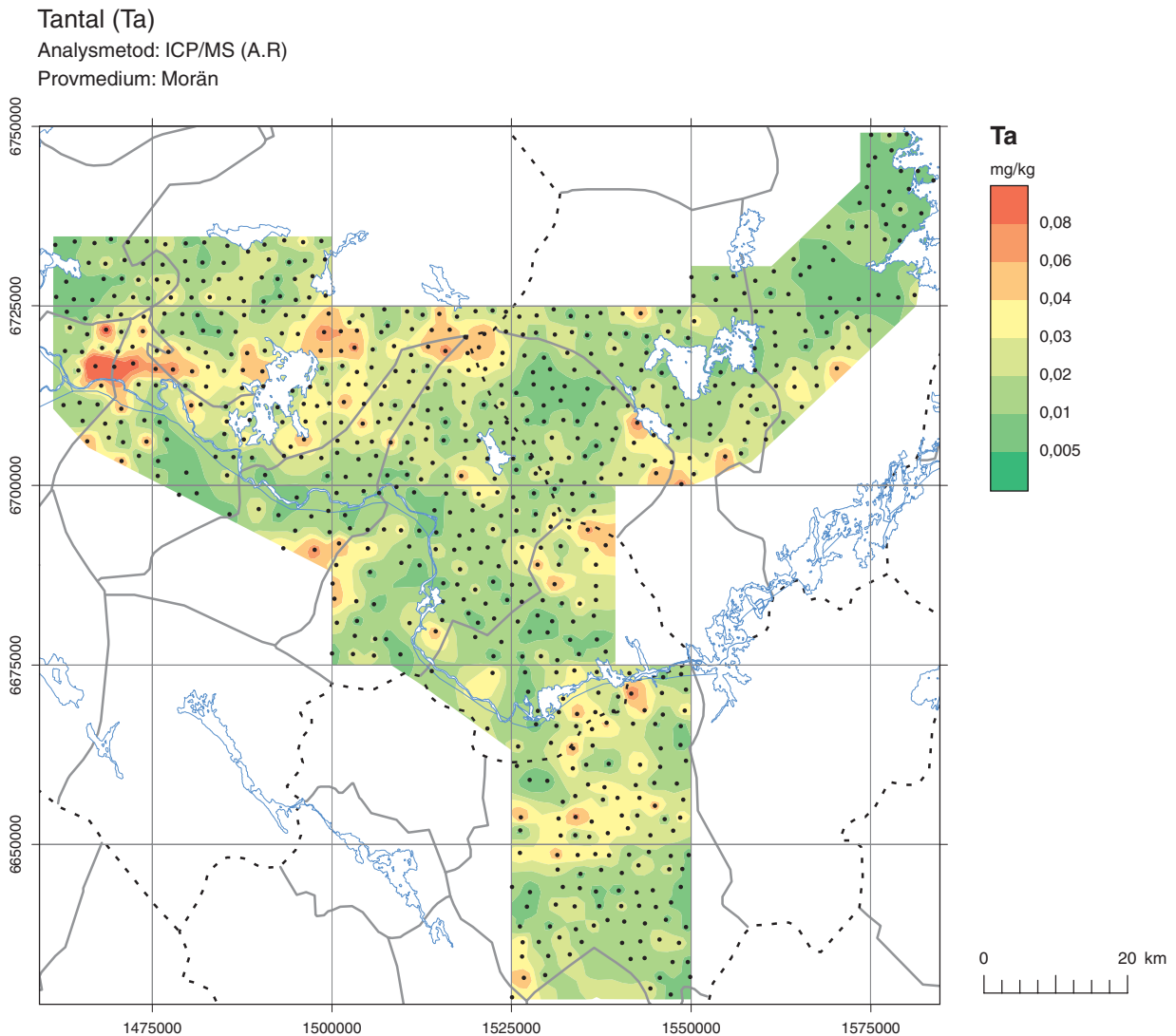
Tantal (Ta)

Spårelementet tantal upptäcktes på 1800-talet i ett mineral från Ytterby stenbrott, på Resarö utanför Vaxholm. Tantal uppträder tillsammans med niob i mineral som tantalit, tapiolit och pyroklor. Sällsynta jordartsmetaller och uran, torium, kalcium och titan kan också finnas tillsammans med tantal. Anrikat påträffas tantal främst i tennmalmer. Andra mineral som kan bära tantal är främst titanit och ilmenit, men metallen kan även ingå i zirkon, biotit och amfiboler. Bland bergarter är det graniter, vulkaniter och gnejser som vanligen har det högsta tantalinnehållet. I vittringsprocesser har tantal låg löslighet. Tantalbärande mineral påträffas ofta anrikade i tungmineralsand. Mobiliteten för metallen är låg i basisk miljö men ännu lägre i sur miljö. I lösning kan dock tantal bindas till organiskt material.

Man antar att tantal inte är ett livsviktigt ämne. Kunskapen är ganska låg om hur metallen uppför sig i levande organismer, det finns dock vissa som ackumulerar tantal. Mycket litet är också känt om tantals effekter på miljön. Den låga lösligheten och rörligheten indikerar låg toxicitet för metallen.

Analys av kungsvattenlakbart tantal har nyligen införts i de markgeokemiska databaserna och kartbilden är därför preliminär. Det geokemiska mönstret av tantal i morän avspeglar delar av granitpegmatitområdena norr om Borlänge och i trakten av sjön Ottnaren och söderut i västra delen av kartområdet. Korrelationer med andra element saknas i stort sett, men finns svagt med tenn i salpe-

tersyralakbar form, men ej med kungsvattenlakat tenn. I faktoranalys placerar sig tantal i två grupper, dels med svavel, bly, antimon, silver och zink, dels med torium, yttrium, lantan och zirkonium. Ingen association finns med niob, vilket kan synas lite märkligt då de båda elementen oftast uppträder tillsammans. Elementen har dock analyserats med olika metoder: tantal med kungsvatten och niob med röntgenfluorescens. Det senare visar niobs förekomst oavsett mineral, medan kungsvattenlakbart tantal emanerar från mineral med viss löslighet.



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. Accessoriska mineral i dessa bergarter kan, förutom kassiterit, vara wolframit, arsenikkis, vismutglans, topas, turmalin, kvarts och glimmer. 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 det har en tendens att bindas till organiskt material

förekommer det också i kol. Vid vittring är tenn inte särskilt rörligt, men kan i sur miljö mobiliseras och binds då åter i sekundära Fe- och Al-föreningar och i lermineral.

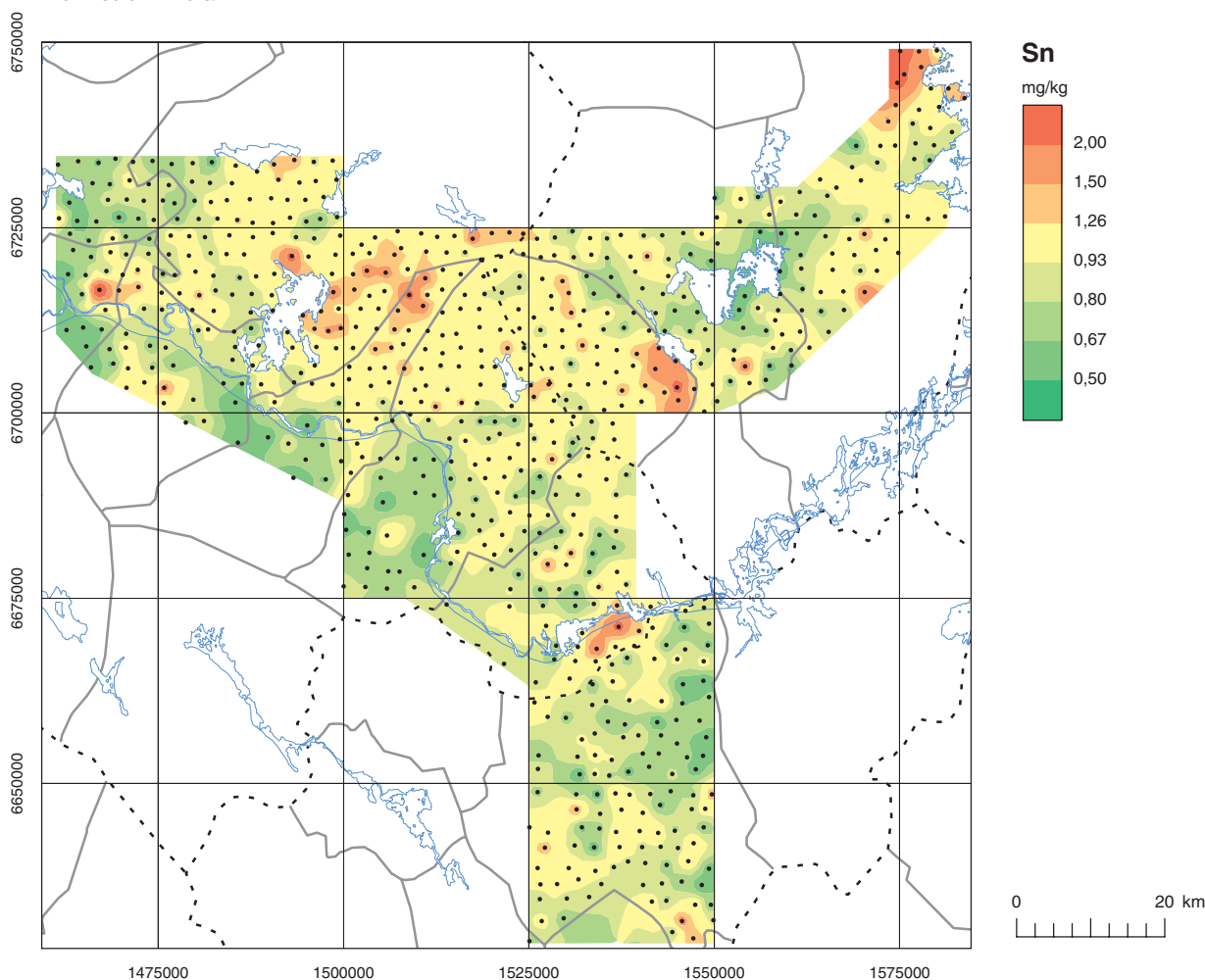
Metalliskt tenn är i princip inte giftigt. Inandning av tenn i hög koncentration under längre tid kan ge en godartad pneumokonios. Intag av större mängder tenn, tiondelar av gram, kan ge akut illamående och kräkningar. Organiska tennföreningar är däremot mycket giftiga. De orsakar centralnervös påverkan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

Medianhalten för kungsvattenlakbart tenn i undersökningsområdet är jämförbar med landet i övrigt. Det geokemiska mönstret för tenn i morän anknyter främst till sura magmatiska bergarter (graniter och vulkaniter). Tenn korrelerar med beryllium, torium, yttrium, aluminium, järn och titan. I faktoranalys ingår tenn i en faktor tillsammans med torium, yttrium, uran och lantan, men också i en svag faktor med wolfram och titan. Den förra visar sannolikt elementens närvaro i granitiskt bergartsmaterial.

Tenn (Sn)

Analysmetod: ICP/MS (A.R)

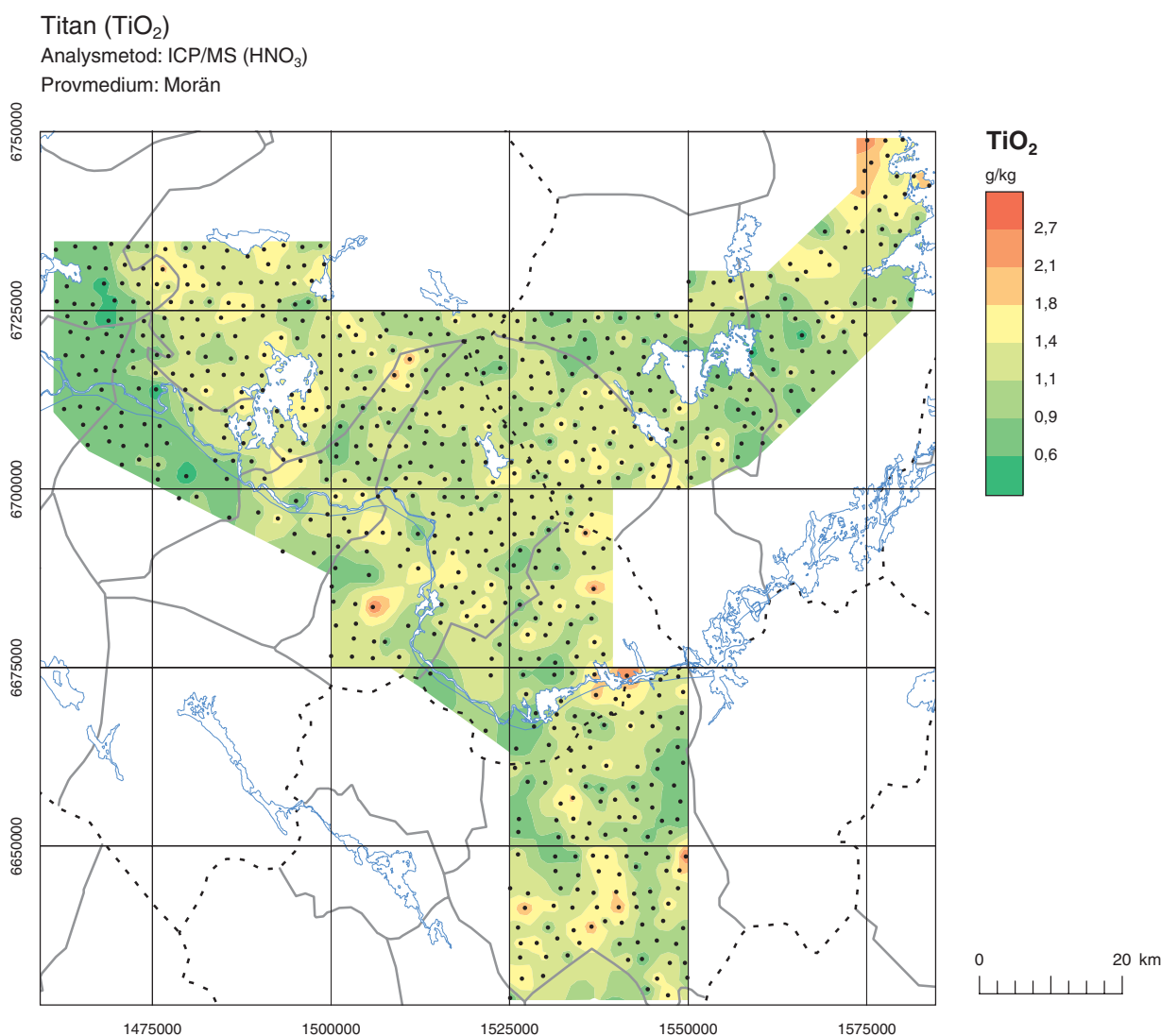
Provmedium: Morän



Titan (TiO₂)

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 samt i mörka, mafiska mineral såsom amfiboler och pyroxener. Ilmenit uppträder även som lameller i magnetit, vilket gör att titan även förekommer 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 resistenta mot vittring och i vittringsprocesser anses elementet svårslösligt oavsett förekomstform. På grund av den låga mobiliteten anrikas titan därför i markens övre partier vilket har utnyttjats för vittringsberäkningar. Studier har dock visat att metallen med starka syror kan lakas ramligen effektivt ur titanit, och om titan är biotitbundet lakas elementet till över 50 % (Snäll & Liljefors 2000). Rörligt titan binds dock lätt till lerpartiklar och ju högre lerhalten är desto högre är titaninnehållet (Reimann m.fl. 2003). Titan adsorberas också till Fe- och Mn-oxider.

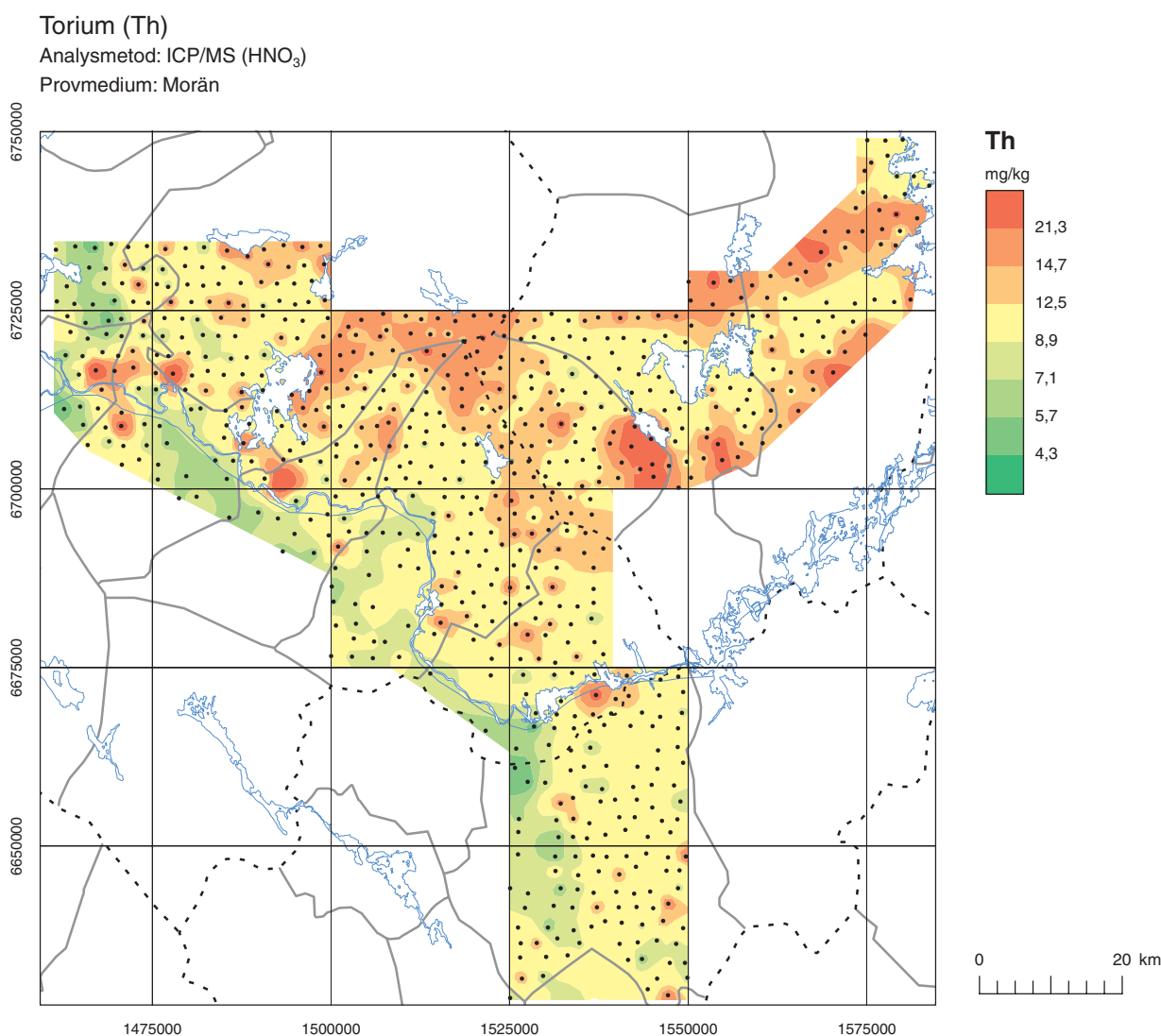
Titan antas ha en funktion för fotosyntesen och kvävefixeringen och kan ha en positiv effekt på vissa grödor. Någon direkt giftverkan är inte känd. Inhalation kan ge deponering i lungan, men inte lungfibros.



Medianvärdet för titan i kartområdets moräner är lägre än i landet i övrigt, det gäller både totalhalt titan och syralakbart halt. Kartbildens förhöjningar av syralakbart titan avspeglar elementets närvaro i lättlösliga mineral, sannolikt främst glimrar och mafiska mineral. Generellt har moränerna till sedimentådergnejser i nordost högre titaninnehåll än gnejsgraniter, som i sin tur har högre titaninnehåll än de yngre graniternas moräner i nordväst. Järnmalm med magnetit samt sulfidmineraliseringar är också tänkbara orsaker till titanförhöjningarna i moränen. Korrelationen mellan totalhalterna av titan och syralakbart titan är inte särskilt stark vilket visar att titan ingår i såväl svårslösliga som mer lättlösliga mineral i moränerna. En stark korrelation finns mellan totalhalterna av titan och vanadin m.fl., medan korrelationen mellan syralakbart titan är starkast med syralakbart järn, magnesium, aluminium, kalium m.fl. I faktoranalysen placerar sig titan i flera grupper; i en tillsammans med nickel, krom, magnesium, i en annan med barium, aluminium och zirkonium och i en tredje med wolfram, molybden och selen.

Torium (Th)

Torium är allmänt förekommande i jordskorpan, och medelhalten uppskattas till 12 g/ton. 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,



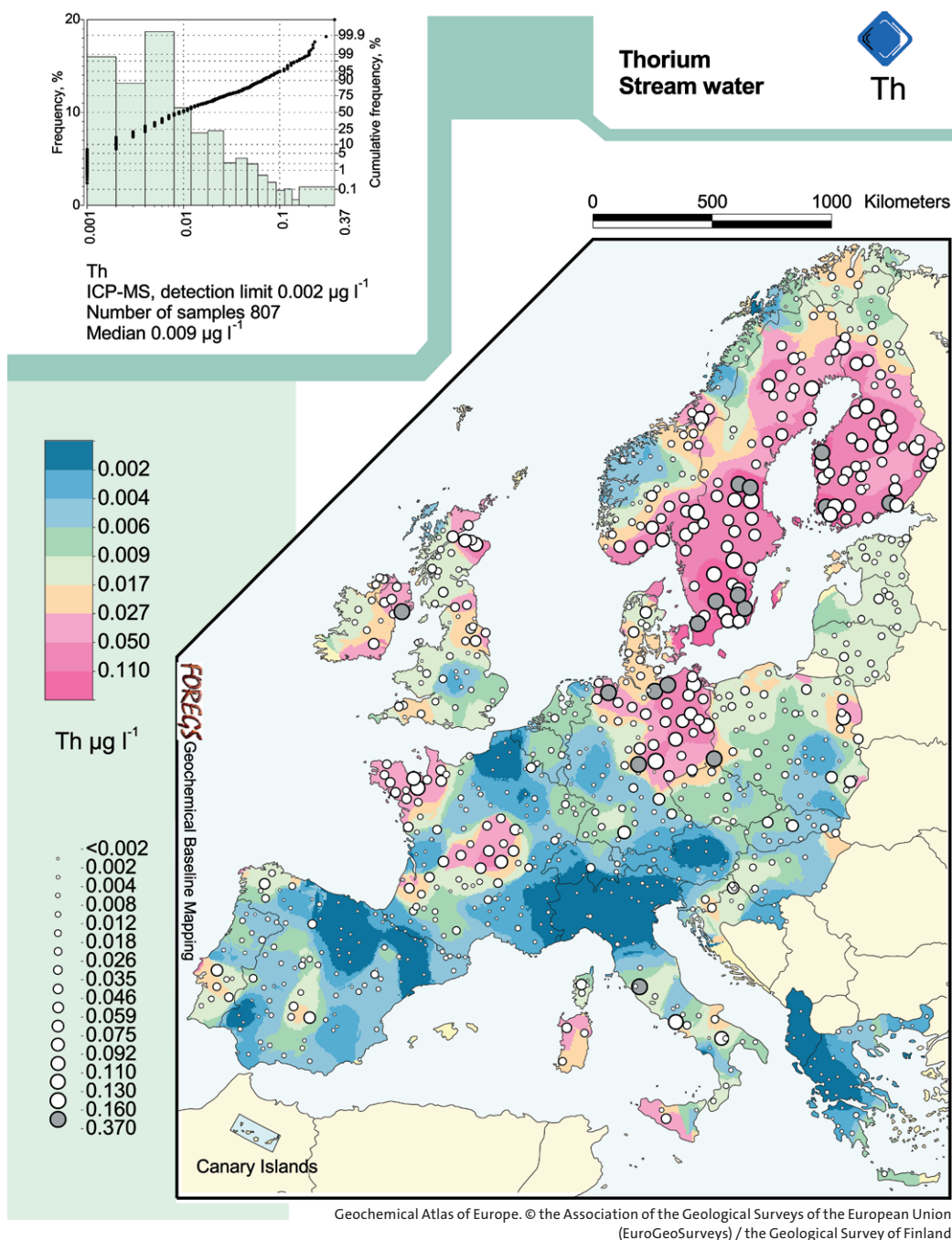


Fig. 13. Torium i medelstora (<100 km²) vattendrag. Filtreerat vatten från 51 platser i Sverige.

Thorium in stream water (<100 km²). Filtered water from 51 sites in Sweden. From Salminen et al. (2005).

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 basiter. Torium är allmänt associerat med kalium och uran och kan exempelvis uppträda i pegmatiter och graniter tillsammans med beryllium, litium, rubidium, uran, zirkonium, sällsynta jordartsmetaller m.fl. Torium finns, till skillnad från uran, även i sedimentgnejs (som har lerigt ursprung) på grund av toriums affinitet till lermineral. I områden med kraftig omvandling kan torium anrikas i uppsmälta partier av sedimentgnejsen.

Torium är svårlöstligt under alla förhållanden. Organiska syror ökar lösligheten, men torium faller

lätt ut som oxid eller fosfat. Löst torium binds normalt snabbt till lermineral, därmed är torium anriktat i skiffrar medan låga halter återfinns 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.

Toriumhalten i mark, berg och vatten kan mätas med kemiska analysmetoder och med geofysiska metoder (gammaspectrometer på berghäll och från flygplan). Metoderna korresponderar ganska väl i storskaligt perspektiv, i mindre skala kompletterar de varandra.

Innehållet av torium i kartområdets moräner är högre jämfört med landet i övrigt. Inslag i morän av gnejser, graniter och pegmatiter har gett förhöjningarna av torium i den norra delen av området till skillnad från i väster där inslaget av gabbroida bergarter inte gett moränen något nämnvärt torium-innehåll. Torium korrelerar med lantan, yttrium, uran och tenn vilket associerar till granitiska bergarter. Faktoranalysen placerar torium enbart i en faktor, tillsammans med ovan nämnda element.

FOREGS kartläggning visar att Sverige har lågt toriuminnehåll i marken. Däremot har vattendragen i Sverige och Finland högt innehåll av torium, se figur 13. Orsaken är humöst vatten med hög andel partiklar som torium binds till.

Uran (U)

Sveriges berggrund är rik på uran. Uran förekommer i de flesta bergarter, medelhalten i jordskorpan brukar anges till 2,7 g/ton. Alunskiffer och olika graniter är kända för sina relativt sett höga uranhalter. Uran uppträder i stort sett i samma bergarter som torium och båda elementen är radioaktiva. 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. Sura 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 de grundämnena som inte riktigt passar in i de vanligaste mineralen koncentrerade, t.ex. uran. Därmed är uran anriktat i graniter och pegmatiter. Uran kan koncentreras vid metamorfos och finns ibland anriktat i skarnbildningar och gnejser.

Uran binds till organiskt material och lerpartiklar och är därför koncentrerat i svarta skiffrar, som den svenska alunskiffern. Uran binds också till järnoxider och fosfater, men allra 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 lösliga komplex med karbonat.

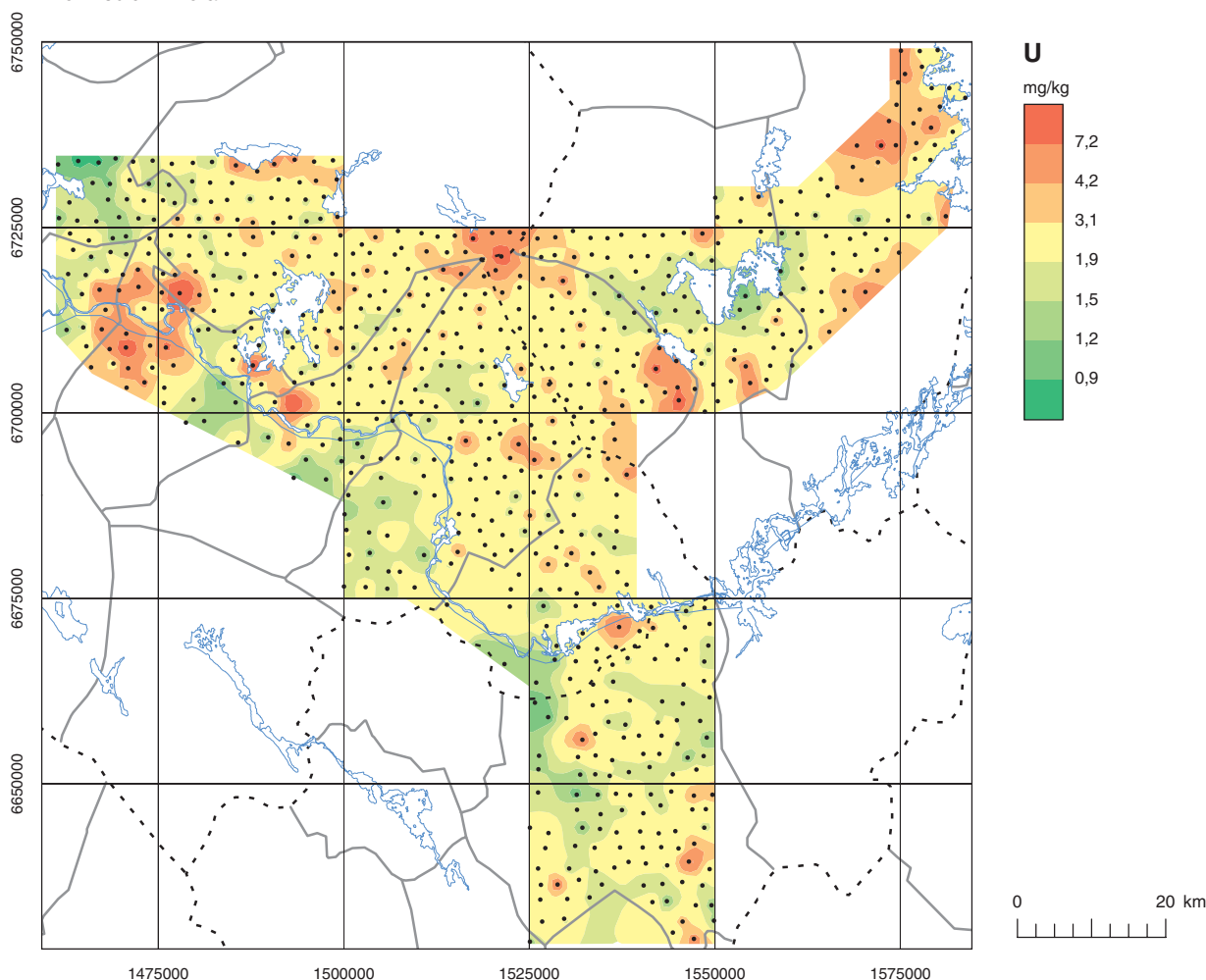
Uran i löslig form (som i vatten) tas upp i mag-tarmkanalen, distribueras till blodkroppar, njure och skelett samt utsöndras i urinen, och troligen också i hår. I skelettet är halveringstiden i storleksordningen år. Därför sker en långsiktig ackumulering och ett "steady state"-tillstånd når man först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

Under åren 1965–1969 (och i försöksverksamhet fram till 1981) anrikades svensk uran vid Ranstadsverket. Under ett tjugotal år bedrevs ingen prospektering för uranbrytning i Sverige, men har sedan 2005 återupptagits.

Uran (U)

Analysmetod: ICP/MS (HNO₃)

Provmedium: Morän



Uranhalten i mark, berg och vatten kan liksom torium och kalium mätas med kemiska analysmetoder och med geofysiska metoder (gammaspectrometer på berghäll och från flygplan). Metoderna korresponderar ganska väl i ett storskaligt perspektiv, i mindre skala kompletterar de varandra. Mätning direkt på berghäll och analys av moränprover är de metoder som enbart ger de naturliga uranhalterna. Med övriga metoder kan man också fånga upp antropogena effekter (Andersson m.fl. 2007). 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. Det senare tas dels från grundvattenrör, dels i form av dricksvatten från tappkran. Även naturliga källor i Sverige kommer att analyseras, främst inom miljöövervaknings program.

Medianhalten för syralakbart uran i morän i undersökningsområdet är något högre än medianhalten i riket. Uran är korrelerat med torium och svagt med beryllium, lantan, yttrium och tenn, och associationen antyder ett granitiskt–pegmatitiskt ursprung. Faktoranalysen placerar uran enbart i en faktor tillsammans med torium, lantan och yttrium.

Uraninnehållet i kartområdets moräner associeras till inslaget av granitiskt bergartsmaterial från undersökningsområdet och sannolikt också norr därom. Högstrålände graniter finns ca 15 km norr om Falun och 25 km norr om Gävle. Den allmänna förhöjningen av uran i morän väster och nordväst om Borlänge slår igenom i både markgeokemi och flygmätt strålning. Det högsta markgeokemiska värdet

har uppmätts rakt norr om Borlänge (32 mg/kg), där flygmätningen dock inte visar någon förhöjning. I delar av området nordväst om Borlänge markeras den yngre graniten med förhöjd uranhalt i moränen. Vid den enda mineraliseringen i området som redovisats som anrikad på uran, Digerbergsgruvan i pegmatitisk miljö i nordväst, syns däremot ingen förhöjning vare sig i markgeokemin eller i flygmätt uran. De nordliga delarna av granit-pegmatitkomplexet mellan Borlänge och Insjön markeras inte heller av några förhöjda halter av element vanligtvis associerade till granit. Små lokala förhöjningar av flygmätt uran vid sjön Hyn nordväst om Hofors finns i ett annars generellt lågstrålande område. Förhöjningarna bekräftas i den markgeokemiska kartbilden med en vidsträckt anomali. Mot sydost, vid sjön Ottnaren, återfinns uranförförd morän som anknyter till den lokala, yngre granitiska berggrunden här. Denna framkommer också i flygmätningen. Även söder om Dalälven kan mindre uranförförningar kopplas till granitiska massiv. I nordost finns en uranförförning i den markgeokemiska kartbilden, som även den reflekteras i flygdata. I Gävletrakten finns både äldre och yngre granitoider samt metavulkaniter. En liten förhöjning av flygmätt uran nordväst om dessa motsvaras av en mindre förekomst av yngre granit, som också kan ha lämnat spår i moränen.

Det finns en alternativ eller kompletterande förklaring till den uranförförda moränen öster om Gävleåsen. Isrörelseriktningen är här från nordost och det kan finnas rester av alunskiffer i moränen vars ursprung kan sökas i kambriska–ordoviciska sediment på havsbotten. Man har, efter kraftiga nordliga stormar, påträffat ilandkastade alunskifferbitar vid kusten öster om Skutskär.

Uraninnehållet i moränerna avslöjar att Sveriges unga berggrund på många håll är anrikad på uran. Kartbildens uranförförda områden bör ses som riskområden där det kan finnas uranhalt i grundvatten och dricksvatten som överstiger WHO:s provisoriska riktvärde på 15 µg/l i dricksvatten. Sett ur folkhälsoperspektivet är det den gräns som Socialstyrelsen och Livsmedelsverket också rekommenderar som maximal halt uran i dricksvatten. Påpekas kan dock 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.

Vanadin (V)

Vanadin förekommer med de högsta halterna i basiter 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 hittas i en del järnmalmer och förekommer också i komplexa organiska föreningar i råolja. Pyroxener, amfiboler, glimrar, magnetit och apatit kan alla bära vanadin. Vid vittring kan metallen bilda lösliga föreningar men kan också fällas ut och förekomma i svårslösliga former. Vanadin och järn kan lätt byta ut varandra i järnoxider och lermineral.

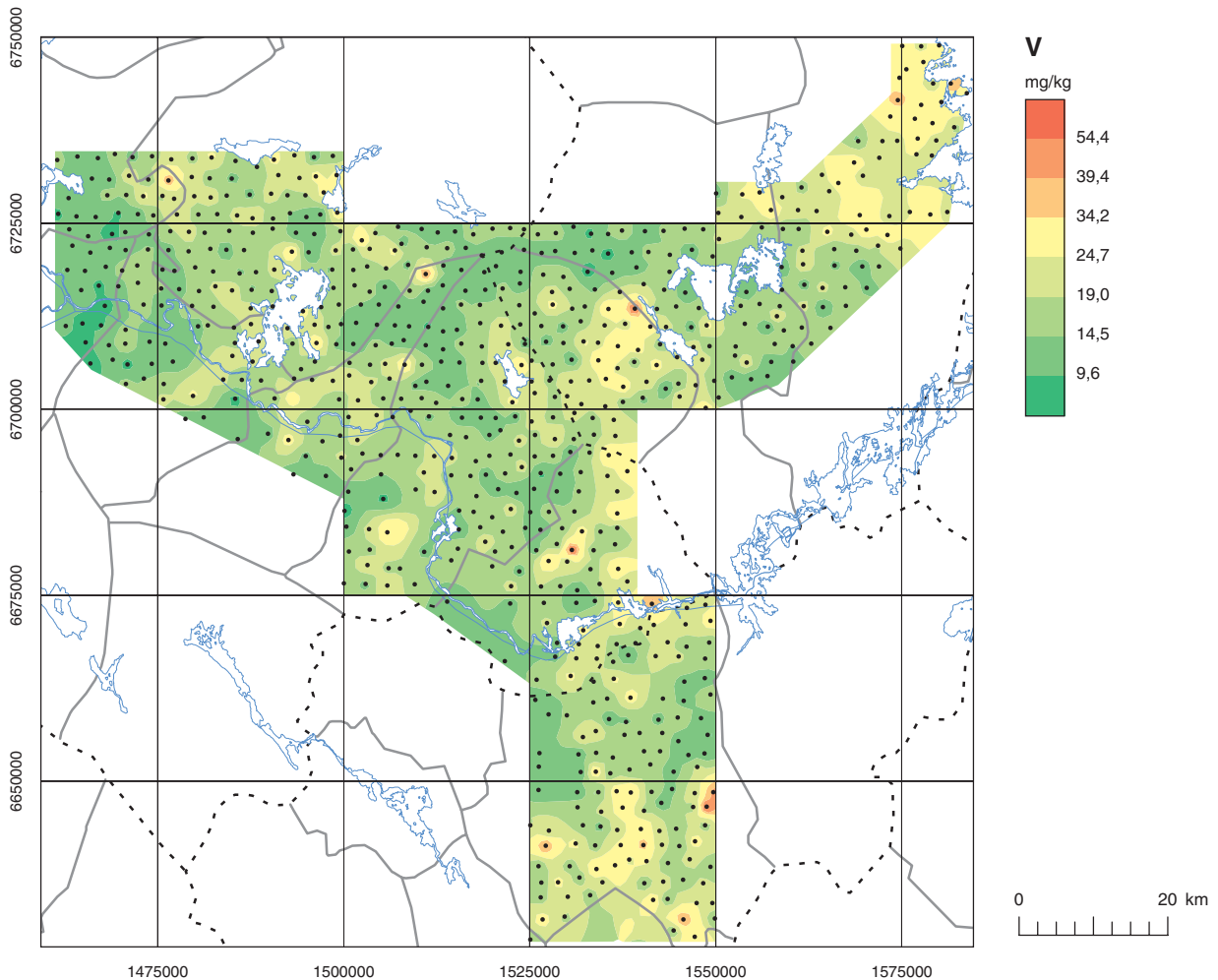
Vanadin påverkar många viktiga enzymsystem i kroppen, vilket vid överdosering innebär risk för fysiologisk obalans. Detta kan i sin tur resultera i en hälsomässig påverkan. Enligt den amerikanska Recommended Daily Allowances (1989) är det näringsmässiga behovet av vanadin mycket litet, om det överhuvudtaget existerar. Det finns inga klara bevis för att vanadin skulle vara essentiellt (livsnödvändigt) för människor. Det finns ett stort behov av ytterligare studier avseende hälsorisker med vanadinföreningar.

Medianvärde för totalhalt respektive syralakbart vanadin är något lägre än i landet i övrigt. Måttliga förhöjningar finns främst i moränområden med basiskt bergartsinslag, t.ex. i trakten Hofors–Torsåkers malmfält, där även vanadin i järnmalmer kan ha bidragit till moränförhöjningar. En förhöjning återfinns nordost om Sala. Här övertvårar en diabasgång området och vanadinförhöjningen kopplas även här till basiskt bergartsinslag. Lågt vanadininnehåll markerar granitiska områden och sura vulkaniter. Kartbildens vanadinmönster följer i stort sett mönstret för järn och de båda elementen är mycket starkt korrelerade med sina syralakbara komponenter. Ser man på totalhalter av vanadin är korrelation med kobolt i svårslösliga mineral starkast. Faktoranalys placerar vanadin i en faktor med

Vanadin (V)

Analysmetod: ICP/MS (HNO₃)

Provmedium: Morän



nickel, krom, magnesium, kobolt m.fl. Associationerna kopplar vanadin huvudsakligen till den mafiska elementgruppen.

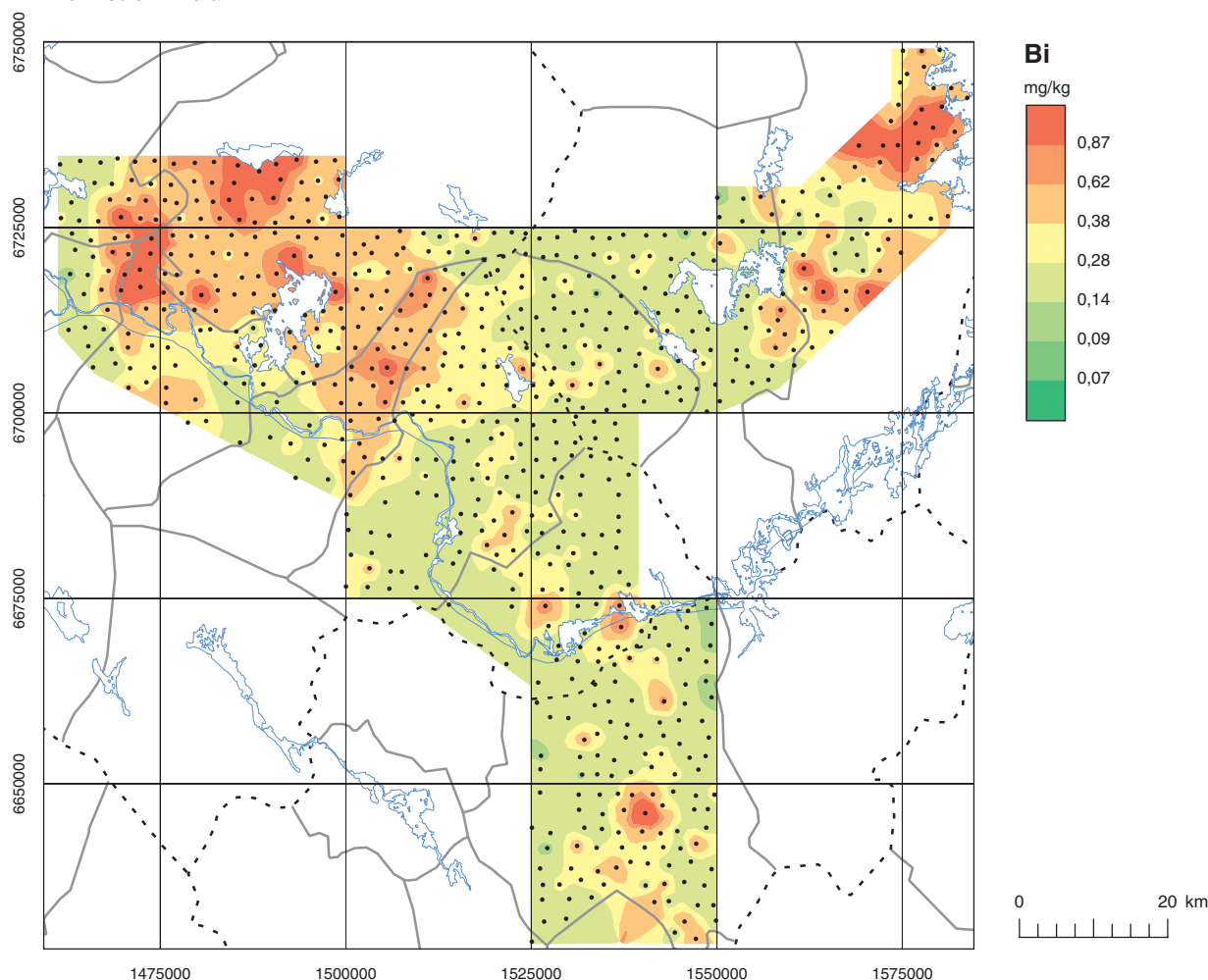
Vismut (Bi)

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 basiter. 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 vismutspat, $(\text{BiO})_2\text{CO}_3$. I mineraliseringar är vismutglans ofta associerat med magnetit, pyrit, kopparkis, zinkblände och blyglans. Vismut kan påträffas i tenn- och wolframmalmer och i hydrotermala gångar tillsammans med guld, silver, nickel, kobolt och bly. 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 (Bi)

Analysmetod: ICP/MS (A.R)

Provmedium: Morän



Vismut räknas inte som essentiell för människan. Inte heller anses den vara toxisk, även om det finns enstaka rapporter om motsatsen. 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.

Medianhalten av vismut är högre i kartområdets moräner än i landet i övrigt. I faktoranalysen placerar sig vismut i ett par faktorer, i den ena med bly, kadmium, mangan och zink, i den andra med molybden och selen. Att vismut är följeslagare till sulfidelementen framgår tydligt av kartbilden för vismut. Flertalet mineraliserade områden har förhöjningar i moräner av elementet. I Svärdsjö gruvor strax utanför kartgränsen i norr, har anrikningen varit så hög av vismut att man brutit malmen. Vismutmineral ingår också i Bisbergsfältets malmer öster om Säter. I området norr om Gävle kopplas moränens förhöjda vismuthalter till sedimentådergnejs.

I FOREGS geokemiska kartläggning av medelstora vattendrag i Europa, har Mellansverige och södra Norrlandskusten relativt sett höga vismuthalter, se figur 14. Slutsatsen har dragits att vismut är mobilt och finns i vatten och i biotillgänglig form (Salminen m.fl. 2005).

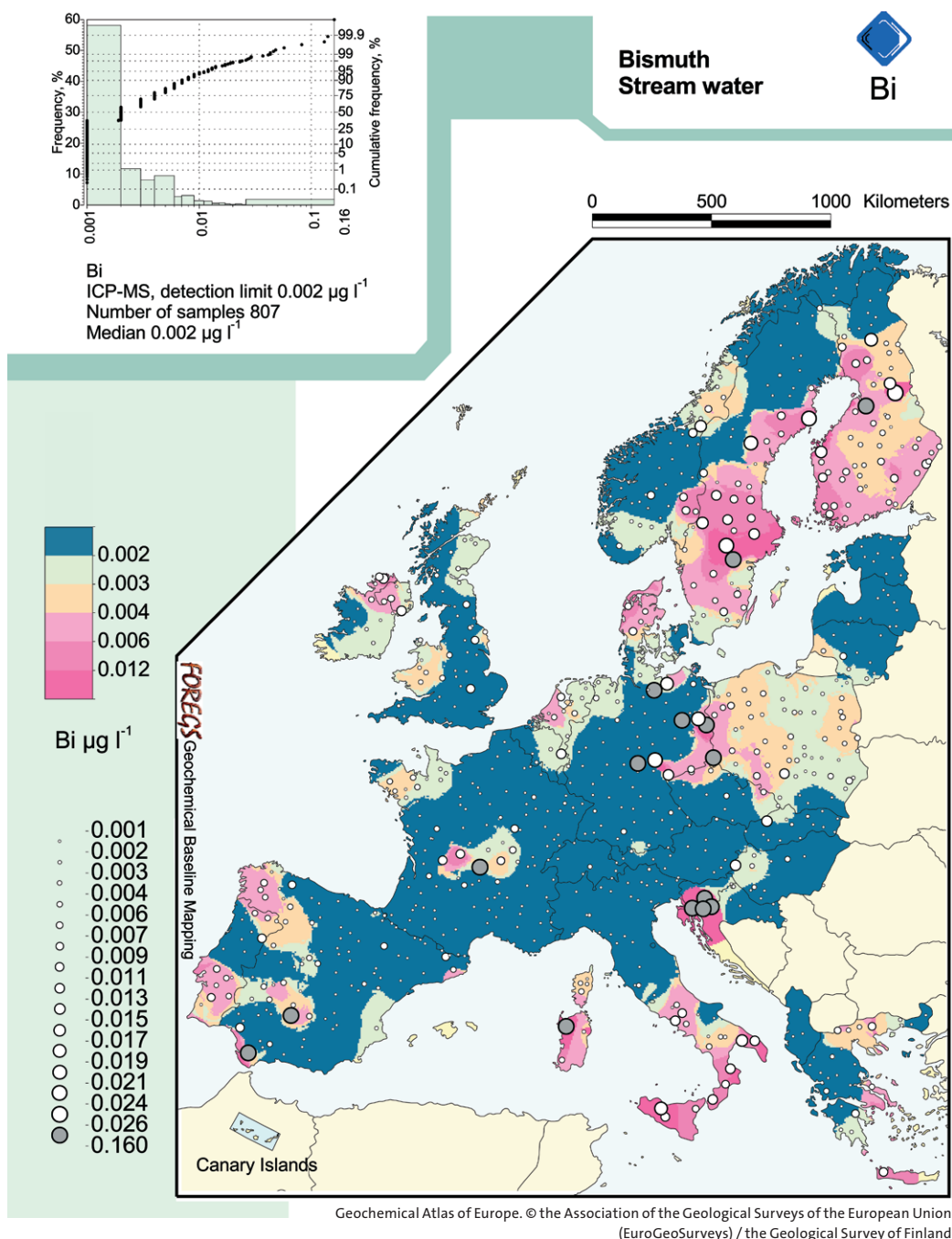


Fig. 14. Vismut i medelstora (<100 km²) vattendrag. Filtrerat vatten från 51 platser i Sverige.

Bismuth in stream water (<100 km²). Filtered water from 51 sites in Sweden. From Salminen et al. (2005).

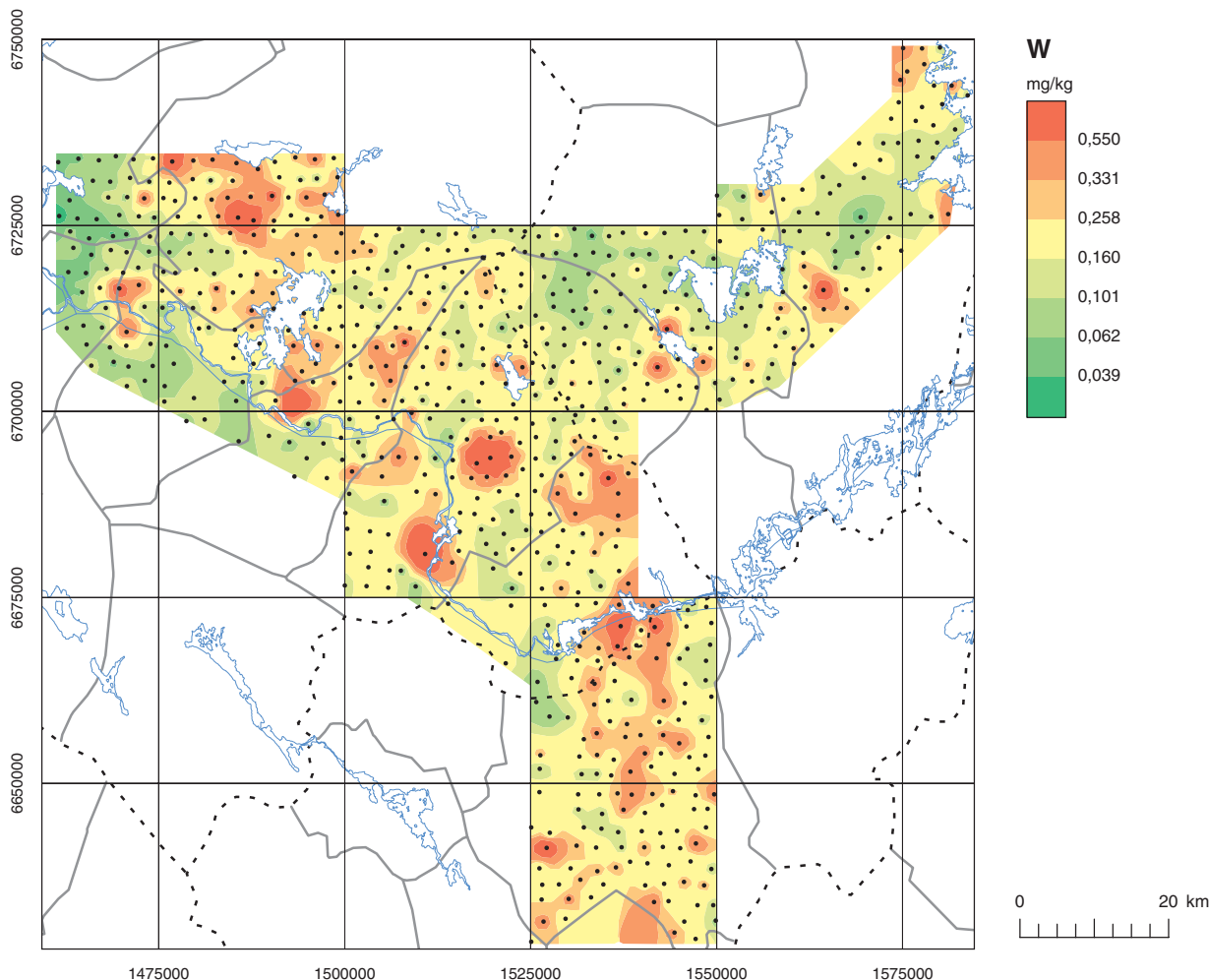
Wolfram (W)

Wolfram är ett relativt sällsynt grundämne i jordskorpan som förekommer med högsta halter i graniter och skifferar. Metallen finns inte i gedigen form i naturen utan förekommer huvudsakligen i förening med syre som wolframater i ett 20-tal mineral. De viktigaste är scheelit, CaWO_4 , och volframit, $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$. I volframit förekommer metallen i kvartsgångar och pegmatiter associerade till graniter. Mineralen 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,

Wolfram (W)

Analysmetod: ICP/MS (HNO₃)

Provmedium: Morän



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.

Medianhalt för syralakbart wolfram i kartområdets moräner är högre än i landet i övrigt. Det är i moränområden med äldre granitoider och vulkaniter som högst volframinnehåll återfinns, således i stort sett i hela kartområdet. Wolframmineral förekommer också som följeslagare till malmkroppar; sannolikt en förklaring till att förhöjningar i moränen ses i malmförande områden. Exempelvis är scheelit känt från Bispbergsfältet men också från Hällsjö gruva, söder om sjön Runn, där skarnjärnmalm brutits. Syralakbart wolfram saknar korrelationer i morän med andra element. Däremot finns det korrelation mellan totalhalter av wolfram, rubidium, barium, kalium, natrium och kisel.

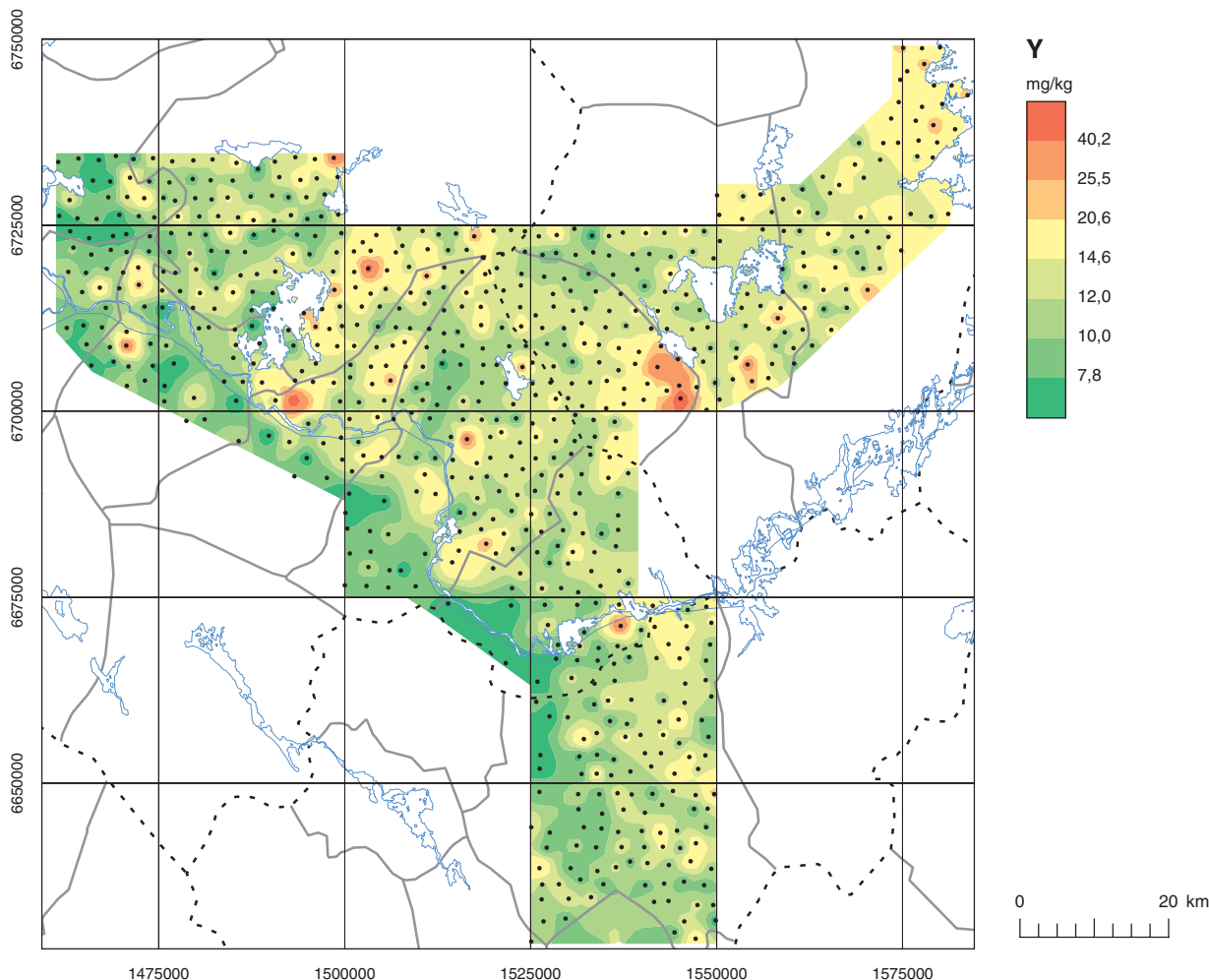
Yttrium (Y)

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 ytbergarter, såsom graniter och granodioriter, samt i skiffrar. Typiska yttriummineral är monazit,

Yttrium (Y)

Analysmetod: ICP/MS (HNO₃)

Provmedium: Morän



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 jordartsmetaller. Yttriummineral är svårvittrade, men då metallen även förekommer i andra typer av 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 som icke essentiellt för människan. Toxiciteten är låg, men inandning kan ge lungskador och även skada levern om det ackumuleras i kroppen.

Yttriumhalterna i moränen ligger på rikets genomsnittsnivå. En förhöjning sydost om Torsåker avspeglar inslaget av yngre graniter i detta moränområde. Det geokemiska mönstret för yttrium visar tydligt elementets frånvaro i moräner med basiskt bergartsinnehåll, t.ex. i Avestatrakten, väster om Hedemora och omkring Hofors. Dessa utgör lågområden för elementet. Korrelation finns med lantan, torium, tenn och beryllium. Samma elementassociation finns även i faktoranalysen.

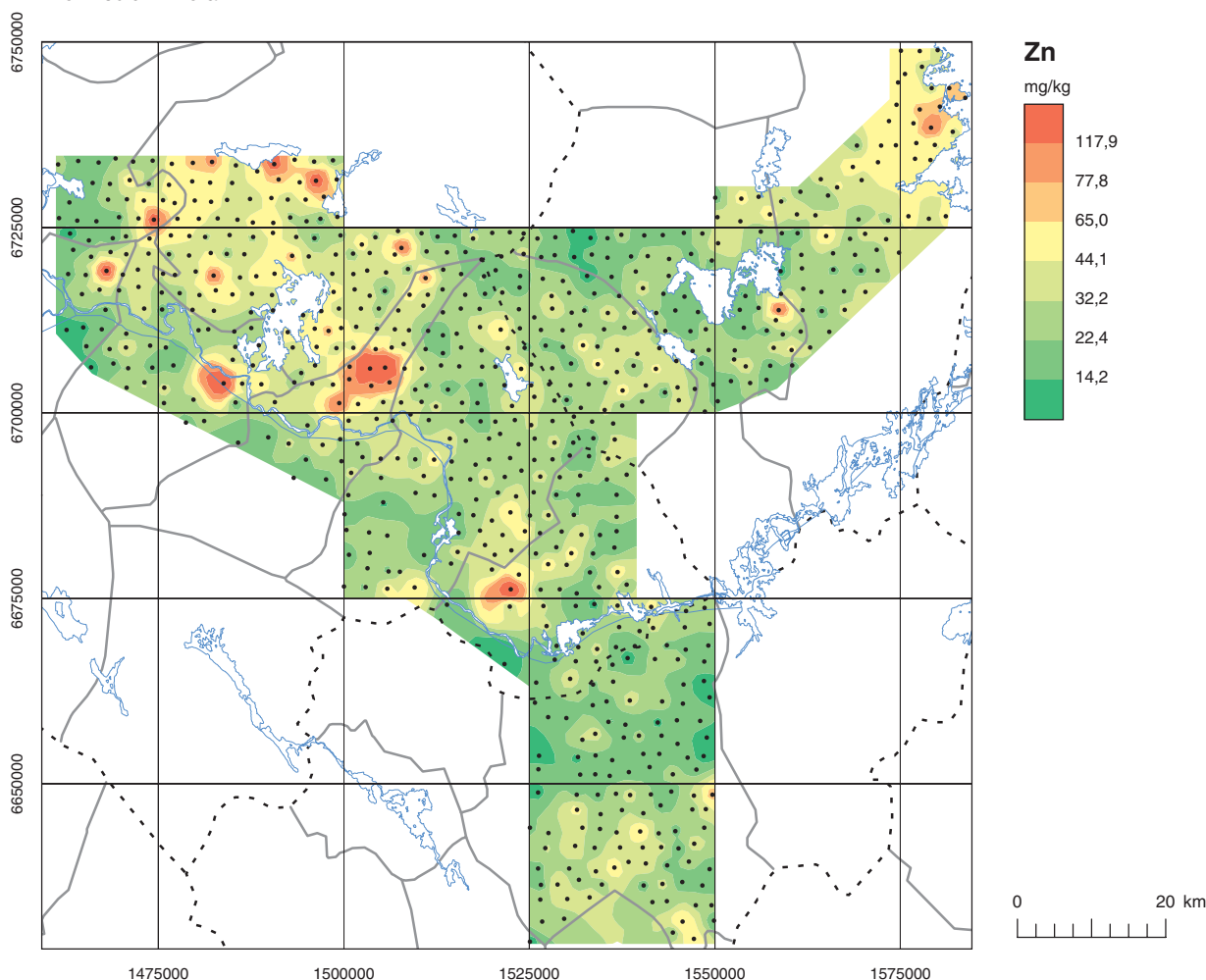
Zink (Zn)

Jordskorpan medelhalt av zink är tämligen låg. Den genomsnittliga vikthalten för zink hos magmatiska bergarter i den åtkomliga delen av jordskorpan är 45–80 g/ton. Hos de sedimentära bergarterna

Zink (Zn)

Analysmetod: ICP/MS (HNO₃)

Provmedium: Morän



är variationen större beroende på karaktären hos det ursprungliga sedimentet. I basiska bergarter och skiffrar återfinns oftast de högsta zinkhalterna. Metallen uppträder främst i olika silikater. Jonradien hos zink ligger tämligen nära järn (II) och magnesium (II). I viss utsträckning kan därför zink ersätta järn och magnesium i mineralens kristallgitter. Pyroxener, amfiboler, granater, magnetit och glimrar är mineral som kan vara zinkbärare och i biotit kan zinkhalterna bli mycket höga. Det viktigaste zinkmineralet är zinkblände eller sphalerit, ZnS. Zinkblände uppträder ofta i järnsulfider och tillsammans med följeslagaren blyglans och med andra sulfidmineral med koppar, kobolt och kvicksilver. Geokemiskt är zink associerat med kadmium. Vid vittring är zink lättlös i sur miljö, men kan bindas bl.a. till lermineral och organiska komplex.

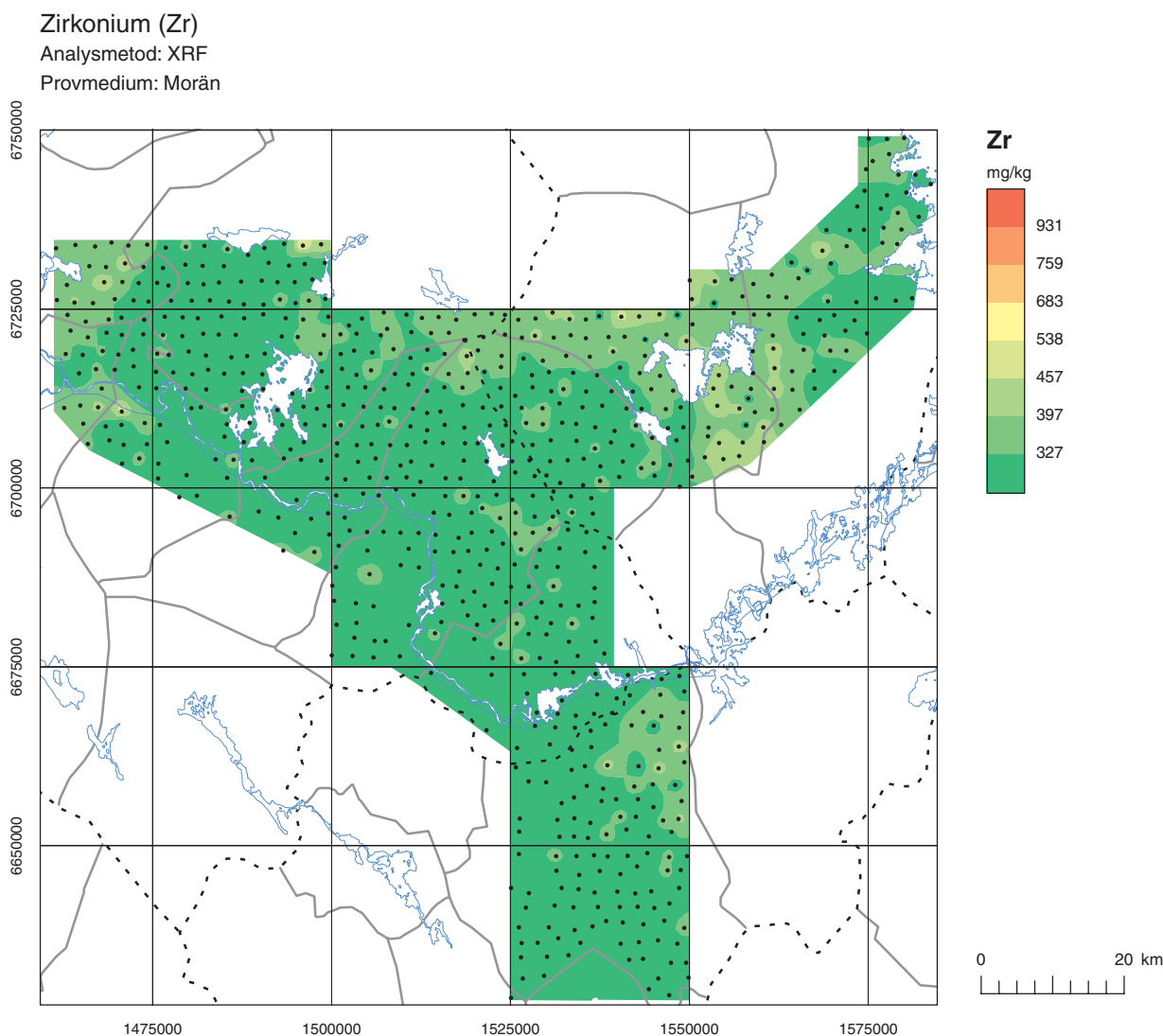
Nivån på zinkhalten i jordar beror i största utsträckning på det minerogena ursprungsmaterialet. Jordar som härstammar från basiska magmatiska bergarter håller höga zinkhalter medan jordar som kommer från mer kiselsyrarika jordar är påfallande zinkfattiga. Zink är i mycket små halter nödvändig för både 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 sårhäkning och håravfall.

Kartbilden över innehållet av syralakbar zink i morän ger ett distinkt mönster med tydliga förhöj-

ningar, bland annat tillsammans med bly och silver i anslutning till kända mineraliseringar i berggrunden. Zink är korrelerad med bly, kadmium, silver, järn och mangan och associationen avspeglar tydligt uppträdandet i mineraliserad miljö, liksom faktoranalysen där zink enbart förekommer i en faktor tillsammans med sulfidelementen. Fläckvisa anomalier i nordväst ansluter till kända sulfid-mineraliseringar söder om Ragsjön, vid Grönbo sydväst om Falun och vid Lövåsfältet öster om sjön Runn. Vid Lövåsfältet finns zinkhalter som överstiger gränsen för känslig markanvändning. Utöver dessa finns förhöjningar av zink nordost om Djursås, i Borlängetrakten, norr om Avesta samt norr om Gävle. Ingen av dessa kan direkt kopplas till känd mineraliserad miljö. Den med zink malmförande dolomiten vid Sala är inte särskilt framträdande på moränkartan jämfört med utbredningen av silver i moränen. Anledningen kan vara den zonering som finns i malmkroppen med silvermalmen närmast ytan och den zinkrika malmen mot djupet.

Zirkonium (Zr)

Zirkonium förekommer med måttlig medelhalt i jordskorpan men är vanligare än t.ex. nickel, zink och koppar. Elementet zirkonium förekommer främst i det vittringsresistenta mineralet zirkon, ZrSiO_4 , och är knutet till kiselrika bergarter som sandsten, graniter, granodioriter och vanligen också i pegmatiter. Eftersom zirkon är mycket vittringsbeständigt återfinns mineralet i den tyngsta fraktionen av många sand- och sedimentavlagringar. Om dessa bildar större ansamlingar, s.k. placers, kan de t.o.m.



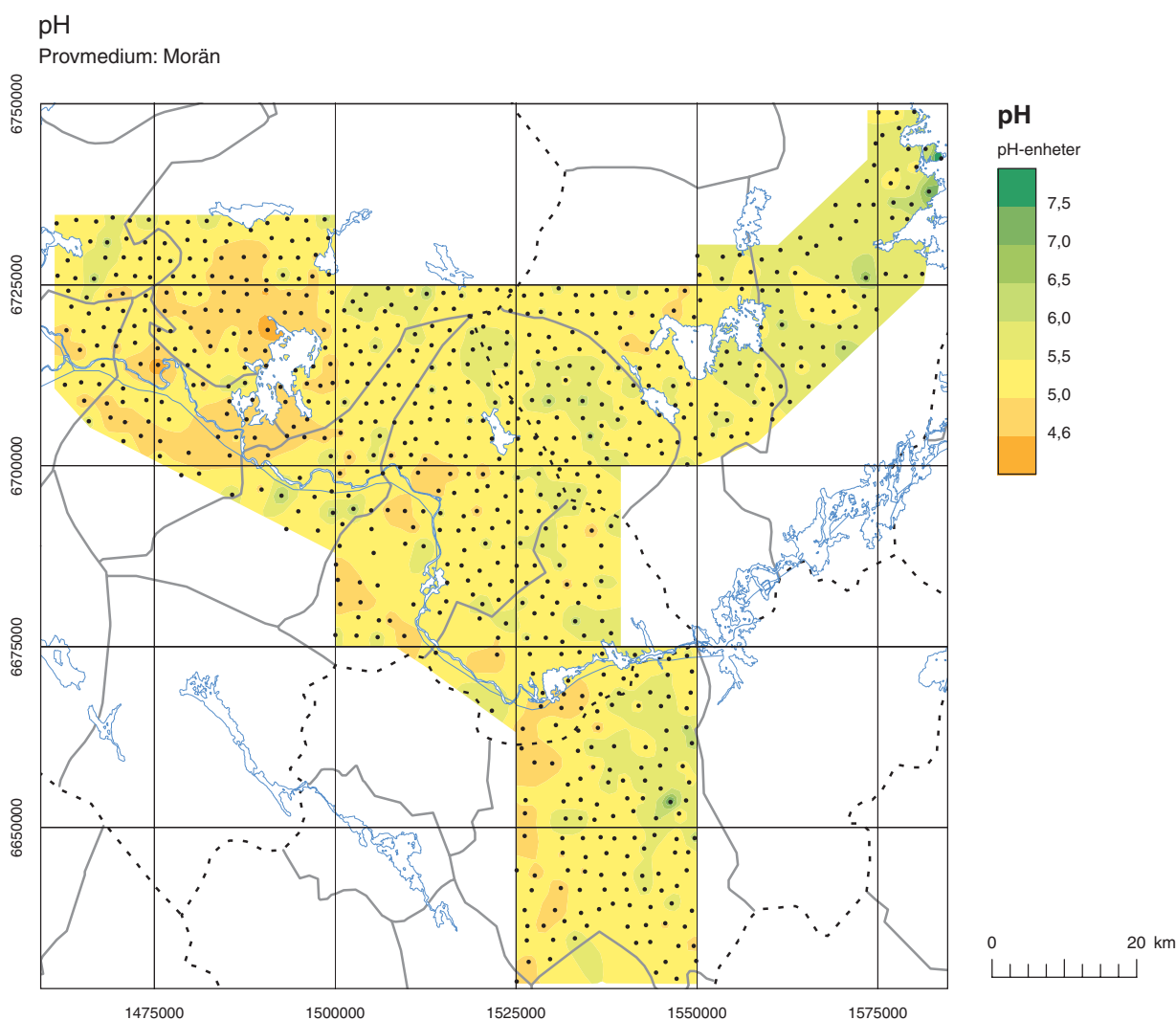
vara brytvärda. Zirkonium kan ingå i titanit och kan också påträffas i pyroxener, glimrar, rutil m.fl. Zirkonium uppträder även i omvandlade bergarter, exempelvis gnejser, där äldre led vanligtvis har högre halter av zirkonium än motsvarande yngre led. Basiska bergarter har normalt lågt innehåll av elementet. Zirkonium anrikas i omvandlingsprocesser såväl hos bergarter som vid kvartära vittringsprocesser i marken. Mobiliteten hos zirkonium är normalt mycket låg. Från järn-magnesiumsilikater är lösligheten större och löst zirkonium kan åter bindas till leror.

Zirkonium har ingen känd biologisk roll och anses inte heller nödvändig 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.

Totalhalterna är mycket låga i undersökningsområdets moräner och medianhalten är en tredjedel av zirkoniumhalten i övriga landet. Zirkonium korrelerar svagt endast med totalhalter för yttrium, något som troligen är en granitisk association. I faktoranalysen placerar sig zirkonium tillsammans med totalhalter av natrium, kisel, kalium, wolfram m.fl. som också påvisar tillhörighet med granitisk bergartsmiljö.

pH och försurningsresistens

Av områdets 708 pH-mätta moränprover har 3 prover pH-värden större än eller lika med 7,0 i fraktionen <0,063 mm. 73 % av moränlokalerna har pH-värden mellan 5 och 6, och medianvärdet är 5,3 (för



övriga landet 5,4). I övrigt varierar pH-värdena mellan 4,2 och 8,6. Högst pH är uppmätt vid kusten nordost om Gävle, kalciumhalten är hög och försurningsresistensen 100 % vilket visar att karbonatbuffring råder. Ett stort lågområde för pH är däremot malmtrakterna runt Falun och sjön Runn. Efter 1000 års gruvverksamhet och svavelsyraframställning har marken försurats avklingande upp till 12 km nordväst respektive sydväst från Falu koppargruva. Utsläpp till luften av svaveldioxid (SO₂) och metaller har ägt rum allt sedan 1200-talet. Utsläppen var som högst under 1600- och 1700-talen och uppskattningsvis släpptes 40 000 ton SO₂ per år ut under denna högproduktiva tid (Ek m.fl. 2001).

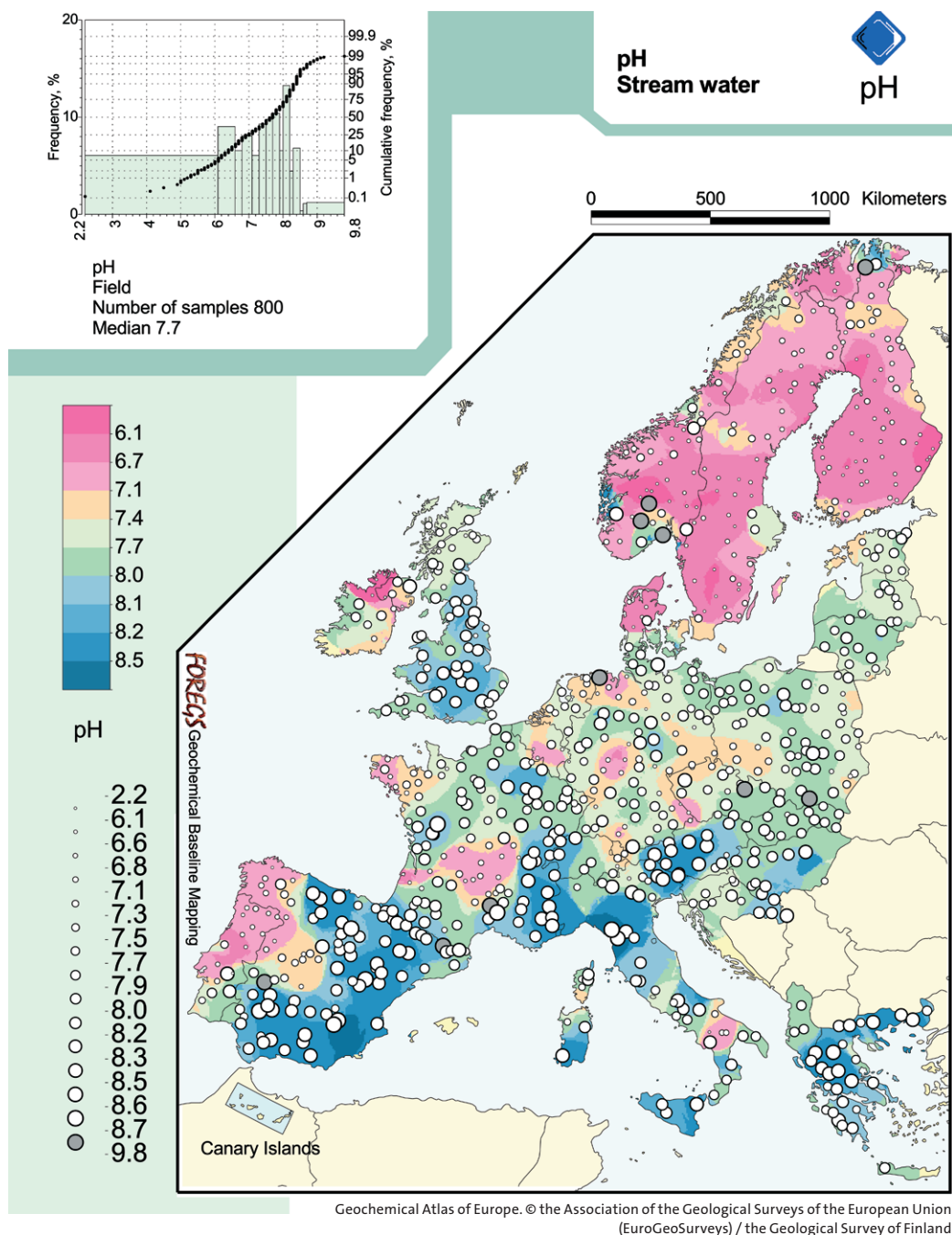


Fig. 15. pH i medelstora (<100 km²) vattendrag. Filtrerat vatten från 51 platser i Sverige.
pH in stream water (<100 km²). Filtered water from 51 sites in Sweden. From Salminen et al. (2005).

Högre pH-värden återfinns i nordost, i Torsåkerstrakten och nordväst om Hofors. Det är inslag av basiskt bergartsinnehåll i moränen som ger gynnsammare pH-status. Samma anledning förklarar områdena söder om Dalälven och ner mot Salatrakten. Korrelation finns mellan pH och kalcium och antagonistiskt med svavel.

Försurningsresistens med 100 % finns endast i en lokal och är uteslutande kopplat till lättlöslig kalk, se ovan. För att beräkna försurningsresistens används pH-värden från surgjorda prover. I undersökningsområdet finns korrelation mellan pH (efter syrabehandling) och lakbarheten för aluminium. Om kalciumkarbonat inte förekommer är det bland annat närvaro av lättlösliga aluminiummineral som dominerar vid markens reaktion på vätejoner. Som bieffekt löses dock aluminiumjoner ut till vattensystemen.

Berggrundens låga innehåll av buffringsbenägna mineral är huvudorsak till lågt pH i naturliga, rinnande vatten i Sverige. I ett europeiskt perspektiv har i stort sett hela Skandinavien låga pH-värden i vattendragen. I FOREGS kartläggning finns några områden med högre pH i Sverige. De återfinns där berggrund eller jord har inslag av yngre kalkstenar, som i Mälardalen och Jämtland, vilket återspeglas på vattenkartan, figur 15.

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, more than 207 000 square kilometres have been covered with systematic sampling in a wide net where one sample represents six square kilometres (equals 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 planning purposes, environmental research, agriculture, forestry, veterinary and human medical research (medical geology) as well as mineral exploration. 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) concentration 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 sandy or sandy-silty till. Clays and to a minor extent silt and coarse sediments are also included in the sampling programme. A general sampling net is plotted in advance on topographic maps with maps of Quaternary geology as support, whereas the final location of the sample site is determined in the field. The samples are from hand-dug pits and collected 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 contents. Partial leaching in Aqua Regia and nitric acid (7M HNO₃) combined with ICP-MS is also used. 16% of the till-samples and all clays and other sediments are analysed on the <2 mm fraction, and only by means of partial leach and IPC-MS. Approximate calcium carbonate contents are determined by using hydrochloric acid. pH is determined in a suspended solution based on a two gram sample (<0.063 mm) in 10 ml distilled water. Additional details regarding the geochemical mapping programmes, including biogeochemical mapping at SGU, are available from Lax & Selinus (2005).

The survey area of the present investigation covers a region in the midpart of Sweden. The area encompasses approximately 5 300 square kilometres including parts of three counties: the County of Dalarna, the County of Gävleborg and the County of Västmanland. The bedrock is dominated by metamorphosed granites and leptytes with subordinate rocks of mafic or – to a smaller extent – carbonatic composition.

A combination of glacial drift (till) and fine-grained sediments cover most of the investigated area.

Where there is a lack of till, additional samples of other Quaternary deposits (such as clays and silt) were collected. The direction of ice flow usually displays a movement from the NNW in the north-western part of area, from NNE in the north-eastern part and from north in the southern part. Most of the tills in the area are interpreted as fairly local, with transport distances up to some kilometres. In some areas, however, it is possible that transport distances may be larger. That, as well as occasionally complex till stratigraphy, are naturally complicating factors when trying to interpret the influence of local bedrock on till geochemistry.

The regional pattern of elements in the studied area shows features from underlying bedrock, including mineralizations of sulfides. Iron-ores with high concentrations of magnetite and hematite are also found in the counties. The mineralizations often occur in recrystallized rocks of volcanic origin, sometimes in association with skarn-rich limestones. Geochemical till anomalies reflect mineralizations, sometimes as multielement anomalies with e.g. silver, lead, zink, bismuth or copper. A small mineralization with nickel is situated in the south, some ten kilometres west of Sala. Weak or small mineralizations with pyrite, galena, silver, sphalerite and bismuth minerals as well as copper minerals are common in the area. Well known mining areas are the Falun mine situated in north-west, the Sala silvermine in the south and the Garpenberg and Hofors-Torsåker areas in the centre of the study area.

Centuries of mining have at some places caused environmental problems. For example the copper production in Falun emitted sulphur dioxide (SO₂) and metals to the air for at least 1 000 years. The big peak of emissions was in the seventeenth century when the copper production was extensive. This has acidified the surroundings of Falun and the effects can be seen in the map of pH. The tills in this investigation do not display high values of metals that are of anthropogenic origin, although this has previously been found in the neighbouring areas of Falun (Ek et al. 2001). This discrepancy is thought to be an effect of sampling at larger depth in this investigation.

Some areas, even beyond mining regions, are regarded as risk areas for negative health effects. Tills sometimes contain high levels of elements that, if mobilized, can affect water systems. In the investigated area, high contents of arsenic, bismuth, lead, cadmium, nickel, uranium and tungsten can be found. The contents of arsenic, lead, cadmium, chromium and nickel are higher than estimated guideline values for soils determined by the Swedish Environmental Protection Agency (Naturvårdsverket 1997). Younger granites and pegmatites are often radioactive, containing high concentrations of thorium and uranium. Tills containing such bedrock composites have high values of uranium. The map of uranium can therefore be used as a pathfinder to locate areas with increased risk for drinking water with uranium contents higher than the recommended value of 15 µg/l. An anomalous area with arsenic can also be used for risk assessment for similar reasons. The guideline value for arsenic in drinking water is 10 µg/l. Higher values have been located in areas with naturally originated arsenic in tills, for example in a region from Västerås heading east to Enköping.

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., Jelinek, C., Ohlsson, S-Å. & Selinus, O., 2007: Geokemiska kartan. Markgeokemi. Metaller i morän och andra sediment i Östra Mälardalen med Stockholm. *Sveriges geologiska undersökning K 77*, 157 s.
- Berglund, M., Ek, B.M., Thunholm, B. & Lax, K., 2005: Nationell kartläggning av arsenikhalt i brunnsvatten samt hälsoriskbedömning. *Resultatrapport till Naturvårdsverket 2005-06-10. Kontrakt nr 215049*.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- Kurtio, P., Auvinen, A., Salonen, L., Saha, H., Pekkanen, J., Mäkeläinen, I., Väisänen, S., Penttilä, I. & Komulainen, H., 2002: Renal effects of uranium in drinking water. *Environmental Health Perspectives*, 110:4, 337–342.
- Lax, K. & Selinus, O., 2005: Geochemical mapping of the Geological Survey of Sweden. *Geochemistry. Exploration, Environment, Analysis (November 2005)*, 5 (4), 337–346.
- Ljung, K., 2006: Metals in urban playground soils. *Doctoral Thesis No. 2006:81, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, SLU*.
- Länsstyrelsen i Dalarnas län, 2005: Metallhalter i dricksvatten från borrade brunnar i Dalarnas län. *Länsstyrelsen i Dalarnas län rapport 2005:19*, 21 s.
- Naturvårdsverket, 1999: Bedömningsgrunder för förorenade områden. *Naturvårdsverket Rapport 4918*, 150 s.
- Naturvårdsverket, 2008: Tabell över generella riktvärden för förorenad mark. Ersätter tidigare utgivna. <http://www.naturvardsverket.se>. Publicerat 24 oktober.
- 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.
- Salminen, R., Batista, M.J., Bidovec, M., Demetriades, A., De Vivo, B., De Vos, W., Duris, B., Gilucis, A., Gregorauskiene, V., Halamic, J., Heitzmann, P., Lima, A., Jordan, G., Klaver, G., Klein, P., Lis, J., Locutura, J., Marsina, K., Mazreku, A., O'Connor, P.J., Olsson, S.-Å., Ottesen, R.-T., Petersell, V., Plant, J.A., Reeder, S., Salpeteur, I., Sandström, H., Siewers, U., Steenfelt, A. & Tarvainen, T., 2005: *Geochemical atlas of Europe Part I. Geological Survey of Finland*, 526 s.
- 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.
- Statens livsmedelsverk, 2005: föreskrifter om ändring i Livsmedelsverkets föreskrifter (SLVFS 2001:30) om dricksvatten. *Livsmedelsverket författningssamling 2005:10*, 35 s.
- Sveriges geologiska undersökning, 2005: Mineralmarknaden, Tema: Arsenik. *Sveriges geologiska undersökning Periodisk publikation 2005:4*, 79 s.
- Sveriges Nationalatlas, 1994: *Berg och Jord*. SNA, 208 s.
- WHO 2004: *Guidelines for drinking-water quality, Third edition, Vol 1., Recommendations*.



Sveriges geologiska undersökning

Box 670

751 28 Uppsala

Tel: 018-17 90 00

Fax: 018-17 93 70

www.sgu.se

Uppsala 2009

ISSN 1652-8336

ISBN 978-91-7158-884-5

Tryck: Elanders Sverige AB