

Kunskapshöjande åtgärd för att motverka skapandet av nya förorenade områden

Underlagsdata för tillsyns- vägledning i områden med arsenikanrik berggrund



Jenny Andersson, Paul Evins, Per Nysten, Mattias Göransson,
Iwona Klonowska & Daniel Buczko

SGU-rapport 2025:04
Diarie-nr: 311-2472/2022

www.sgu.se

Författare: Jenny Andersson, Paul Evins, Per Nysten,
Mattias Göransson, Iwona Klonowska och Daniel Buczko
Granskad av: Paula Lindgren
Ansvarig enhetschef: Ola Hallberg
Redaktör: Johan Sporrang

Omslagsbild: Projektgruppen på fältbesök i bergtäkt vid Ryssjön,
en knapp mil nordväst om Nykvarn. Från vänster i bild: Daniel Buczko,
Uppsala universitet, Paul Evins, WSP, Emelie Bender, AFRY,
Mattias Göransson, SGU, Cecilia Jelinek, SGU, Iwona Klonowska,
Uppsala universitet och Per Nysten, SGU.
Fotograf: Jenny Andersson

April 2025

Sveriges geologiska undersökning

Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-17 90 00
e-post: sgu@sgu.se
www.sgu.se

Innehåll

Bakgrund.....	4
Riktvärde för berggrundens arsenikhalter	6
Provtagning och analys.....	8
Data.....	9
Mikroskoppreparat och referensprov.....	9
Resultat.....	10
Resultat från område I: Mariefred–Södertälje.....	10
Förekomst av arsenikmineral.....	15
Sammanfattning av resultat från Mariefred–Södertäljeområdet.....	16
Slutsats Mariefred–Södertäljeområdet.....	16
Resultat område II: Arlanda–Rosersberg	17
Totalhalter av arsenik.....	19
Förekomst av arsenikmineral.....	22
Slutsats Arlanda–Rosersbergsområdet.....	23
Referensmaterial.....	24
Rekommendationer för fortsatta insatser för kartläggning och riskbedömning av berggrund med naturligt höga bakgrundshalter av arsenik.....	25
Referenser.....	28

Bakgrund

Delar av den svenska berggrunden innehåller naturligt höga halter av arsenik. Arsenikrika bergarter uppträder företrädesvis i Skellefteås och Bergslagens malmdistrikt och i alunskiffer (Skåne, plåtåbergen i Västergötland och fjällranden). Arsenikanrikade bergarter förekommer även i icke mineraliserad berggrund i Mälardalen och Västernorrland (Hildebrand m.fl. 2009). Det finns en tydlig koppling mellan arsenikanrikad berggrund och arsenikkontamination av grundvatten (fig. 1). Avsaknad av ekonomiska intressen i den icke mineraliserade berggrunden gör att den arsenikanrikade berggrunden i dessa delar av Sverige är dåligt känd.

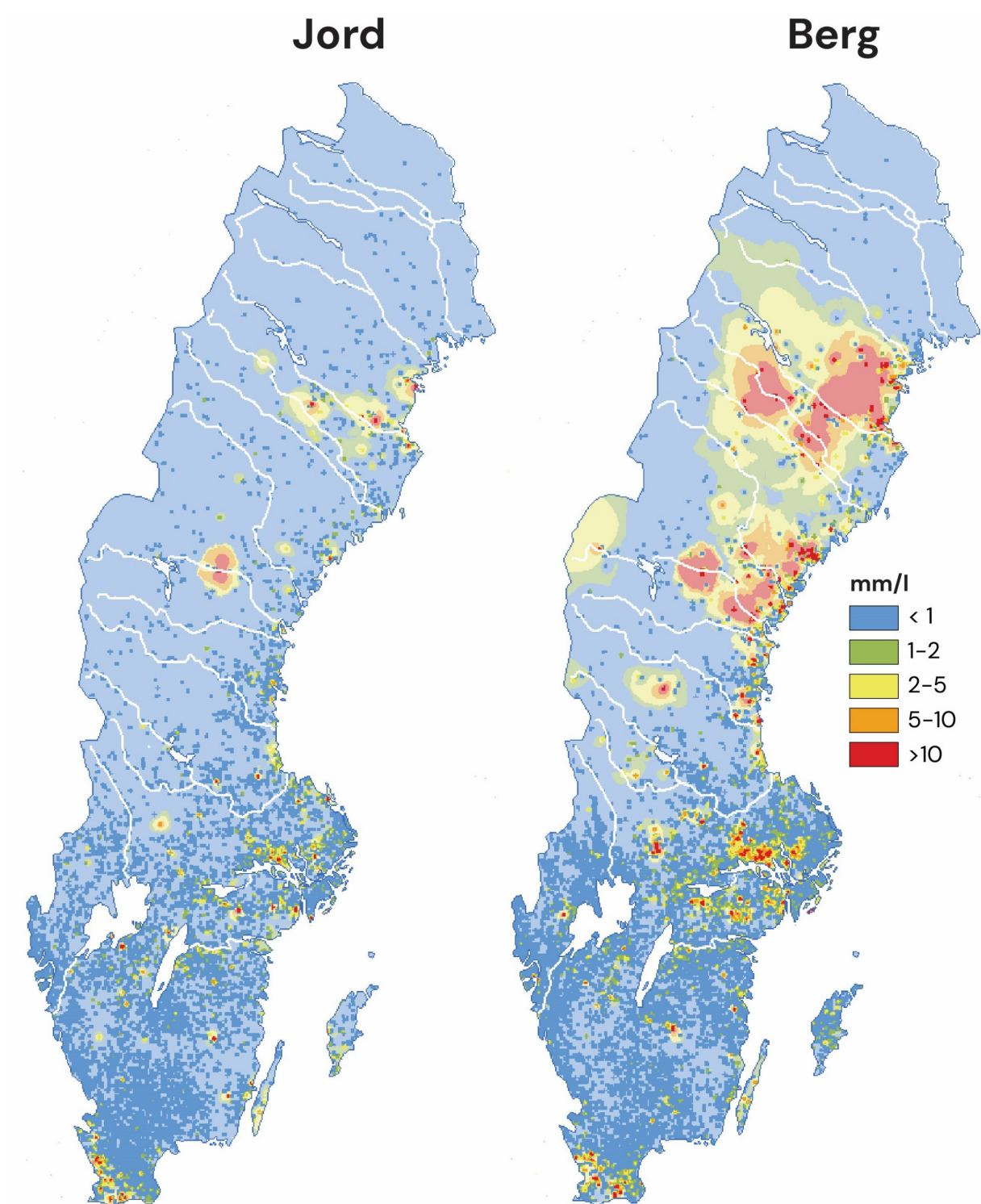
Bygg- och anläggningsverksamhet och ballastproduktion i arsenikrik berggrund kan medföra risk för människors hälsa och miljön genom kontamination av yt- och grundvatten. Sådan verksamhet kan även skapa nya förorenade områden vid införsel av arsenikrik bergmaterial i områden med låga bakgrundshalter av arsenik. Hantering av bergmaterialet kan även medföra problem vid inandning (damning) och vid oralt intag (små barn). Omfattande pumpning vid bygg- och anläggningsarbeten, dricksvattenuttag eller klimatförändringar kan också påverka arsenikens rörlighet i miljön.

För att förhindra skapandet av nya förorenade områden krävs kunskap om bergmaterialens naturliga arsenikhalter, arsenikmineralogi och lakbarhet. Avsaknad av sådan kunskap i icke mineraliserade befolkningstäta och bygg- och anläggningsintensiva delar av Mälardalen har försvårat tillsynsvägledning och hindrat framtagande av praktiska handläggarstöd. Sveriges geologiska undersökning (SGU) har inte resurser att göra de specialiserade analysarbeten och den riktade detaljkartläggning som krävs för att ta fram de efterfrågade underlagen.

Undersökningar av miljö- och hälsofarliga ämnen i delar av Arlanda-Rosersbergsområdet påbörjades av SGU under 2022 i ett forskningsprojekt finansierat av Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo projekt nr 438). Forskningsprojektet gav oväntade resultat som indikerade stor utbredning av höga halter arsenik i berggrunden och en annan arsenikmineralogi än vad som är känt för urberget. Resultaten visade på ett akut behov av riktade detaljundersökningar och SGU sökte finansiering från Naturvårdsverket för att under 2023 ta fram data för hur och var arsenik uppträder i bergmaterial i bygg- och anläggningsintensiva områden omkring Arlanda-Rosersberg och Mariefred-Södertälje (fig. 2). I båda undersökningsområdena har det uppstått akuta problem med hantering av arsenikrika bergmaterial samtidigt som underlagsdata för tillsynsvägledning saknas.

Den 14 november 2022 beviljades ett bidrag om 4 626 200 kronor till SGU för genomförande av projektet *”Framtagande av underlagsdata för tillsynsvägledning i områden med naturligt höga halter av arsenik i berggrunden”* (Naturvårdsverkets ärendenummer: NV-08911-22, SGU diarienummer: 311–2472/2022). Projektet hade en total budget om 4 816 000 kr varav lönekostnader på 4 029 000 kr och driftskostnader på 597 000 kr. SGU har finansierat 190 000 kr av projektets lönekostnader för tillgängliggörande av data och material genom SGU:s befintliga infrastruktur.

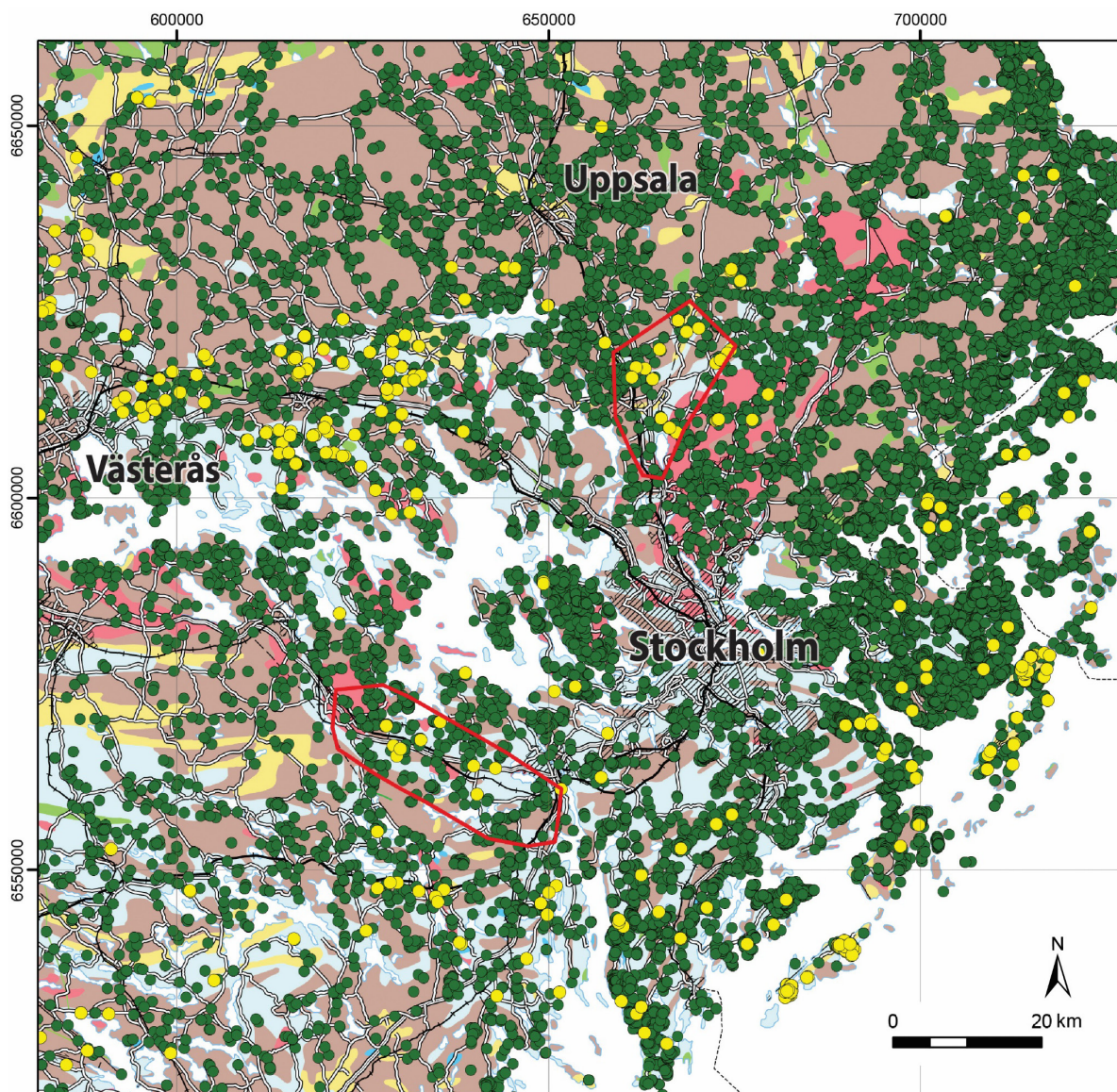
Projektet har bedrivits mellan 2023-01-01 och 2023-12-31. Naturvårdsverket har finansierat upparbetade löne- och driftskostnader för projektet fram till 2023-12-01. Under december 2023 har SGU finansierat lönekostnader för databasleveranser och tillgängliggörande av data och information. Under 2023 har SGU genomfört byte av applikation för inmatning och leverans av fältdata till SGU:s databaser vilket medfört perioder av driftsstopp för inmatning av data. Databasleveranser som på grund av driftstoppet fortgår under första kvartalet 2024 finansieras av SGU.



Figur 1. Arsenikhalt i grundvatten från enskilda brunnar (ofiltrerat råvatten). Kartan är gjord av SGU genom interpolation (Inverse Distance Weighting) av mätdata från Maxe (2021). Notera bristen på underlagsdata i de nordliga länen. Områden med större avstånd än tre kilometer till närmsta provplats (brunn) visas i svagare färg för att illustrera en stor osäkerhet i den geografiska utbredningen av förorenande områden. Observera att metoden som använts för att framställa kartan gör att områden med svagare färg får en större och överdriven geografisk utbredning i jämförelse med områden med mycket underlagsdata där föroreningarnas geografiska utbredning har gått att illustrera mer exakt.

Riktvärde för berggrundens arsenikhalter

I denna rapport hänvisas låga halter av arsenik till arsenikhalter som understiger 10 ppm (mg/kg) vilket är riktvärde för nivåer för mindre än ringa risk för arsenikhalter i material som återvinns för anläggningsändamål (Naturvårdsverket 2010). Riktvärdet baseras på analyser av arsenikhalten i svensk jord med en 90-percentil på 10 ppm baserat på 12 815 jordanalyser (analyser tillgängliga i SGU:s databas år 2007). Motsvarande riktvärde för mindre känslig markanvändning är 25 ppm. Den genomsnittliga arsenikhalten i den kontinentala jordskorpan beräknas i intervallet 1–2 ppm (Taylor & McLennan 1985). Arsenikhalten kan dock variera mycket mellan olika bergarter (Masuda 2018). Granitiska bergarter (kvartsrika magmatiska bergarter) har generellt mycket låga arsenikhalter medan kvartsfattiga magmatiska bergarter kan vara förhöjda. Skiffrar och i synnerhet alunskiffrar och svartskiffrar kan ha mycket förhöjda halter av arsenik. Genomsnittshalten av arsenik i nordamerikanska svartskiffrar ligger till exempel på 29 ppm (North American Shale, NASH, Rollinson 1993). En 90-percentil för den svenska berggrunden baserad på 4 910 bergartsanalyser ger ett värde på 5,5 ppm (totalgeokemiska analyser av bergarter som klassats som icke mineraliserade, utdrag från i SGU:s litogeokemiska databas år 2020). SGU:s data över den svenska berggrundens kemiska sammansättning har mycket oregelbunden geografisk täckningsgrad. Insamling av geokemisk data har till stor del varit fokuserad på prospekteringsintressant berggrund och på berggrundens magmatiska utveckling och omfattar därför endast en liten andel bergarter av sedimentärt ursprung (Frank 2021).



**Yngre, mindre deformerade
till odeformerade bergarter**

Granit och pegmatit

**Äldre, genomgående deformerade och
förskiffrade bergarter**

Kvartsrik magmatisk bergart (granit, granitoid)

Kvartsfattig magmatisk bergart (gabbro)

Vulkanisk bergart

Sedimentär bergart

**Arsenik i grundvatten
i bergborrade brunnar
(enskilda brunnar, Maxe 2021)**

● < 10 mm/l

● ≥ 10 mm/l

Figur 2. Berggrundsgeologisk karta över Mälardalsregionen (SGU:s kartdatabas, skala 1:1 miljon) med arsenikdata från ofiltrerat råvatten från bergborrade enskilda brunnar (Maxe 2021). Undersökningsområdena markerade som röda polygoner.

Provtagning och analys

Provtagning av berggrunden har utförts enligt SGU:s rutin för provtagning av berggrund inför geokemisk och petrografisk analys. Provtagningen hade som mål att fokusera på prover som var representativa för berggrundens sammansättning och omfattade därför provtagning av både dominerande bergartsenheter och underordnade bergartsled i form av gångar och inneslutningar. Berggrunden i båda undersökningsområdena är vanligtvis heterogen. På platser med heterogen berggrund togs flera prov för att undersöka variationer i berggrundens sammansättning. Det innebär att både huvudbergart, gångbergarter och inneslutningar provtogs för analys. Inför provtagningen utfördes sonderande mätningar av svavel, arsenik och ett antal tungmetaller i olika bergartsled med handburen röntgenfluorescensanalysator (HXRF). Mätningarna med HXRF utfördes som sonderande undersökningar av bergytan för att hitta bergartskomponenter med potentiellt förhöjda halter arsenik. Vid indikation på förhöjda arsenikhalter gjordes utökad provtagning för totalgeokemisk analys. I några fall där mycket förhöjda halter arsenik bekräftades med totalgeokemisk analys, gjordes förnyad provtagning för att vidare undersöka reproducerbarheten i analysresultaten och utbredningen av arsenikanrikning i den undersökta bergartsenheten.

Petrografi

Mikroskoppreparat i form av 2×3 cm stora och 30 mikrometer tjocka bergartsskivor monterade på objektglas (tunnslip) framställdes för dokumentation av mineralsammansättning, mineralfördelning och mikrotexturer (kornstorlek, kornstorleksfördelning, kornform) med optisk mikroskopi. Oxider, sulfider och arsenider dokumenterades med malmmikroskopering. Ett tjugotal prover med höga arsenikhalter undersöktes vidare med elektronmikroskopi för detaljerad analys av mineralkemi och mikrotexturer. Elektronmikroskopi utfördes på Uppsala universitet med fältemissionsmikrosonden Electron Probe Microanalyzer (JXA-8530F JEOL SuperProbe), som var utrustad med instrument för både våglängdsdispersiv och energidispersiv analys och sekundära (SE) och reflekterande elektron-detektorer (BSE). Elektronmikroskopi krävdes för att åtskilja de arsenikförande mineralen arsenikkis (sulfid, FeAsS) och löllingit (arsenid, FeAs_2).

Totalgeokemisk analys

Endast berggrund utan makroskopiskt synbara tecken på vittring provtogs för geokemisk analys. Prover med rostfärgning eller annan vittringsrelaterad missfärgning uteslöts från analys. För prov som analyserades gjordes detaljerad fotodokumentation av provtagen håll i fält. Provstorleken varierade beroende på kornstorlek och textur. Prov tagna med hammare och slägga i fält varierar i provstorlek från cirka 0,5 kg (finkorniga, homogena bergarter) till över 20 kg (heterogena och grovkorniga bergarter). I Arlanda området gjordes även förtätad provtagning längs arsenikanrikade profiler i finkorniga ytbergarter där cirka 5–10 cm långa pluggar med en diameter om 2 cm togs ut med borr. Dessa prover har en provstorlek mellan 0,03 och 0,20 kg. Provmängd för alla prover anges tillsammans med analysdata.

Samtliga prover skickades till ALS Scandinavia i Piteå för provpreparering och totalgeokemisk analys. Provberedning omfattade finkrossning av proverna (< 2 mm, 70 % av fraktionen) följt av en nerdelning och finmalning av ett delprov om cirka 250 gram till ett bergartspulver med en kornstorlek < 75 µm. Uppslutning av proverna gjordes både i litiumboratsmälta, med fyra syror (salpetersyra, perklorosyra, saltsyra och fluorvätesyra) och i kungsvatten (svavelsyra och saltsyra). Uppslutning i litiumboratsmälta krävs för full uppslutning av robusta silikatmineral. Analyser av volatila grundämnen som arsenik måste göras med uppslutning i syra eftersom de ångar bort vid uppslutning i smälta. Analyserna omfattade ALS analyspaket CCP-PKG01, ME-MS41 och PGM-ICP23. De inbegriper analys av alla huvudgrundämnen, det vill säga de grundämnen som är vanligast i jordskorpan, spårgrundämnen och volatila spårgrundämnen (arsenik, kadmium), samt kol, svavel och basmetaller. Huvudgrundämnena anges som oxider och omfattar SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ($\text{FeO}_{\text{total}}$), MgO , MnO , Na_2O , K_2O , och P_2O_5 .

Data

All geokemidata som samlats in i projektet finns fritt tillgänglig via SGU:s kartvisare för bergartskemi som hittas via www.sgu.se – sidan Kartor och 3D.

Mikroskoppreparat och referensprov

För samtliga prover som har analyserats för totalgeokemisk analys finns mikroskoppreparat (tunnslip) och en referensstuff (knytnävsstorlek) som är representativ för det bergmaterial som har analyserats. Överblivet finkrossat provmaterial och finmalen analyserad fraktion har tagits om hand för att möjliggöra uppföljande lakteter av provmaterialet (fig. 3).



Figur 3 (föregående sida). Dokumentation och referensmaterial från provtagningsplatser. **A.** Foto-dokumentation av provtagningsplats i fält. **B.** Referensmaterial från totalgeokemisk analys med grovmalen (höger) och finmalen (vänster) fraktion. **C.** Referensstoff (handstuff), **D.** Fotodokumentation av markerat utsnitt för mikroskoppreparat. **E.** Fotografi från optiskt mikroskop av mikroskoppreparat. Fotograf: Jenny Andersson.

Resultat

Projektet har bedrivits under 11 månader som ett datainsamlingsprojekt med en intensiv provtagningskampanj riktad mot berggrundens arsenikinnehåll. Provtagningen pågick ända fram till tidig oktober 2023 och har enligt detta upplägg kunnat generera en stor mängd insamlade data (fältdata, petrografi, geokemi). En mindre del av projektet har omfattat tolkning och utvärdering av data. Sammanställning och leverans av data till SGU:s databaser genomfördes under november–december 2023. Denna data ska tillsammans med insamlat petrografiskt och geokemiskt undersökt material ligga till grund för undersökningar av bergmaterialens lakbarhet.

Nedan följer en redovisning av resultaten från fält och analysarbetet med fokus på var och hur arsenik uppträder i de undersökta områdena. Vidare utvärdering och tolkning av data och information som projektet har tagit fram i det norra undersökningsområdet pågår i angränsande forskningsprojekt ”Miljö- och hälsofarliga ämnen i bergmaterial – fallstudie Arlanda–Rosersberg” (BeFo-projekt 438, SGU Dnr 002175-2020). Resultatet från datainsamlingsprojektet har gett många intressanta och oväntade resultat vilket har lett till att forskning på det insamlade materialet även har initierats i andra forskningssamarbeten som också omfattar det södra undersökningsområdet.

Undersökningarna visar mycket olika resultat från de två undersökningsområdena. Berggrunden i de båda områdena har olika geologisk utvecklingshistoria. Båda områdena domineras av omvandlade bergarter av sedimentärt ursprung, men berggrunden uppvisar olika kraftig omvandlingsgrad. Berggrunden i Mariefred-Södertäljeområdet är kraftigt ådergnejsomvandlad medan berggrunden i Arlanda-Rosersbergsområdet generellt saknar ådergnejsomvandling och mestadels uppträder som medelgradigt omvandlad och förskiffrad. Undersökningarna indikerar dock att det inte bara är omvandlingsgraden som skiljer de båda utan även berggrundens ålder och ursprung.

På grund av de stora skillnaderna i resultat från de två geologiskt olika områdena presenteras resultaten från de båda områdena i separata avsnitt.

Resultat från område I: Mariefred–Södertälje

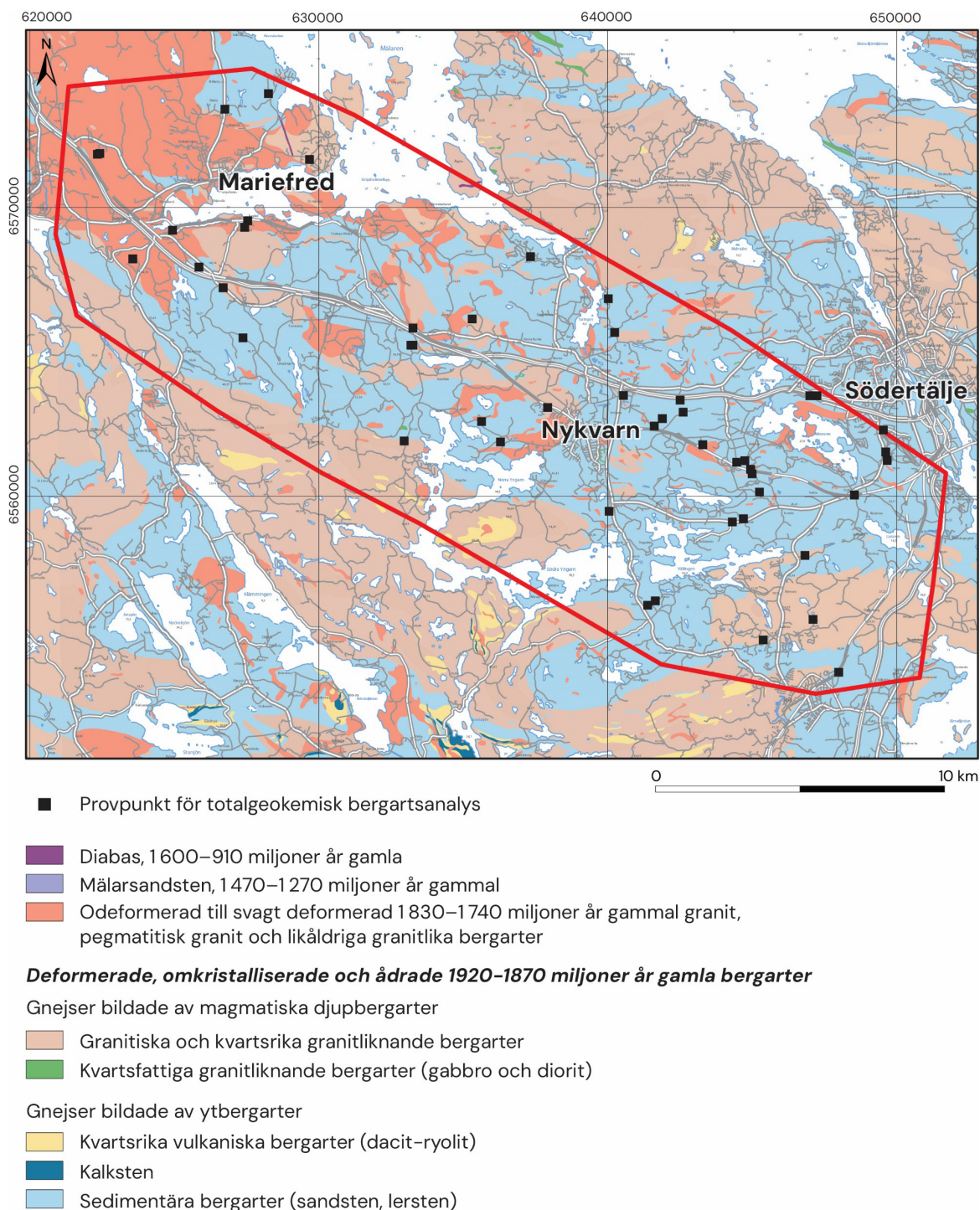
Berggrunden i området utgörs av ådergnejs av sedimentärt ursprung som injekterats av två generationer graniter, en äldre gnejsig generation och en yngre, mindre deformerad och kvarts-fältpatrik generation som ställvis klipper den ådrade gnejsstrukturen i sidoberget (fig. 4). Kvartsfattiga bergarter (gabbro och diabas) förekommer både som omvandlade och deformerade intrusioner och inneslutningar (amfibolit och mafisk granulit) och som strukturellt yngre gångar (diabas) som klipper ådring och deformationsstrukturer.

Berggrunden i undersökningsområdet är mycket heterogen. Ofta uppträder två eller flera bergarter vid samma observationspunkt (fig. 5). Proportioner mellan olika bergarter kan också variera mycket över en skala på några meter. Sammantaget uppvisar berggrunden stor komplexitet och den kraftiga omvandlingsgraden gör att det ofta är svårt att bestämma ursprungsbergart.

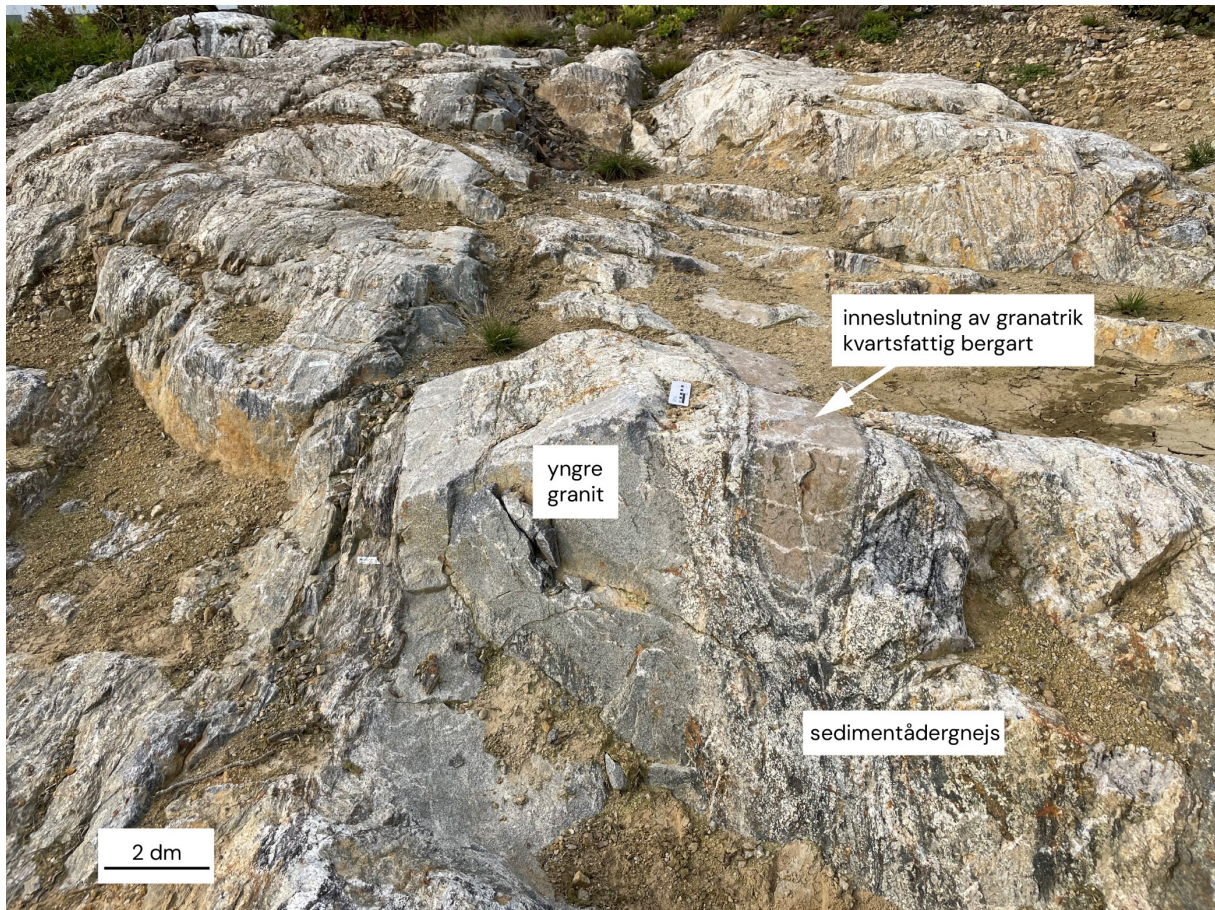
Mer information om berggrunden i området finns i beskrivningen till berggrundskartan Strängnäs SO (Stålhös & Sukotjo 1983).

Totalhalter av arsenik

Totalt gjordes 93 analyser av totalgeokemi. På grund av berggrundens heterogena sammansättning togs flera prov på samma plats. Syftet var att undersöka hela bergmassans sammansättning. Resultat från geokemianalyserna visar att arsenikhalten kan variera stort mellan olika bergartsled (fig. 6).



Figur 4. Berggrundsgeologisk karta över undersökningsområde mellan Mariefred och Södertälje (SGU skala 1:50 000, baserad på SGU:s kartdatabas i skala 1:250 000–1:50 000) med markering av platser som provtagits för analys av berggrundens geokemiska sammansättning.



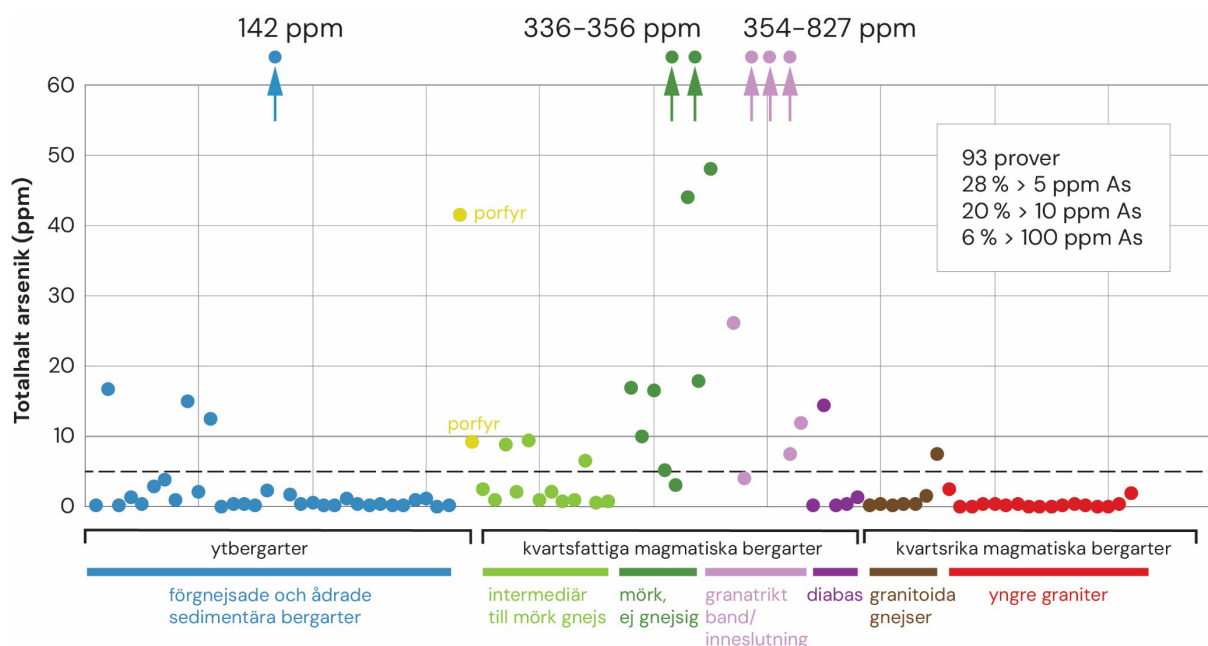
Figur 5. Representativt exempel på heterogen berggrund i Mariefred-Södertäljeområdet. Foto: Jenny Andersson.

Sedimentådergnejs

Den dominerande sedimentådergnejsen uppvisar generellt låga halter av arsenik. Endast 4 av totalt 32 analyser har en arsenikhalt som överstiger 5 ppm, lika många överstiger 10 ppm. Endast en analys överstiger 100 ppm. De prover som överstiger 5 ppm kommer från mellan 1 och 10 m breda band i blottningar av ådergnejs som i övrigt inte uppvisat förhöjda halter av arsenik (fig. 7A).

Kvartsrika bergarter av magmatiskt ursprung (granitiska bergarter)

Bland analyserna av strukturellt yngre granit som utgör den i området näst vanligast förekommande bergarten visar ingen av de 16 analyserna en arsenikhalt överstigande 5 ppm (fig. 6). Den tredje vanligast förekommande bergarten, strukturellt äldre förgnejsade graniter och granitlika bergarter, uppvisar inte heller några höga halter arsenik. Ingen analys uppvisar en arsenikhalt över 10 ppm och endast en analys av totalt sju analyser har en arsenikhalt över 5 ppm och ingen över 10 ppm. Sammantaget visar detta att den dominerande berggrunden i området som utgörs av ådergnejs av sedimentärt ursprung och olika kraftigt omvandlade granitiska bergarter generellt inte innehåller höga halter arsenik.

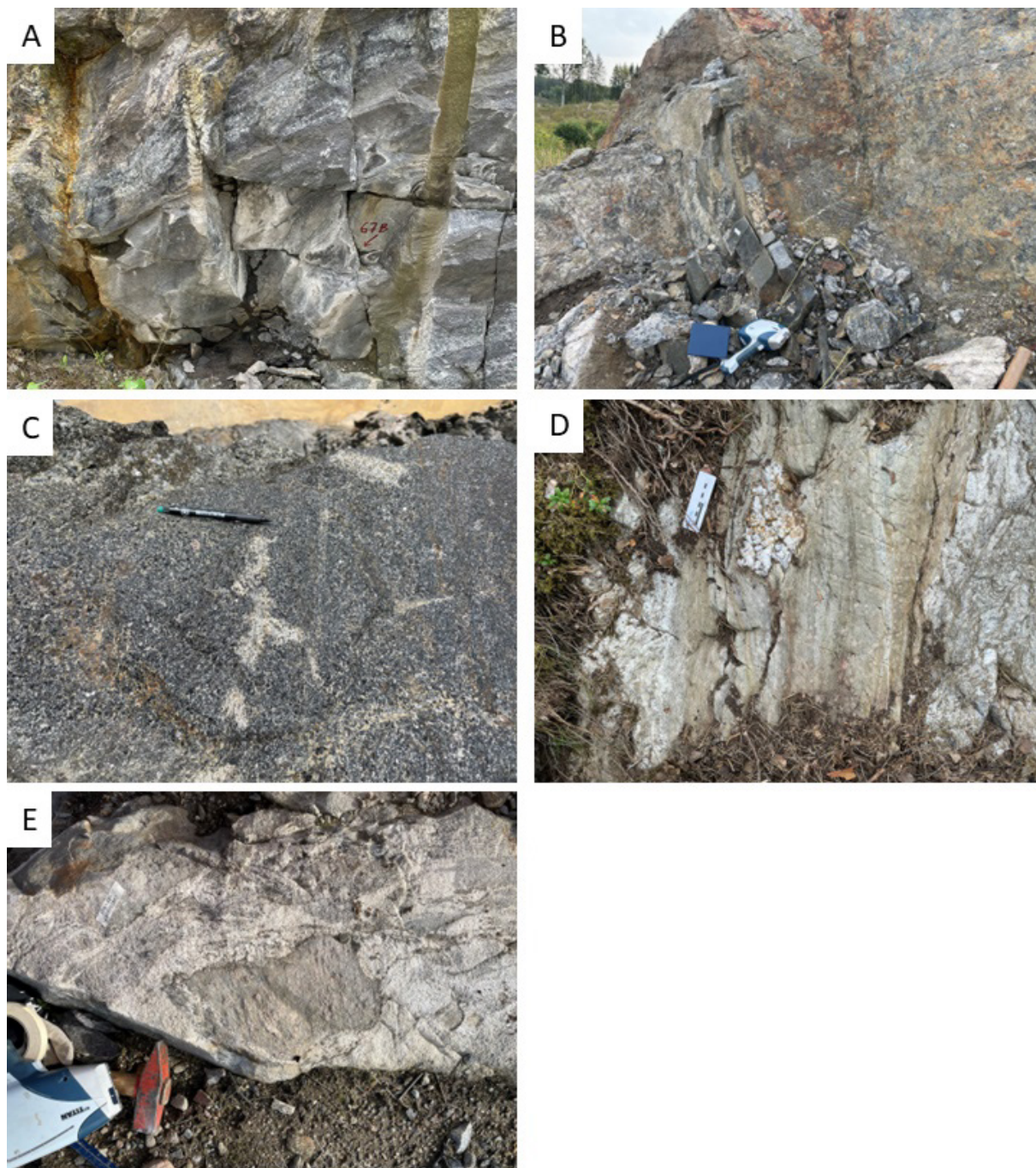


Figur 6. Totalhalt av arsenik i berggrunden mellan Mariefred och Södertälje. Olika färger symboliserar olika bergartstyper. Den streckade linjen markerar arsenikhalten 5 ppm.

Kvartsfattiga magmatiska bergarter (diabas och gabbro)

Kvartsfattiga magmatiska bergarter utgör en underordnad del av berggrunden i undersökningsområdet. De förekommer både som omvandlade bergarter (amfibolit och mafisk granulit) och som diabasgångar som injekterat jordskorpan efter att den omvandlats. Endast ett fåtal förekomster har haft en sådan utbredning att de har visualiserats som berggrundsytor i berggrunds-kartan (fig. 4; Stålhös 1983). Skivor, linser och gångar av amfibolit, som ligger parallellt med deformationsstrukturen är relativt vanliga. De bildar generellt inga större sammanhängande enheter (< 10 m) och är oftast mindre än 1 m breda. Proverna av kvartsfattig gnejs av magmatiskt ursprung uppvisade inga förhöjda halter av arsenik, med undantag för ett prov (JAN230089B). Provet med mycket förhöjd arsenikhalt är en mellan 1 och 2 dm bred skiva, troligtvis en gångbergart (fig. 7B), som även i övrigt uppvisar en mycket ovanlig och avvikande mineralogi och kemisk sammansättning. Bergarten, som är ovanlig och inte återfunnits på andra undersökta platser i området, saknar fältspat och har förhöjda halter av magnesium, nickel och krom.

Bland prover från mindre deformerade till massformiga medelkorniga kvartsfattiga magmatiska bergarter uppträder viss förhöjning av arsenikhalten, sex av nio prover har över 10 ppm arsenik och två prover uppvisar kraftigt förhöjda arsenikhalter på 336 och 356 ppm (fig. 6 och 7C). Sju av de nio proverna har tagits inom ett begränsat område (lokal JAN230029). Koncentrerad provtagning i detta område gjordes på grundval av att information om förhöjda halter arsenik i berget på platsen tidigare rapporterats till SGU (Södertälje kommun 2021). Den täta provtagningen inom det begränsade området visar stor variation av arsenikhalten. Hittills genomförda studier av bergartens fältuppträdande, mineralogi och textur har i projektet inte kunnat tolkas för att förut-säga förhöjningar av arsenikhalten.



Figur 7. A. Arsenikanrikat lager (142 ppm, prov JAN230067B) i sedimentådergnejs med något svagare ådring och högre halt mörka mineral än omgivande gnejs. Fotot visar en cirka två meter bred del av en lodrät bergskärning. **B.** Kraftigt arsenikanrikad (356 ppm) skiva av fältspat och kvartsfri magmatisk bergart i sedimentådergnejs utan arsenikanrikning (prov JAN230089B). **C.** Arsenikanrikad del av kvartsfattig järn–magnesiumrik magmatisk bergart (336 ppm, prov JAN230029A). **D.** Granatrik kvartsfattig gång i ådergnejs utan arsenikanrikning. **E.** Underordnad förekomst av kraftigt arsenikanrikad granatrik inneslutning i ådergnejs (827 ppm, prov JAN230019F). Foto: Jenny Andersson.

Yngre diabasgångar (icke omvandlade magmatiska bergarter) är ställvis vanliga i området men sporadiskt förekommande. I delar av det östra området uppträder strukturellt unga diabaser i gångsvärmar, men har inte observerats som dominerande bergart på någon av de platser som undersökts i detta projekt. Diabasgångarna innehåller låga halter arsenik. En av fem provtagna diabasgångar uppvisar en något förhöjd arsenikhalt på 14 ppm. Denna diabas är en mindre än 0,5 m bred gång i en omvandlad medelkornig kvartsfattig svagt deformerad magmatisk bergart (gabbro) med förhöjd arsenikhalt.

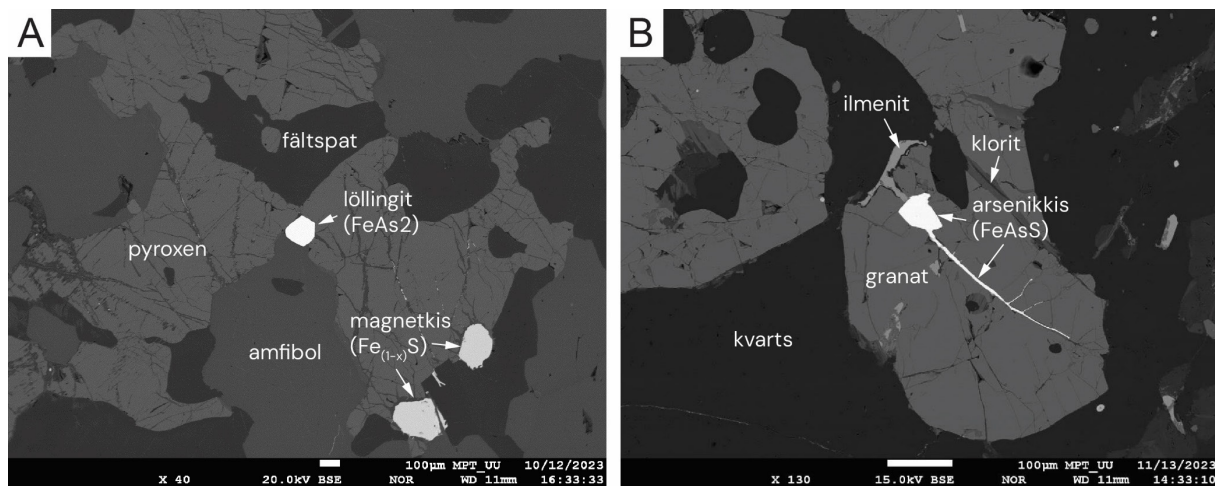
Gångar, skivor och inneslutningar av kraftigt omvandlade granatrika kvartsfattiga bergarter uppvisar i de flesta prover något till kraftigt förhöjda halter av arsenik, upp till 827 ppm (fig. 6 och 7C). Bergarten är volymmässigt mycket underordnad, relativt sällsynt förekommande och uppträder oftast endast som enstaka $\leq 1\text{--}5$ dm breda gångar eller linser (fig. 7D och E). Denna bergartsförekomst har inte beskrivits vid tidigare kartläggning i området vilket indikerar endast begränsad förekomst (jämför Stålhös & Sukotjo (1983).

Fältspatporfyriska bergarter

Underordnade förekomster av fältspatporfyriska bergarter har provtagits på två platser. Det ena provet som togs i en deformerad finkornig grå fältspatporfyrisk 0,5 till 1,5 m bred gång visade ingen större förhöjning av arsenikhalt. En bergart av förmodat vulkaniskt ursprung i södra provtagningsområdet uppvisade en något förhöjd arsenikhalt på 40 ppm (fig. 6). Eftersom endast ett prov har analyserats från denna bergartsenhet är det oklart om även andra delar av bergarten uppvisar samma förhöjning.

Förekomst av arsenikmineral

Inga arsenikmineral observerades i fält eller handstuff. Förekomst av arsenik i form av sulfid (arsenikkis, FeAsS) eller arsenid (löllingit, FeAs_2) kunde identifieras i optiskt mikroskop vid malmmikroskopering. Dessa mineral är mycket svåra att skilja åt med optisk mikroskopi. Ett antal prover valdes därför ut för att bestämma arsenikmineralens sammansättning och deras textuella kontext med hjälp av svepelektronmikroskopi (energidispersiv och våglängdsdispersiv spektrometri och back scattered elektronavbildning). Analyserna visade att arsenik förekom både som sulfid (arsenikkis) och som arsenid (löllingit). Arsenikkis var vanligare, men även löllingit var relativt frekvent förekommande. Arsenikmineralen uppträdde generellt som finkorniga singelkristaller, cirka 100–200 mikrometer stora, i silikaternas korngränser (fig. 8A). De hade ofta välutvecklade kristallformer. I arsenikanrikad granatrik kvartsfattig inneslutning i sedimentådergnejs observerades arsenikkis även som sprickfyllnad i granat (fig. 8B). Granat är ett omvandlingsmineral vilket visar att arsenik varit mobilt under den omvandling av berggrunden som ägt rum under höga temperaturer (granulitfacies metamorfos).



Figur 8. SEM-BSE-bilder som visar förekomst av arsenikmineral i omvandlade (metamorfa) arsenikanrikade kvartsfattiga magmatiska bergarter i Nykvarn-Järnaområdet. **A.** Cirka 150 mikrometer stor löllingitkristall längs korngräns av silikater i högttemperaturomvandlad kvartsfattig bergart av magmatiskt ursprung (metamorf gabbro, mafisk granulit, JAN230029A). **B.** Förekomst av arsenikkis i en granatrik gångbergart (JAN230019F). Förekomsten av arsenikkis i sprickor i silikatmineralet granat indikerar att arsenik har varit mobilt under omvandlingsfasen (metamorfosen).

Sammanfattning av resultat från Mariefred-Södertäljeområdet

Berggrunden i Mariefred-Södertäljeområdet uppvisar generellt låga halter av arsenik, med halter under 10 ppm. Den dominerande berggrunden som utgörs av ådergnejs av sedimentärt ursprung uppvisar endast enstaka och volymmässigt begränsade förhöjningar (fig. 7A), medan kvartsrika bergarter av magmatiskt ursprung (granitiska bergarter) som utgör den näst vanligaste bergarten, helt saknar förhöjda halter arsenik.

Förhöjda halter arsenik kan påträffas i volymmässigt begränsade gångar och linser av gabbro och diabas (kvartsfattiga magmatiska bergarter). Medelkorniga linser utan tydliga gnejsstruktur (metagabbro) kan ställvis innehålla höga halter arsenik. Detaljerad provtagning av dessa indikerar en mycket heterogen anrikning, från låga halter till något eller mycket höga halter av arsenik (fig. 7B–E).

Finkorniga förgnejsade kvartsfattiga till intermediära varianter uppvisar inga förhöjda arsenikhalter. Icke omvandlade diabasgångar och omvandlade gångbergarter med grovkornig granat har låga till ställvis något förhöjda arsenikhalter. Mycket förhöjda halter av arsenik påträffades endast i en begränsad förekomst av en sällsynt granatrik kraftigt omvandlad gångbergart (fig. 7E).

Slutsats Mariefred-Södertäljeområdet

Den volymmässigt dominerande berggrunden befanns inte innehålla höga halter arsenik. Förhöjda halter arsenik uppmättes i 1–5 dm granatrika inneslutningar (fig. 7E, en förekomst), i högttemperaturomvandlade men icke förgnejsade kvartsfattiga magmatiska bergarter (fig. 7C, sporadisk förekomst) och på ett fåtal ställen i omkring 1–10 m breda lager i förgnejsade sedimentära bergarter (fig. 7A, måttliga förhöjning).

Vid provtagning av berggrunden måste både den bergartsberoende variationen i arsenikhalt och den volymmässiga utbredningen av eventuellt arsenikanrikade komponenter beaktas.

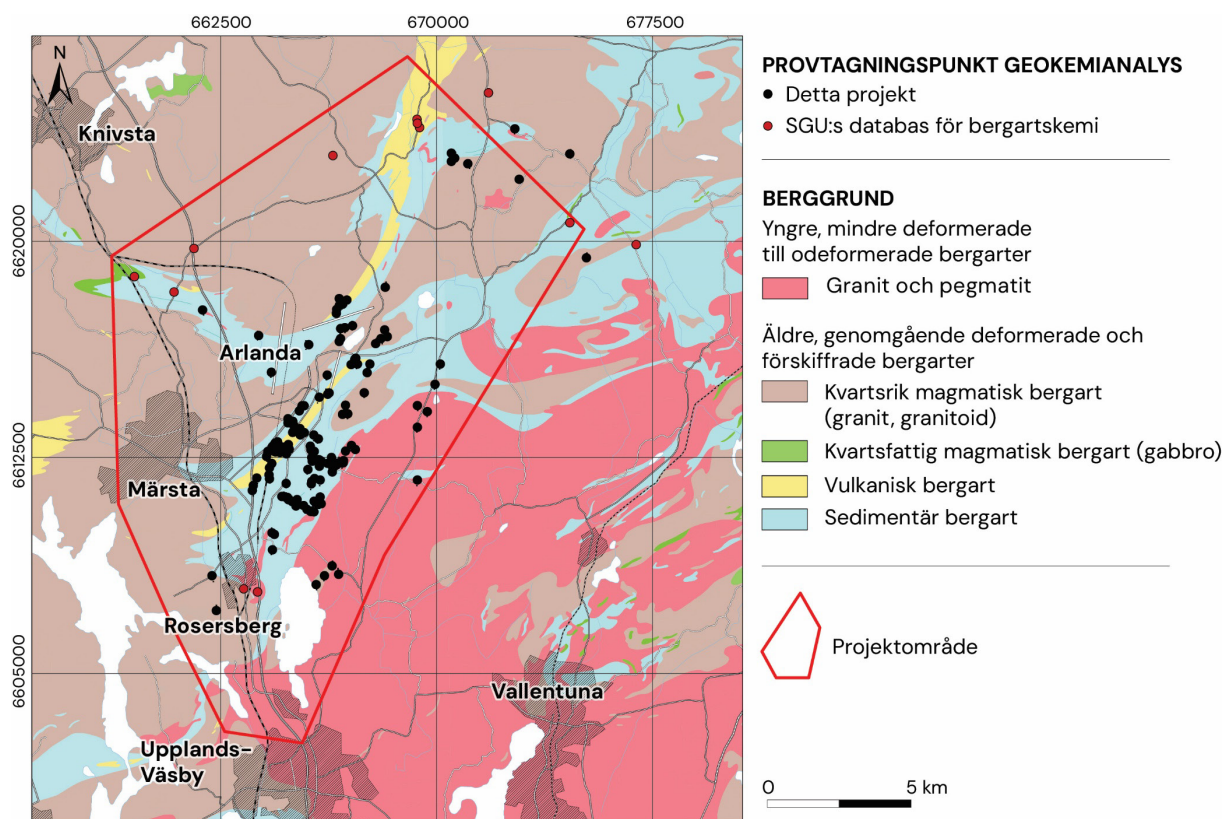
Resultat område II: Arlanda–Rosersberg

Berggrunden i Arlandaområdet utgörs av sedimentära och vulkaniska enheter som intruderats av granitiska och granitiska djupbergarter (fig. 9). Det finns även ställvis ett relativt stort inslag av kvartsfattiga lager och gångar som har sitt ursprung som intrusioner av gabbro och diabas. Det är oklart om de tillhör en eller flera generationer. Dessa bergarter deformerades och metamorfoserades under medelhöga temperaturer och relativt låga tryck (cirka 500–650 °C och 0,25–0,55 GPa, Stålhös 1991, Sjöström & Bergman 1998, Skoog 2022). Yngre graniter, pegmatitgraniter och pegmatiter dominerar den sydöstra delen av undersökningsområdet. De är en del av ett större område med yngre graniter och pegmatiter som dominerar i norra Stockholmsområdet (Vallentunagraniter). De yngre graniterna har svagt utvecklade deformationsstrukturer i kontrast till den penetrativa deformation som den äldre berggrunden uppvisar.

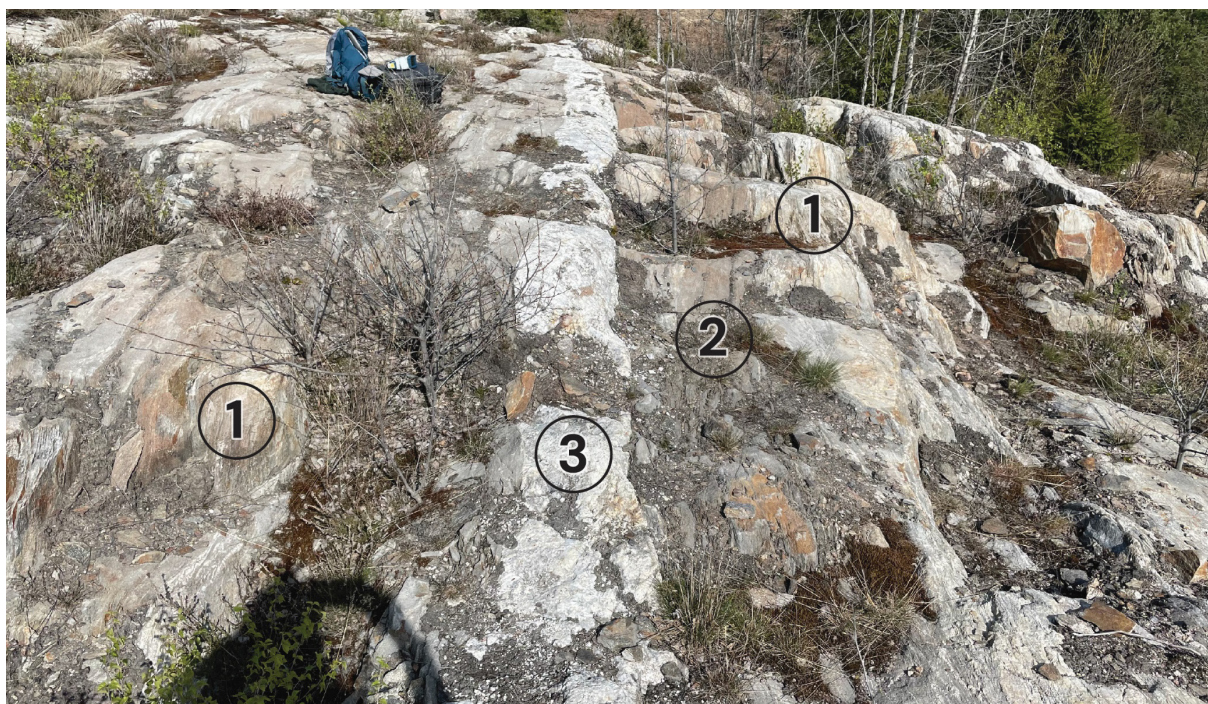
Arlandaområdet är geologiskt en del av Bergslagen men skiljer sig åt på flera utmärkande sätt. En större andel av de vulkaniska bergarterna har lägre kvartshalt och högre halt järn-magnesium-mineral (intermediära vulkaniter, andesitiska till dacitiska sammansättningar) medan kvartsrika porfyryr av granitisk (ryolitisk) sammansättning typiska för Bergslagens vulkanism endast utgör en mindre andel. Även de sedimentära bergarterna är kvartsfattigare och bortsett från enstaka skarnförekomster saknas horisonter med kalksten. Området har inte heller några kända sulfidmineraliseringar som karaktäriserar närliggande områden i Bergslagen och inga gruvor.

Berggrunden i undersökningsområdet är litologiskt mycket heterogen. Ofta uppträder två eller flera bergarter vid samma observationspunkt (fig. 10). Proportionerna mellan olika bergarter kan variera mycket över en skala på några meter. Berggrunden har även omvandlats och deformerats under medelhöga tryck och temperaturer. Sammantaget försvårar detta bestämning av ursprungsbergart.

Berggrunden är genomgående deformerad och brantstående i en nordnordostligt strykande struktur. Deformation och omkristallisering av berggrunden i samband med bergskedjebildning har förändrat berggrundens ursprungliga mineralsammansättning och suddat ut ursprungliga kontaktrelationer mellan olika bergartsled. Sammantaget gör detta att bergarternas ursprungliga egenskaper, relativa åldrar och bildningsmiljö är svårare att spåra.



Figur 9. Berggrundskarta skala 1:50 000 med provtagningspunkter i Arlanda-Rosersbergsområdet baserad på SGU:s kartdatabas i skala 1:250 000–1:50 000. Svarta punkter visar prover tagna inom projektet. Röda punkter visar geokemidata från andra projekt tillgängliga i SGU:s bergartskemidatabas. Eftersom berggrunden är heterogen har flera prover tagits på samma lokal och i anslutning till andra provtagningspunkter.

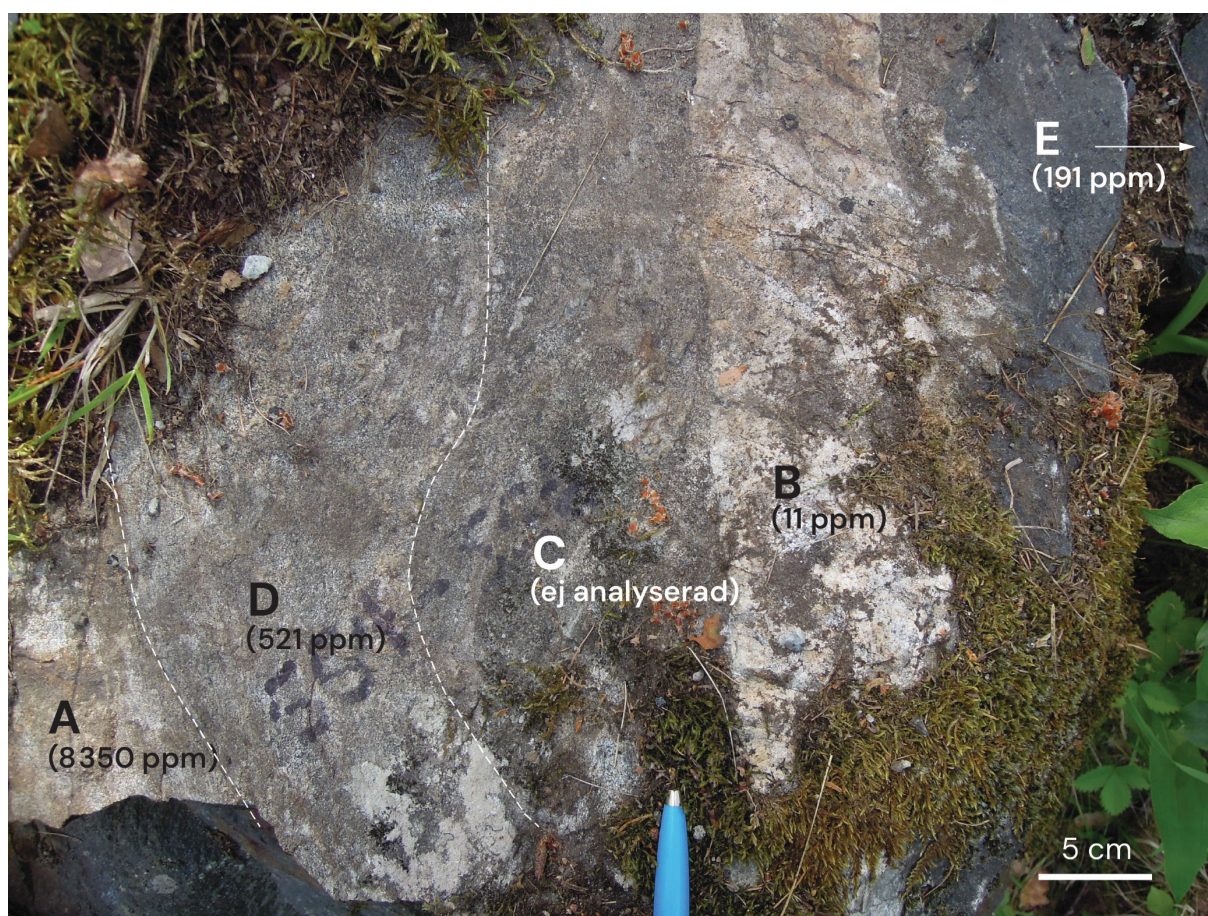


Figur 10. Fotografi av kraftigt deformerad och veckad ytbergartssekvens i Arlandaområdet som visar band av sedimentära bergarter (1) med invecklade omvandlade diabasgångar (2) och grovkorniga pegmatitgångar (3). Foto: Jenny Andersson.

Totalhalter av arsenik

Totalt gjordes 132 analyser av totalgeokemi. På grund av berggrundens heterogena sammansättning togs ställvis flera prov på samma plats (se fig. 11). Syftet var att undersöka hela bergmassans sammansättning. Resultat från geokemianalyserna visar att anrikning av arsenik i berggrunden uppträder i 500–1 500 m breda stråk inom vilka flera bergartsenheter uppvisar förhöjda arsenikhalter (> 10 ppm, fig. 12). I dessa stråk är berggrunden ställvis kraftigt anrikad på arsenik med halter överstigande 100 ppm, ställvis över 1 000 ppm. Utanför de arsenikanrikade stråken uppvisar samma bergartsenheter genomgående låga halter av arsenik.

Provtagning av berggrunden har gjorts i profiler vinkelrätt mot berggrundens struktur. I stråk med kraftigt förhöjda halter arsenik har särskilt detaljerad kartläggning och provtagning utförts i två profiler. Målet med detta har varit att få en bättre förståelse för hur och var arsenik sitter i berget.



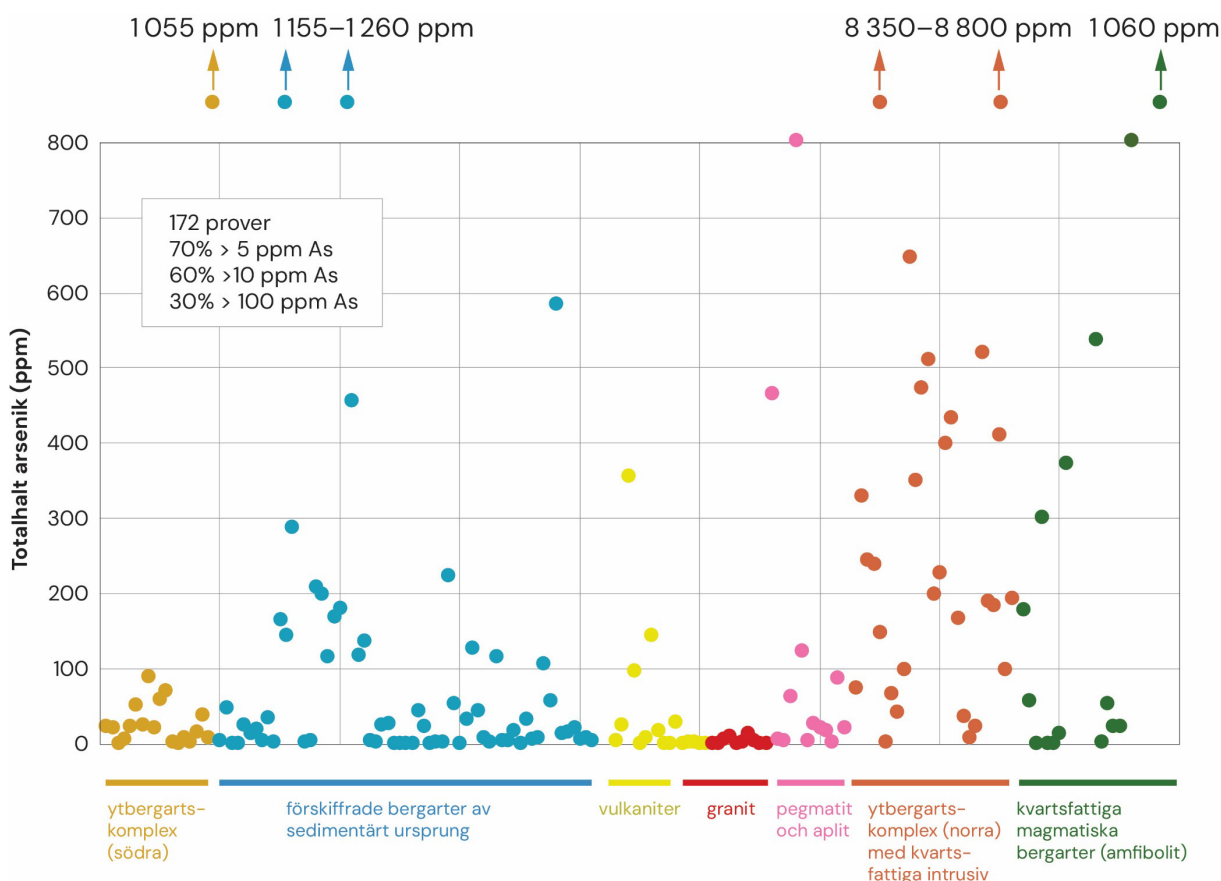
Figur 11. Kraftigt arsenikanrikad berggrund i mindre vägsärning längs vägen mellan Arlanda och Kimsta. Exempel på tät provtagning, totalt fyra analyser av totalkemisk sammansättning och sex prover för petrografisk analys längs en cirka 1,5 m lång profil (Prov-ID JAN220010A-E. Läge och prov-ID anges i figuren. Koncentration av arsenik från totalgeokemisk analys anges i ppm. Bergarter: metasedimentär bergart (A), metagabbro (C, D och E), yngre aplitisk gång (B). Foto: Jenny Andersson.

Kvartsrika bergarter av magmatiskt ursprung (granitiska och granitlika bergarter)

I Arlanda-Rosersbergsområdet är kvartsrika bergarter av magmatiskt ursprung (graniter och granitlika bergarter) och omvandlade motsvarigheter de enda bergartstyperna som genomgående uppvisar låga halter av arsenik (fig. 12). Endast ett prov av äldre deformerad granit (Uppsalagranit) visade på en något förhöjd arsenikhalt (JAN230032A). Provet togs cirka 50 m från kontakten till en äldre ytbergartssekvens med ställvis förhöjda halter av arsenik och den granitiska magman kan ha kontaminerats av arsenikanrikt sidoberg vid intrusionstillfället.

Vulkaniska bergarter

Vulkaniska bergarter uppträder i huvudsak i en cirka 0,5 km bred och 6,5 km lång sammanhängande nordnordvästligt strykande, brantstående enhet i de centrala delarna av undersökningsområdet. De är finkorniga till fint medelkorniga ställvis tydligt bandade bergarter med varierande proportioner mellan kvarts, fältspat och mörka mineral. De fint medelkorniga varianterna liknar granitiska bergarter och kan motsvara sub-vulkaniska intrusioner. Inget prov av vulkaniska bergarter i den centrala enheten uppvisade förhöjda halter av arsenik. En halv till mer än 5 m breda band och lager av vulkaniska bergarter i de arsenikanrikade ytbergartsstråken uppvisade ställvis signifikant förhöjda halter av arsenik (< 100 ppm). Upprepad provtagning av samma bergart gav låg arsenikhalt vilket kan indikera lokal arsenikanrikning i denna bergart (fig. 13A).



Figur 12. Totalhalt av arsenik i berggrunden i Arlanda-Rosersbergsområdet. Olika färger symboliserar olika bergartstyper.

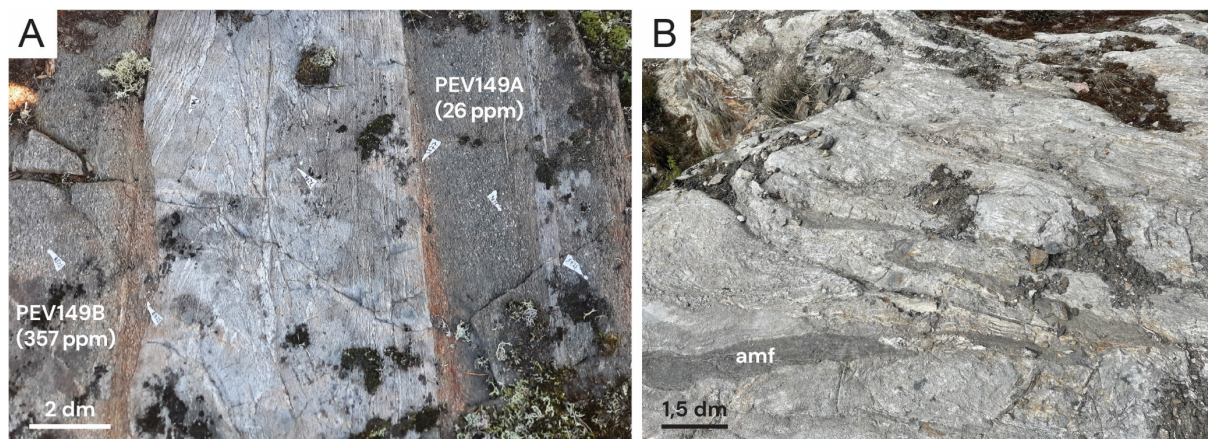
Arsenikanrikade ytbergartstråk

På Arlanda flygplats och i områden direkt öster och söder om landningsbanorna förekommer litologiskt heterogena ytbergartsenheter med ställvis mycket förhöjda halter av arsenik, lokalt upp till nästan 1 vikt% (fig. 12). Längs den norra undersökningsprofilen (Kimstavägen) har 21 av totalt 28 bergartsprover en arsenikhalt över 100 ppm. I den södra profilen är arsenikhalterna lägre med genomgående förhöjda arsenikhalter mellan 20 och 100 ppm.

De arsenikanrikade ytbergartsstråken domineras av omvandlade sandstenar och lerstenar som skiljer sig åt genom kvarts-fältspathhalt och glimmerinnehåll. Skillnaderna i mineralinnehåll ger upphov till en bandning, där de enskilda banden kan vara från 1 dm upp till flera meter i tjocklek. Ställvis uppträder en relik sedimentär lagring där enstaka lager varierar mellan 1 och 5 mm i tjocklek. Glimmerrika led uppträder som glimmerskiffrar. Detaljerade mätningar med handburen XRF i fält indikerar att arsenikanrikning är vanligare i glimmerrikare band. Analyser av bergets totalgeokemiska sammansättning visar ingen tydlig koppling mellan kiselhalt (kopplad till kvartshalten) och arsenikhalt.

Ytbergartssekvenserna innehåller band och lager av mörka kvartsfattiga magmatiska bergarter (amfiboliter, omvandlad diabas och gabbro, < 53vikt% SiO₂). Amfibolitbanden uppträder oftast som mellan 1 och 5 dm breda deformerade, veckade och ofta avslitna lager (fig. 13B). Lokalt uppträder bredare, över två meter breda lager. I en av de arsenikanrikade profilerna (norra profilen, vägen mot Kimsta) uppvisar samtliga amfibolitiska lager kraftig arsenikanrikning på mellan 100 och 500 ppm. I kontaktzonen mellan en glimmerrik bandad bergart och amfibolit uppmättes en arsenikhalt på närmare 1 vikt% (8 350 ppm) och skikt anrikade på arsenikmineral kunde identifieras med blotta ögat i fält (fig. 14A).

Grovkorniga, fältspatrika gångar och körtlar av så kallad pegmatit är vanliga i området. Ställvis förekommer medelkorniga och finkorniga varianter, så kallade pegmatitgraniter och apliter. Lokalt uppträder övergångar mellan dessa bergartsled. I de arsenikanrikade stråken uppträder pegmatiter och apliter med förhöjda halter arsenik på mellan 20 och 800 ppm. I de grovkorniga pegmatiterna förekommer medel och grovkorniga arsenikmineral som kan observeras med blotta ögat i fält (fig. 14B). Vid byggandet av landningsbana 3 på Arlanda påträffades pegmatiter med upp mot 15 cm stora kakor av arsenikkis (fig. 14C). De arsenikanrikade pegmatiterna karaktäriseras av gråvit till vit fältspat och omfattande förekomst av vit glimmer samt en mindre mängd blågrön apatit och rosa granat. Däremot är mörk glimmer ovanlig. Det bor-förande silikatet turmalin förekommer ställvis i rikliga mängder och är ett annat karaktäristiskt mineral i de arsenikanrikade pegmatiterna. Gångarna är i genomsnitt mellan en och två meter breda och löper i nordnordostlig riktning i stora drag parallellt med den tektoniska lagringen i sidoberget (fig. 10). Det förekommer även gångar med annan orientering som klipper deformationsstrukturen i sidoberget.

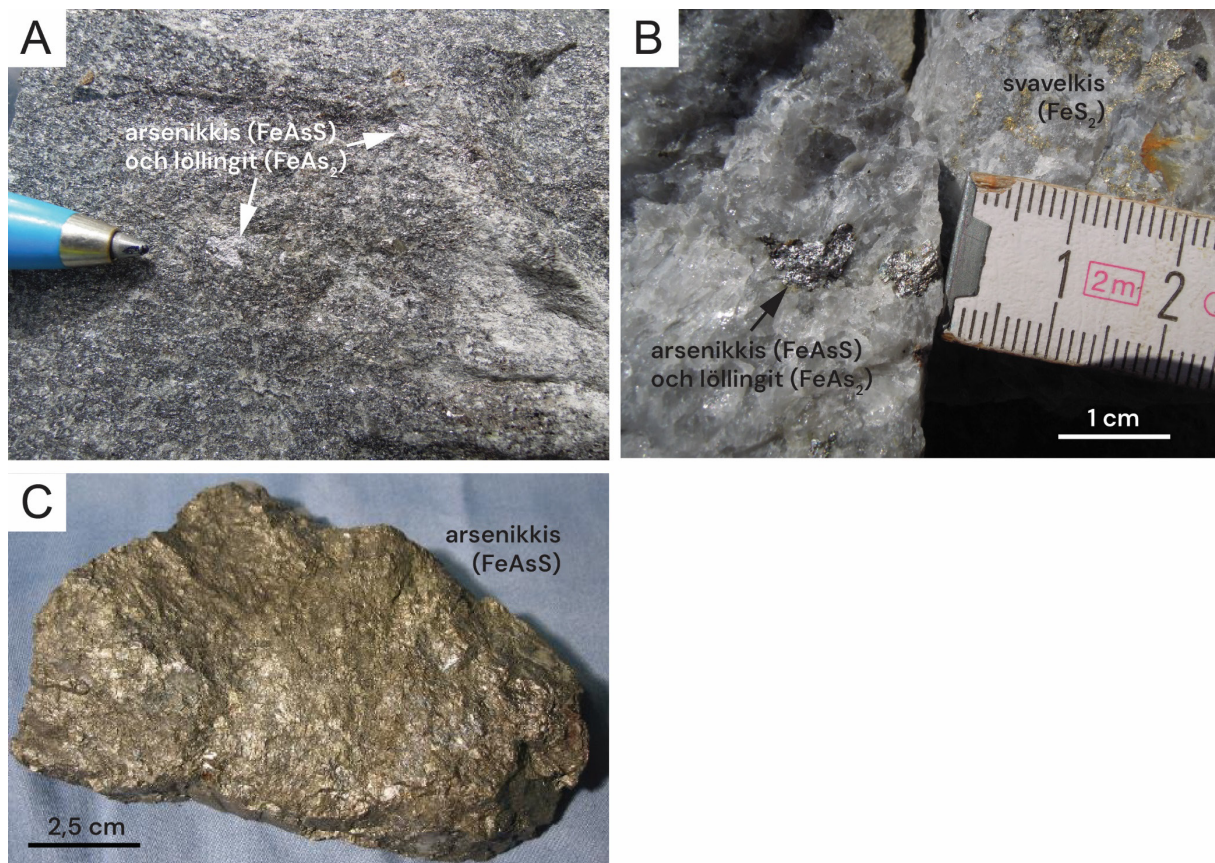


Figur 13. A. Heterogent arsenikanrikad vulkanisk bergart (prov 23PEV149A och **B** i klippande relation till åderbandning i skiffer av sedimentärt ursprung. **B.** Veckad och söndersliten kvartsfattig omvandlad gång (diabas) i ådrad glimmerskiffer av sedimentärt ursprung (prov JAN220002A). Foton: Paul Evins (A) och Jenny Andersson (B).

Förekomst av arsenikmineral

I bergarter med arsenikhalter över 500 ppm kunde arsenikmineral identifieras i fält (fig. 14A och B). I grovkorniga pegmatitiska bergarter uppträder medel till grovkorniga arsenikmineral som lätt kunde identifieras med blotta ögat (fig. 14B). Med hjälp av lupp kunde arsenikmineral även upptäckas i finkornigare bergarter, till exempel i amfiboliter. I de finkorniga sedimentära bergarterna kunde arsenikmineral endast identifieras i kraftigt anrikade enheter (> 5 000 ppm).

Förekomst av arsenik i form av sulfid (arsenikkis, FeAsS) eller arsenid (löllingit, FeAs_2) kunde identifieras vid malmmikroskopering. Efter optisk mikroskopering valdes prover ut för vidare analyser med svepelektronmikroskopi för bestämning av arsenikmineralens sammansättning och texturella kontext. I samtliga prover förekom arsenik både som sulfid (arsenikkis) och som arsenid (löllingit). Arsenikmineralen uppträdde i korngränser och inte som inneslutningar i andra silikat (fig. 15). Arsenikkis var det dominerande arsenikmineralet men arsenid var också relativt vanligt förekommande. I bergarter av både sedimentärt och magmatiskt (amfibolit) ursprung förekom arsenid både som friliggande mineral och associerat med arsenikkis. Den senare vanligtvis med en mantel av arsenikkis, ställvis även med en ytterligare påväxt av ren järnsulfid (fig. 15, magnetkis, $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$). Det texturella förhållandet där kärnor av arsenid är omslutna av arsenikkis var vanligt förekommande, men proportionerna mellan arsenikkis och arsenid kunde variera stort i samma bergart. I bergarter av sedimentärt ursprung kunde förekomsten och proportionerna mellan arsenid och arsenikkis variera i mikroskala mellan olika lager i bergarten.



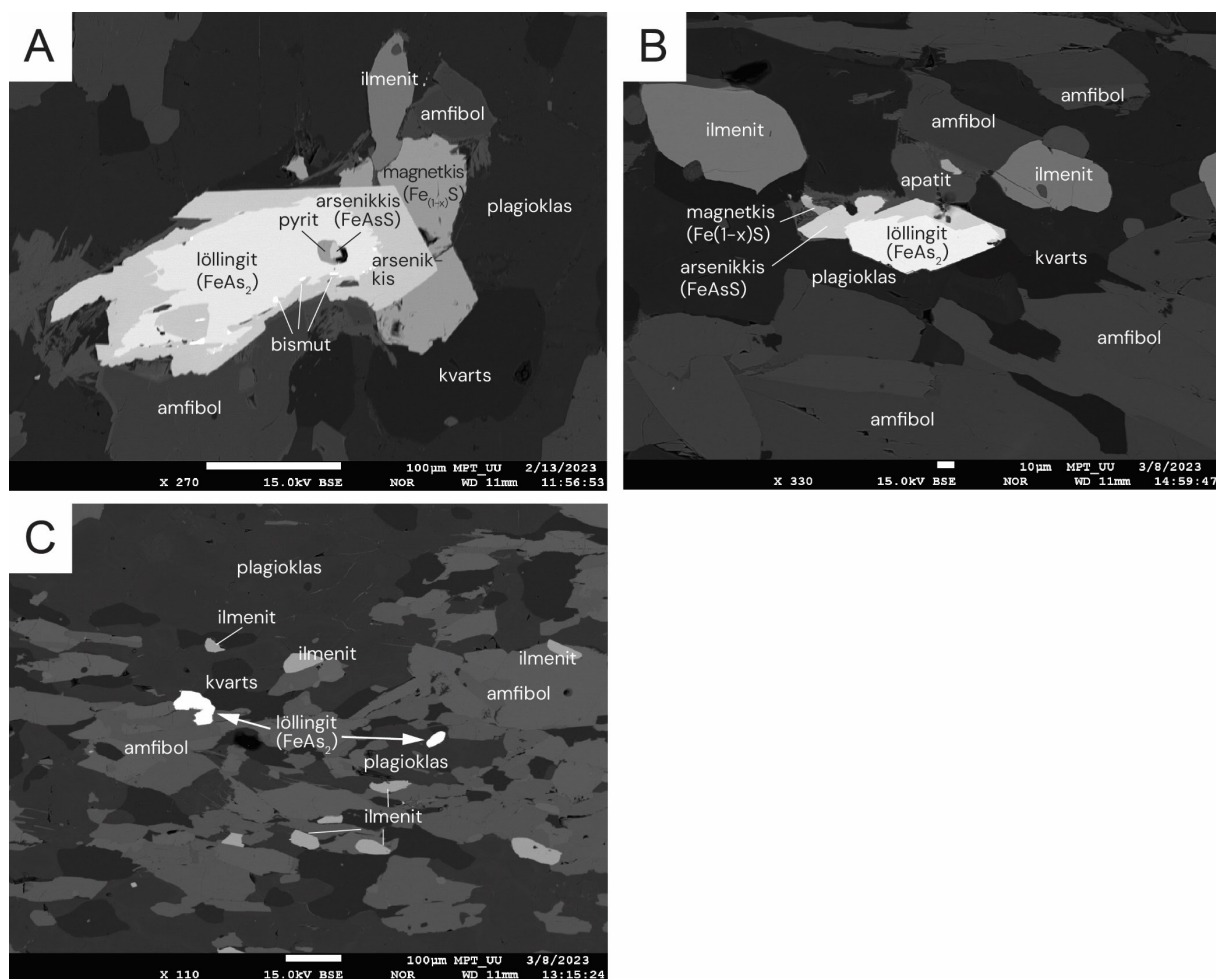
Figur 14. Arsenikmineral i berggrund på och omkring Arlanda flygplats. **A.** Silverglänsande arsenikkis (FeAsS) och löllingit (FeAs_2 ; pilar) i finkornig grå bergart av sedimentärt ursprung i väghäll vid vägen mellan Arlanda och Kimsta. Totalhalten av arsenik i bergarten uppgick till drygt 8 800 ppm. **B.** Arsenikkis och löllingit (silverglänsande) och svavelkis (FeS_2) i grov kvarts-fältspatrik pegmatitgång i Uppsalagranit nära Arlanda bana 3. **C.** Kaka av arsenikkis från pegmatitgång vid Norrskogen, Arlanda. Provtagen vid bygget av bana 3 på Arlanda. Foton: Jenny Andersson (A och B), Per Nysten (C).

Slutsats Arlanda-Rosersbergsområdet

I Arlanda-Rosersbergsområdet uppträder kraftigt arsenikanrikad berggrund i 500–1 500 m breda stråk som följer den nordnordostligt brant stående tektoniska strukturen i området. I dessa zoner är flera olika bergartsled anrikade på arsenik i bergarter av både sedimentärt och magmatiskt ursprung. Undantaget är kvartsrika magmatiska bergarter (graniter och granitoider) som genomgående har låga arsenikhalter både inom och utanför de arsenikanrikade zonerna. Utanför de arsenikanrikade zonerna befanns arsenikhalten vara genomgående låg i samtliga bergartsled, med undantag för enstaka lager i ytbergartssekvenser som kan uppvisa något förhöjda arsenikhalter (10–50 ppm).

Zoner i berggrunden med förhöjda halter arsenik uppvisar även hög frekvens av kontamination av grundvatten i bergborrade brunnar (fig. 16). Angränsande berggrund utan förhöjningar uppvisar ingen kontamination av grundvattnet.

För att undvika att skapa nya föroreningsområden vid exploatering av berggrund i Arlanda-Rosersbergsområdet krävs kontroll över var och hur zoner med kraftigt arsenikanrikad berggrund uppträder.



Figur 15. SEM-BSE-bilder av lager med kraftigt arsenikanrikade omvandlade kvartsfattiga bergarter (metagabbro) i förskiffrade sedimentära bergarter i Arlandaområdet. Bilderna illustrerar hur arsenikmineralen sitter i bergarterna och deras inbördes relationer. Samtliga prover kommer från en våghäll i en cirka 1,5 km bred arsenikanrikad zon mellan Arlanda och Kimsta. **A.** Prov JAN220010A: Kärna av löllingit med delvis välkristalliserad (euhedral) påväxt av arsenopyrit (apy) och ytterligare en nära euhedral påväxt av magnetkis. Notera förekomst av bismut i kontakten mellan arsenopyrit och löllingit. Denna textur indikerar tidigare större förekomst av löllingit då denna bismut troligtvis tidigare har suttit i löllingit. **B.** Prov JAN220010E: Nära prismatisk löllingit med kristallform karaktäristisk för löllingit och delvis mantlad av euhedral arsenopyrit. **C.** Prov JAN220010E (samma tunnslip som **B**). Ren löllingit i en grundmassa dominerad av amfibol, plagioklas, kvarts och ilmenit vilka utgör karaktäristiska huvudmineral i metagabbro i området, oavsett arsenikhalt.

Referensmaterial

Det finns referensmaterial för alla bergartsprover som har analyserats (fig. 3). I referensmaterialet ingår en handstuff, två olika fraktioner av restmaterial från geokemianalysen och ett tunnslip. Restmaterialet utgörs av ett större prov grovkrossat material (70 % < 2 mm i kornstorlek) och cirka 200 gram av ett finmalet pulver (85 % < 0,75 mm i kornstorlek). Allt referensmaterial kommer att levereras till SGU:s samlingar och vara tillgängliga för lån (tunnslip) eller för provtagning (bergprover och krossat och malet material).

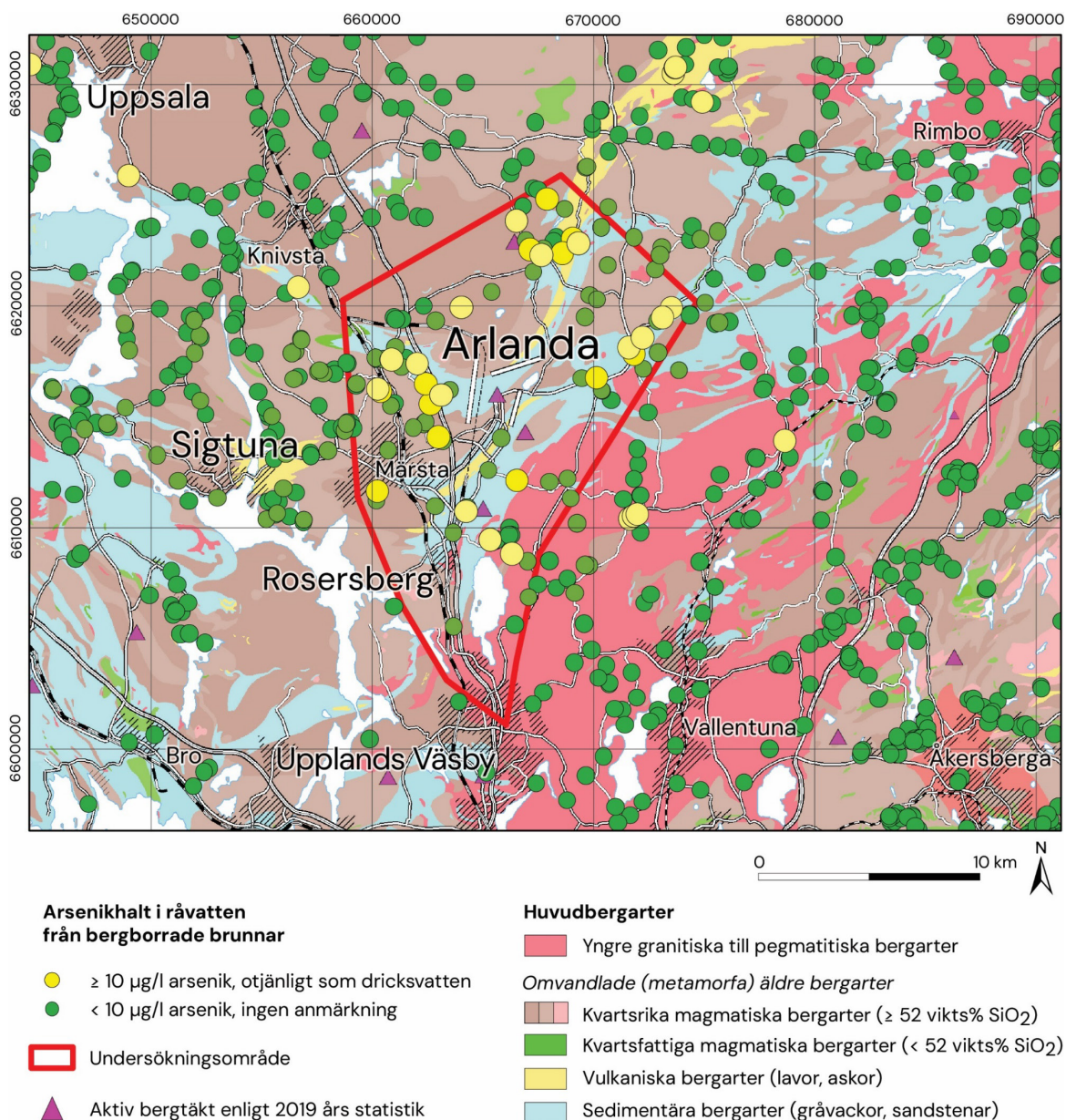
Rekommendationer för fortsatta insatser för kartläggning och riskbedömning av berggrund med naturligt höga bakgrundshalter av arsenik

Riskbedömning av bergmaterial med avseende på innehåll av miljöstörande ämnen som kan orsaka omgivningspåverkan vid bygg- och anläggningsarbeten kräver basinformation om berggrundens geokemiska sammansättning med koppling till dess texturella och mineralogiska egenskaper. På regional nivå saknas sådan information i stora delar av Sverige. Avsaknad av data är särskilt tydlig i områden utanför kända malmgenetiska stråk och i områden som kartlagts av SGU under 1960-, 70- och 80-talen då geokemiska analyser var alltför kostsamma att utföra i mer omfattande skala. Det senare förhållandet gäller till exempel i bygg- och anläggningsintensiva delar av Mälardalen. En heltäckande geokemisk kartläggning av den svenska berggrunden är ett resurskrävande och omfattande arbete som måste genomföras över tid och med ett långsiktigt målfokus. För att möta dagens efterfrågan på information krävs prioritering och fokusering av insatser. Det genomförda projektet är ett exempel på hur man på kort tid kan samla in data och information om var, hur och i vilken form arsenik sitter i berggrunden. Sådana insatser är resurskrävande, men kan fokuseras till geografiskt begränsade områden med akuta behov av underlag för riskbedömning. Sådana områden kan identifieras utifrån dokumenterad problematik med höga bakgrundshalter av arsenik, till exempel genom problem med höga arsenikhalter i bergmaterial eller i yt- och grundvatten.

Planering av insatser för kartläggning och riskbedömning görs med fördel i samråd med regionala och lokala tillsynsmyndigheter och aktörer inom bygg- och anläggningsbranschen med kunskap om specifika förhållanden och informationsbehov i undersökningsområdet. Dessa aktörer tar också fram mycket information i den egna verksamheten, till exempel genom undersökningar för miljöprovning eller egenkontroll av egna produkter som är av stort värde för kartläggningen.

Metodik vid provtagning och analys

Förutom geologiska egenskaper, beror risk för omgivningspåverkan från bergmaterial på olika faktorer som till exempel hydrologi, klimat, spridningsvägar, och biotillgänglighet. En grundförutsättning är anrikning av miljö- och hälsofarliga ämnen i berggrunden vilken är bergartsberoende. Provtagning för geokemisk analys är därför beroende av god bergartsbedömning och god förståelse för den geologiska kontext som den provtagna bergarten uppträder i. Är provet representativt för en större bergartsvolym? Är det en inneslutning, en gång eller ett lager? Var och hur sitter miljö- och hälsofarliga ämnen i berget? Vilka är värdmineralen för arsenik och andra potentiellt toxiska eller försurande ämnen och i vilken texturellt sammanhang uppträder de (kornstorlek, fördelning i bergarten, i matrix eller i zoner och sprickor?). Geologisk sakkunskap krävs för att provtagning och dokumentation ska utföras på ett sådant sätt att det går att spåra hur, var och vilken bergart som provtagits. Ju mer dokumentation som finns tillgänglig, desto bättre blir verktyget för jämförelser av reaktivitet hos olika bergarter. Vid bristfällig dokumentation uppnås ett statistiskt underlag för hur stor andel av ett bergartsled som uppvisar anrikning av till exempel arsenik. Underlag för att specifikt bedöma vilka bergartsled som uppvisar en anrikning och därmed vilka bergartsled som kan medföra en risk blir undermåliga. Till exempel, termen sedimentgnejs omfattar bergarter av sedimentärt ursprung som omvandlats till gnejs vid olika processer. Termen omfattar mineralogiskt och texturellt mycket varierande bergartsled med mycket stora olikheter i geokemisk sammansättning. Vid klassificering av en bergart endast som sedimentgnejs, utan vidare information om mineralsammansättning och textur, blir det omöjligt att utveckla kunskap om vilka sedimentgnejsar som kan medföra risk. För att resultat från geokemisk kartläggning ska vara användbara för identifikation av specifika bergartsled, som skulle kunna medföra potentiell risk för omgivningspåverkan, rekommenderas tillämpning av geologisk expertis för dokumentation av bergart vid provtagning.



Figur 16. Berggrundskarta över Arlanda-Rosersbergsområdet (SGU kartdatabas skala 1:1 miljon). Teckenförklaring som i figur 9. Notera hög frekvens av brunnar kontaminerade med avseende på arsenikhalt inom undersökningsområdet och avsaknad av kontamination i områden väster därom omkring Sigtuna stad.

För provtagning av processat bergmaterial, som till exempel ballastprodukter, finns rutiner som tagits fram av den finska geologiska undersökningen med specifikt fokus på arsenikanrikat berg (Hatakka m.fl. 2014, Parviainen m.fl. 2015).

De flesta bergartskemiska analyser utförs vid ackrediterade laboratorier enligt väl dokumenterade, spårbara och certifierade metoder. Detta är en stor fördel eftersom metodik som använts vid provberedning och analys är väl dokumenterad och spårbar. Ofta uppstår frågor om vilka analyspaket och vilka analyser som ska efterfrågas. Det är alltid en fördel att analysera så många grundämnen som möjligt. Detta eftersom det möjliggör tolkning av den geologiska miljön och bergartstypen. Av ekonomiska skäl begränsas dock ofta mängden ämnen som analyseras. Ibland är prisskillnaden mellan en för ett projekt anpassad analys av ett eller ett fåtal eller ett större antal grundämnen i ett färdigt analyspaket mycket liten. Fördelarna med att få ett större antal ämnen analyserade är stora och bör undersökas och övervägas vid beställning av analyser.

Central förvaltning av data

Det finns ett stort behov av en central förvaltning av geokemisk data. I områden där omgivningspåverkan från bergmaterial anrikade på miljö- och hälsofarliga ämnen har dokumenterats eller utretts vid miljöprovning har ofta analyser av berggrundens geokemiska sammansättning gjorts. I områden med stor efterfrågan på bedömningsunderlag för riskbedömning av bergmaterial har omfattande analysprogram utförts. Generellt utförs provtagning och analys av konsulter som avrapporterar till uppdragsgivaren i rapportform. Detta innebär att det genereras en stor mängd analysdata samtidigt som det saknas praxis för central förvaltning av data. Detta gör att data som skulle kunna användas i bedömningsunderlag inte är praktiskt tillgängliga. SGU har rutiner för att ta emot geokemisk data från externa aktörer som tillgängliggörs via SGU:s kartvisare för bergartskemi som hittas via www.sgu.se – sidan Kartor och 3D. Till exempel förvaltar SGU en stor mängd externa data för bergartskemi som under lång tid rapporterats in från prospekteringsinsatser. Dessa rutiner skulle vara fullt tillämpbara för förvaltning av bergartskemiska data som tagits fram vid undersökningar av berggrund inom bygg- och anläggningsverksamhet eller ballastproduktion. Att utveckla en praxis för inrapportering av bergartskemiska data till SGU även inom dessa verksamhetsområden är en resursmässigt begränsad insats som kan genomföras på kort sikt.

Framtida undersökningar av lakegenskaper och biotillgänglighet

Det genomförda projektet har visat att arsenik uppträder primärt bundet i både sulfid (arsenopyrit, FeAsS) och arsenid (löllingit, FeAs_2). Att arsenid var så vanligt förekommande var tidigare inte känt. Sulfiden och arseniden har olika oxidations- och lakningsegenskaper. Hur de uppträder i berggrunden har också betydelse för hur de kan exponeras för vittring, till exempel om de uppträder som grovkorniga aggregat, i sprickzoner eller finfördelat i grundmassan. Detta projekt har generat en stor mängd bergartskemiska data, totalt har 225 prover analyserats med full geokemisk analys (81 grundämnen och oxider) har gjorts för samtliga prover. För varje prov som analyserats finns dokumentation av provets mineralogi, petrografi och fältuppträdande. Det väl dokumenterade bergmaterialet kan användas för framtida studier av lakningsegenskaper och biotillgänglighet.

Behov av tvärvetenskapliga samarbeten och myndighetssamverkan

Riskbedömning av berggrundens potentiella omgivningspåverkan baseras inte bara på berggrundens geologi. Annan viktig information omfattar jordartsgeologi, hydrologiska förhållanden, (lakningsförhållanden), lakningsprocesser, spridningsvägar, toxicitet och biotillgänglighet. Vid bygg- och anläggningsarbeten kommer specifikt användningsområde för bergmaterialet och anläggningsteknik också att ha betydelse. Sammantaget innebär detta att riskbedömning behöver baseras på information från olika kompetensområden och att ta fram bedömningsunderlag kräver samverkan mellan olika tillsyns- och expertorganisationer.

Exempel på steg i denna riktning är att centrala myndigheter i Samordningsgruppen för nya potentiella kemikaliehot, SamTox, under 2024 satte ihop en diskussionsgrupp med fokus på farliga ämnen från berggrunden. Gruppen utgörs av ämnesspecialister från respektive myndighet som ska dela information och undersöka möjligheter till samarbete för att underlätta riskbedömning av bergmaterialens omgivningspåverkan. De myndigheter som i dag ingår i diskussionsgruppen är Naturvårdsverket, Kemikalieinspektionen, Trafikverket, Havs- och Vattenmyndigheten och Sveriges geologiska undersökning.

Det finns dock behov av vidare samverkan som inbegriper aktörer på bygg- och anläggningssidan, konsulter, och bergmaterialindustri liksom experter och handläggare på tillsynsmyndigheter. Etablering och underhåll av nätverk för informationsspridning mellan olika aktörer är viktigt för att kunna identifiera och prioritera behov av kartläggningsinsatser. Breda nätverk är även en viktig kontaktyta för samarbete mellan olika kompetensområden.

Förutom samverkan krävs ett aktivt samarbete mellan olika expertkompetenser i form av gemensamma samarbetsprojekt. Dessa bör även involvera tydliga forskningsinsatser.

Referenser

- Frank, E., 2021: *A statistical approach for identification of chemical groupings of elements in Swedish rocks with special focus on arsenic and sulphur*. Magisteruppsats, 20 credits/30 HE credits. Uppsala universitet, 29 s.
- Hatakka, T., Backman, B., Tarvainen, T., Härmä, P., Ketola, T., Kuula, P. & Reinikainen, J., 2014: Sampling and Analysis - Guidelines for aggregate production and construction sites in areas with elevated arsenic concentrations. Report: Sampling and analysis. <http://projects.gtk.fi/ASROCKS_ENG/guidelines/aggregate_production/> Åtkommen 20240604.
- Hildebrand, L., Ripa, M., Reginiussen, H. & Göransson, M., 2009: Slutrapport. Positive List för Restmaterial. Inventering av befintligt material. *Rapport nr 3.2a:01. MinBas II, 2009*.
- Masuda, 2018: Arsenic cycling in the Earth's crust and hydrosphere: interaction between naturally occurring arsenic and human activities. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5, 1-11.
- Maxe, 2021: Vattenkvalitet enskilda brunnar – dataunderlag. *SGU-rapport 2021:10*. Sveriges geologiska undersökning, 24 s.
- Naturvårdsverket, 2010: Återvinning av avfall i anläggningsarbeten, *Naturvårdsverkets handbok 2010:1*.
- Parviainen, A., Loukola-Ruskeeniemi, K., Tarvainen, T., Hatakka, T., Härmä, P., Backman, B. & Luoma, S., 2015: Arsenic in bedrock, soil and groundwater—the first arsenic guidelines for aggregate production established in Finland. *Earth-Science Reviews*, 150, 709–723.
- Rollinson, H., 1993: *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific & Technical sampublicerad med John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Sjöström, H. & Bergman, S., 1998: *Svecofennian Metamorphic and Tectonic Evolution of East Central Sweden: Forskningsrapport, Svekofennisk metamorf och tektonisk utveckling i östra mellansverige*. Uppsala universitet. Sveriges geologiska undersökning.
- Skoog, K., Andersson, J. & Majka, J., 2022: Petrography of arsenic-bearing metasupracrustal rocks in the Arlanda area. In: Bergman Weihed, J., Johansson, Å. & Rehnström, E. (Eds.): Geological Society of Sweden, 150 year anniversary meeting, Uppsala, August 17–19 2022, Abstract volume. *Geologiska Föreningen Specialpublikation 1*, 380–381.
- Stålhös, G. & Sukotjo, S., 1983: Beskrivning till berggrundskartan Strängnäs 10H SO. *Sveriges geologiska undersökning Af 142*, 78 s.
- Stålhös, G., 1982: Berggrundskartan Strängnäs 10H SO. *Sveriges geologiska undersökning Af 142*.
- Stålhös, G., 1991: Beskrivning till berggrundskartorna Östhammar NV, NO, SV, SO med sammanfattande översikt av basiska gångar, metamorfos och tektonik i östra Mellansverige. *Sveriges geologiska undersökning Af 161, 166, 169, 172*.
- Södertälje kommun, 2021: Miljökontoret Ärendenummer MIL.2020.43681, Beslut DB § 2021-280.
- Taylor, S. R. & McLennon, S. M., 1985: *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford aoj: Blackwell Science Publications.