

EKONOMISK REDOVISNING TILL NATURVÅRDSVERKET AVSEENDE PROJEKTET  
”FRAMTAGANDE AV UNDERLAGSDATA FÖR TILLSYNSVÄGLEDNING I  
OMRÅDEN MED NATURLIGT HÖGA HALTER AV ARSENIK I BERGGRUNDEN”.

*Kunskapshöjande åtgärd för att motverka skapandet av nya förorenade områden*

---

oktober 2024

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

SGU Diarienummer: 311–2472/2022

Naturvårdsverkets ärendenummer: NV-08911-22



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, Per Nysten,  
SGU.

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

Granskad av:

Ansvarig enhetschef:

Sveriges geologiska undersökning

Box 670, 751 28 Uppsala

tel: 018-17 90 00

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

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

## **FÖRTYDLIGANDE**

Denna rapport är ämnad som ekonomisk redovisning för projektet ”Framtagande av underslagsdata för tillsynsvägledning i områden med naturligt höga halter av arsenik i berggrunden. Kunskapshöjande åtgärd för att motverka skapandet av nya förorenade områden” (Naturvårdsverkets ärendenummer: NV-08911-22). En reviderad version av rapporten kommer att publiceras av SGU där avsnitten om ekonomisk redovisning inte ingår.

## 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, platåbergen 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 (figur 1). Avsaknad av ekonomiska intressen i den icke mineraliserade berggrunden gör att den arsenikanrikade berggrunden i dessa delar av Sverige är dåligt känd.

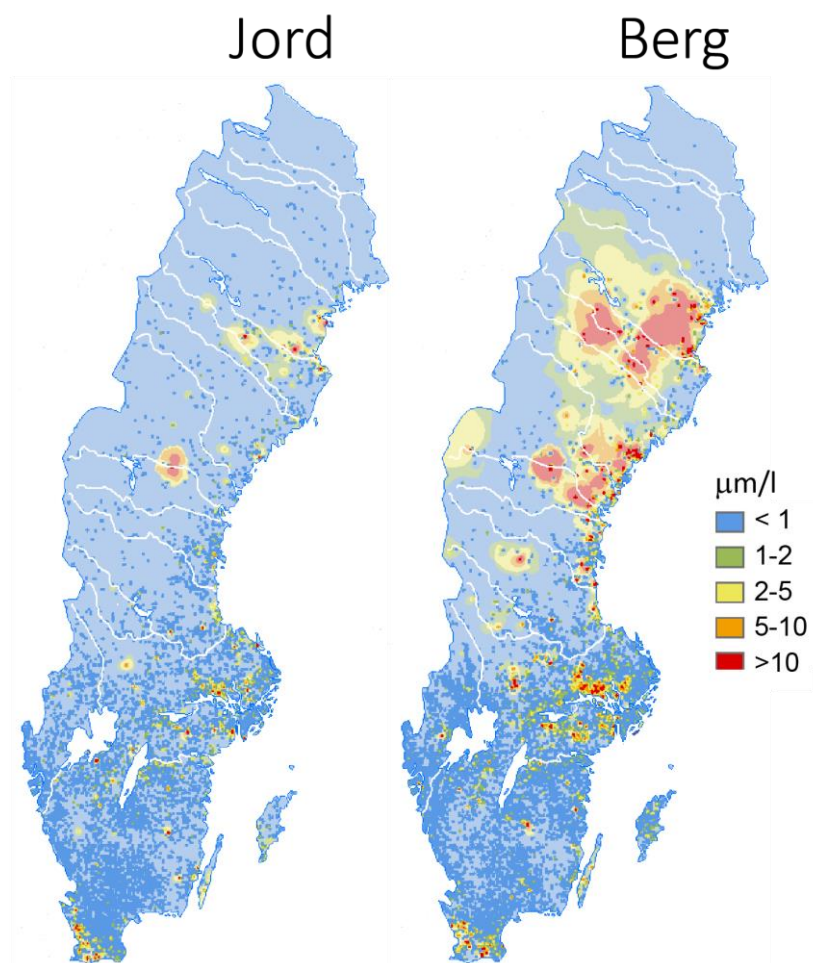
Bygg- och anläggningsverksamhet och ballastproduktion i arsenikrik berggrund kan medföra risk för människors hälsa och miljön genom kontamination av yt- och grundvatten. Sådan verksamhet kan även skapa nya förorenade områden vid införsel av arsenikrikt bergmaterial i områden med låga bakgrundshalter. 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 mobilisera arsenik.

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 handläggartöd. 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 (figur 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.

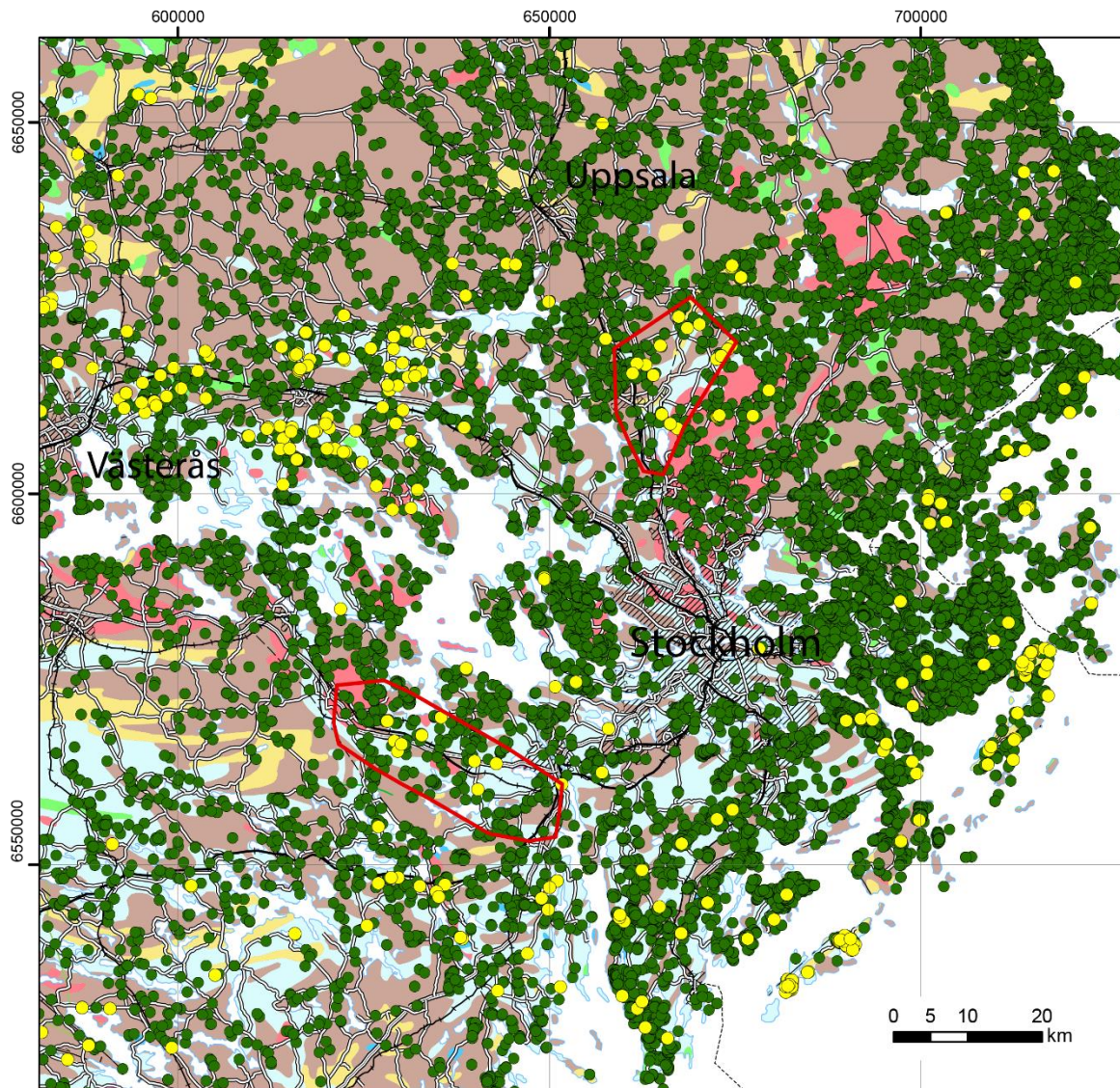
Projektet har bedrivits mellan 2023-01-01 och 2023-12-31. Naturvårdsverket har finansierat upparbetade löne- och driftskostnader för projektet fram till 2023-12-01. Under december 2023 har SGU finansierat lönekostnader för databasleveranser och tillgängliggörande av data och information. Under år 2023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



**Figur 1.** Arsenikhalt i grundvatten från enskilda brunnar (ofiltrerat råvatten). Karta gjord med interpolering (Inverse Distance Weighting; Maxe 2021). Områden med större avstånd än tre kilometer till närmsta provplats (brunn) visas i svagare färg. Observera brist på underlagsdata i de nordliga länen.

## PROJEKTREDOVISNING OCH EKONOMI

Projektet har genomförts enligt plan och enligt budget. En mindre omfördelning av kostnader har gjorts mellan kostnader för lön och kostnader för drift (se tabell 1). På grund av två föräldraledigheter omfördelades arbetsuppgifter mellan forskare på Uppsala universitet, på SGU och mellan geokonsulter. Detta medförde minskade lönekostnader motsvarande 256 245 kr (6,4% av projektets totala budget). Motsvarande summa förlades på ökade analyskostnader, där den största posten utgjordes av kostnader för elektronmikroskopanalyser på Uppsala universitet där även lön till operator ingick. Under projektets gång gjordes även omfördelning av kostnader för fältarbete och analys. Efter halva projekttiden stod det klart att förekomst av arsenikanrikad berggrund i det södra undersökningsområdet mellan Mariefred och Södertälje var begränsad till enstaka bergartsled, medan arsenikförekomsten i Arlandaområdet var mer omfattande och komplex. Därför fokuserades en större del av undersökningarna till Arlandaområdet varpå kostnader för fältarbete (logi, drivmedel, traktamenten) blev lägre än ursprunglig kalkyl. Minskade kostnader för fältarbete omfördelades till ökad provtagning och analys av bergmaterial.



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 kartdatabas, skala 1:1M) med arsenikdata från ofiltrerat råvatten från bergborrade enskilda brunnar (Maxe, 2021). Undersökningsområdena markerade som röda polygoner.

**Tabell 1.** Översikt av projektets budget och fördelning av kostnader inom projektet samt förändringar av fördelning av kostnader jämfört med ursprunglig plan.

<b>LÖNER</b>	<b>Budget</b>	<b>Förbrukat</b>	<b>Avsteg från plan</b>	<b>Kommentar</b>
Lön SGU	1649200	2084699	-435499	
Lön Uppsala universitet (UU)	1900000	890782	1009218	
Lön WSP	480000	629799	-149799	
Lön AFRY	0	140920	-140920	
Lön Volcanic Resources AB	0	26755	-26755	
<b>Löner totalt</b>	<b>4029200</b>	<b>3772955</b>	<b>256245</b>	Lägre OH-påslag, föräldraledigheter, lön i analyskostnad
<b>DRIFT</b>	<b>Budget</b>	<b>Förbrukat</b>	<b>Avsteg från plan</b>	<b>Kommentar</b>
Fältarbete (23 veckor, hyrbil, drivmedel, traktamente)	229000	76433	152569	Överskott p.g.a. fokus Arlanda
Skyddsutrustning (provhantering)	0	12236	-12236	Höga halter av As (0,5-1 %), frakt av prover
Petrografi-mineralkemi [247 (200) mikroskoppreparat]	168000	428629	-260629	Lön för operator av elektronmikroskop ingår
Totalkemi, bergartsprov [225 (200) analyser]	200000	317249	-117249	Fler analyser + transport 2,5 ton provmaterial
Externinformation	0	18698	-18698	Biljetter, exkursioner, konferensavgifter
<b>Driftskostnader totalt</b>	<b>597000</b>	<b>853245</b>	<b>-256244</b>	
<b>Anslag totalt</b>	<b>Budget</b>	<b>Förbrukat</b>	<b>Avsteg från plan</b>	<b>Kommentar</b>
Totalt anslag Naturvårdsverket	4626200	4626200	0	
Totalt anslag SGU (lön, tillgängliggörande databaser)	190000	190000	0	
<b>Total projektbudget</b>	<b>4816200</b>	<b>4816200</b>	<b>0</b>	

**Tabell 2.** Redovisning av projektgruppens sammansättningar med förändringar av projektbemanning utifrån föräldraledigheter.

Medverkande	Organisation/ anställning i projektet	Roll i projektet och expertområde	Aktivitet i projektet, 100% av heltid.	Kommentar
Jenny Andersson (projektledare)	SGU/SGU	Kartläggning, geokemi, petrografi, ballastfunktionalitet.	65%	Mer aktivitet i projektet (75%), ersättare föräldraledigheter
Mattias Göransson	SGU/SGU	Ballastfunktionalitet, bergmaterialproduktion.	25%	Enligt plan
George Morris	SGU/SGU	Geokemi, geokemisk analys, lakning. Ansvarig för SGU:s geokemiska laboratorium.	<5%	Enligt plan
Cecilia Jelinek	SGU/SGU	Tolkningsgeofysik, geofysiska kartunderlag	6%	Enligt plan
Per Nysten	SGU/projektanställd SGU	Mineralogi, malmgeologi, arsenikmineraliseringar.	25%	Enligt plan
Iwona Klownowska	Uppsala universitet/SGU	Kartläggning, petrologi, termodynamisk modellering.	65%	Enligt plan
Pauline Jeanneret	Uppsala universitet/SGU	Kartläggning, petrologi, geokemi, strukturgeologi.	60%	Föräldraledig*)
Paul Evins	Stockholms universitet, WSP/konsult	Kartläggning, geokemi, strukturgeologi, sulfidberg i Mälardalen.	30%	Mer aktivitet (35%), ersättare föräldraledigheter
Rodney Allen	Volcanic Resources AB/konsult	Mineraliseringar, malmgeologi, vulkanologi, sedimentologi, Bergslagens berggrund.	<5%	Enligt plan
Daniel Buzcko (doktorand, labbtekniker)	Uppsala universitet	Elektronmikroskopi, petrografi, geokemi	30%	Ersättare för föräldraledigheter, operator elektronmikroskop.
Emelie Bender	WSP	Kartläggning, petrologi	20%	Ersättare för föräldraledighet. Senare föräldraledig fr.o.m. juli 2024.
Mattias Bergsjö, Scott Green, 4-årsstudenter	Uppsala universitet	Provberedning, fältarbete	10%	Ersättare för föräldraledigheter.



## RIKTVÄRDE FÖR BERGGRUNDENS ARSENIKHALTER

I denna rapport hänvisas låga halter arsenik till halter 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 (ref. Taylor & McLennan, 1985). Arsenikhalten kan dock variera mycket mellan olika bergarter (Masuda, 2018). Granitiska bergarter (kvartsrika magmatiska bergarter) har generellt mycket låga halter medan kvartsfattiga magmatiska bergarter kan vara förhöjda. Skiffrar och i synnerhet alunskiffrar och svartskiffrar kan ha mycket förhöjda halter. 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 4910 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 och omfattar endast en liten andel bergarter av sedimentärt ursprung (Frank, 2021).

## 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 lokaler 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. 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 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 mineral kemi och mikrotexturer. Elektronmikroskopi utfördes på Uppsala universitet med

fältemissionsmikrosonden Electron Probe Microanalyzer (JXA-8530F JEOL SuperProbe), med utrustning för både våglängdsdispersiv och energidispersiv analys och sekundära (SE) och reflekterande elektrondetektorer (BSE). Elektronmikroskopi krävdes för att åtskilja de arsenikförande mineralen arsenikkis (sulfid, FeAsS) och löllingit (arsenid, FeAs<sub>2</sub>).

### *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 ca 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 ca 5–10 cm långa pluggar med en diameter om 2 cm togs ut med borrh. Dessa prover har en provstorlek mellan 0,03–0,20 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 ca 250 gram till ett bergartspulver med en kornstorlek <75 µm. Uppslutning av proverna gjordes både i litiumboratsmäta, med fyra syror (salpetersyra, perklorosyra, saltsyra och fluorvätesyra) och i kungsvatten (svavelsyra och saltsyra). Uppslutning i litiumboratsmäta krävs för full uppslutning av robusta silikatmineral. Analyser av volatila element 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 huvudelement, det vill säga de element som är vanligast i jordskorpan, spårelement och volatila spårelement (arsenik, kadmium), samt kol, svavel och basmetaller. Huvudelementen anges som oxider och omfattar SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, FeO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (FeO<sub>total</sub>), MgO, MnO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, och P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

## **Data**

All geokemidata som samlats in i projektet finns fritt tillgänglig via SGU:s kartvisare för bergartskemi, <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-bergartskemi.html>.

## **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 (figur 3).



**Figur 3.** Dokumentation och referensmaterial från provtagningslokaler. A) Fotodokumentation av provtagningslokal i fält. B) Referensmaterial från totalgeokemisk analys med grovmalen (höger) och finmalen (vänster) fraktion. C) Referensstuff (handstuff), D) fotodokumentation av markerat utsnitt för mikroskoppreparat. E) Fotografi från optiskt mikroskop av mikroskoppreparat.

## RESULTAT

Projektet har bedrivits under 11 månader som ett datainsamlingsprojekt med en intensiv provtagningskampanj riktad mot berggrundens arsenikinnehåll. Provtagning 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 resultat från fält och analysarbete med fokus på var och hur arsenik uppträder i de undersökta områdena. Vidare utvärdering och tolkning av data och information som projektet 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 forskningsarbeten mellan projektmedlemmarna vilka 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 förskiffrad. Undersökningarna indikerar dock att det inte bara är omvandlingsgraden som skiljer de båda utan även berggrunden ålders och ursprung.

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

### Resultat från område I: Mariefred-Södertälje

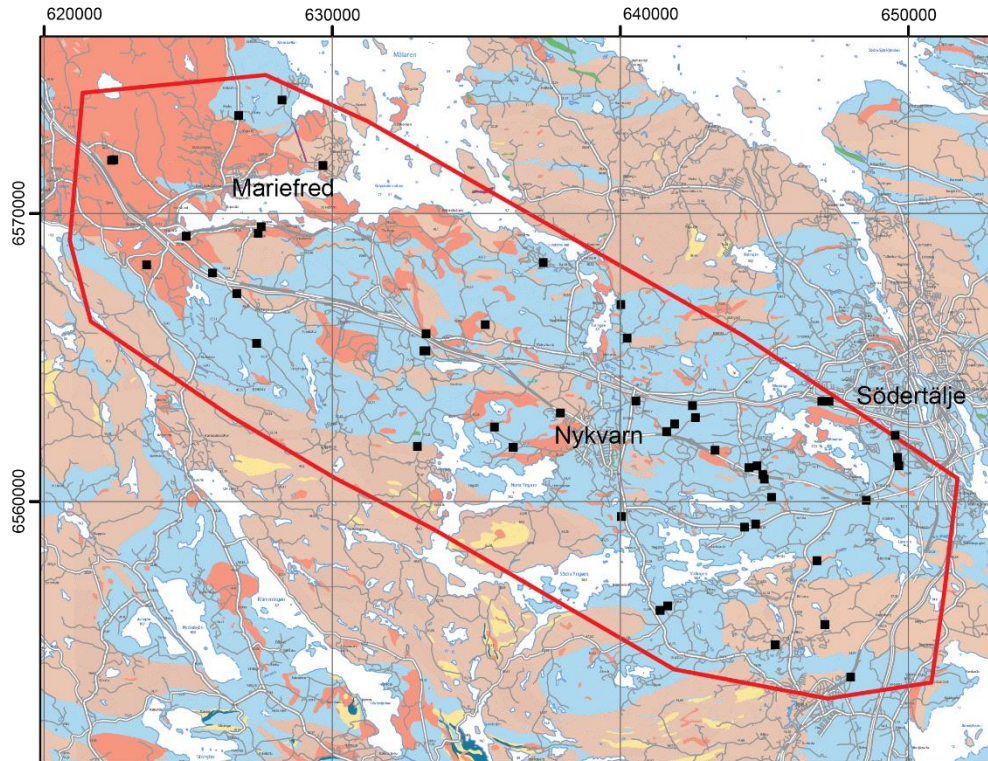
Berggrunden i området utgörs av ådergnejs av sedimentärt ursprung som injekterats av två generationer graniter, en äldre gnejsig generation och en yngre, mindre deformerad och kvartsfältspatrik generation som ställvis klipper den ådrade gnejsstrukturen i sidoberget (figur 4). Kvartsfattiga bergarter (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 (figur 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.

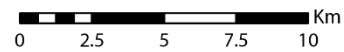
Mer information om berggrunden i området finns i beskrivningen till berggrundskartan Strängnäs SO (Stålhös & Sukotjo, 1983).

### Totalhalter av arsenik

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



#### Legend



- Provpunkt för totalgeokemisk bergartsanalys
- Diabas, 1600-910 miljoner år gamla
- Mälarsandsten, 1470-1270 miljoner år gammal
- Odeformerad till svagt deformerad 1830-1740 miljoner år gammal granit, pegmatitisk granit och likåldriga granitlika bergarter

#### **Deformerade, omkristalliserade och ådrade 1920-1870 miljoner år gamla bergarter**

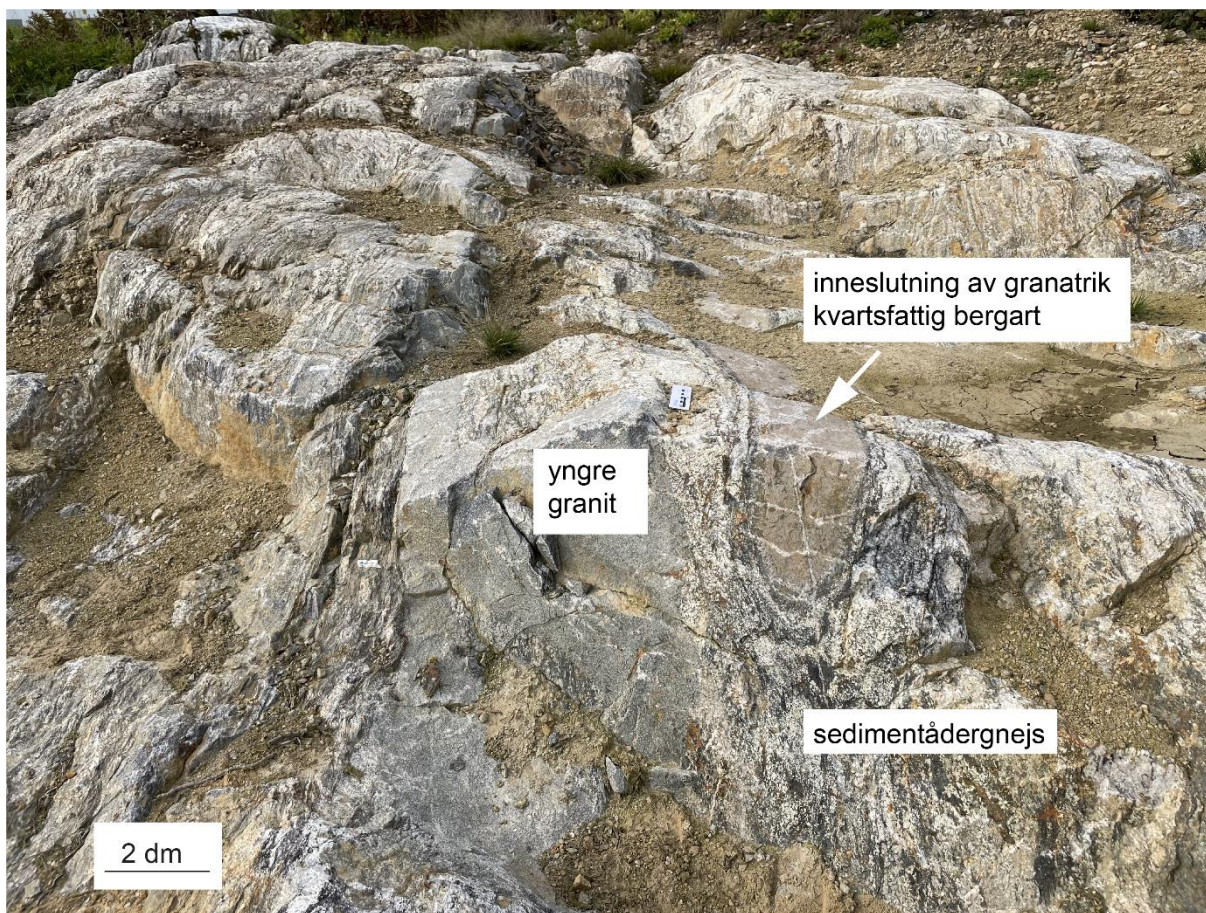
Gnejser bildade av magmatiska djupbergarter

- Granitiska och kvartsrika granitliknande bergarter
- Kvartsfattiga granitliknande bergarter (gabbro och diorit)

Gnejser bildade av ytbergarter

- Kvartsrika vulkaniska bergarter (dacit-ryolit)
- Kalksten
- Sedimentära bergarter (sandsten, lersten)

**Figur 4.** Berggrundsgeologisk karta över undersökningsområde I 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 lokaler som provtagits för analys av berggrundens geokemiska sammansättning.



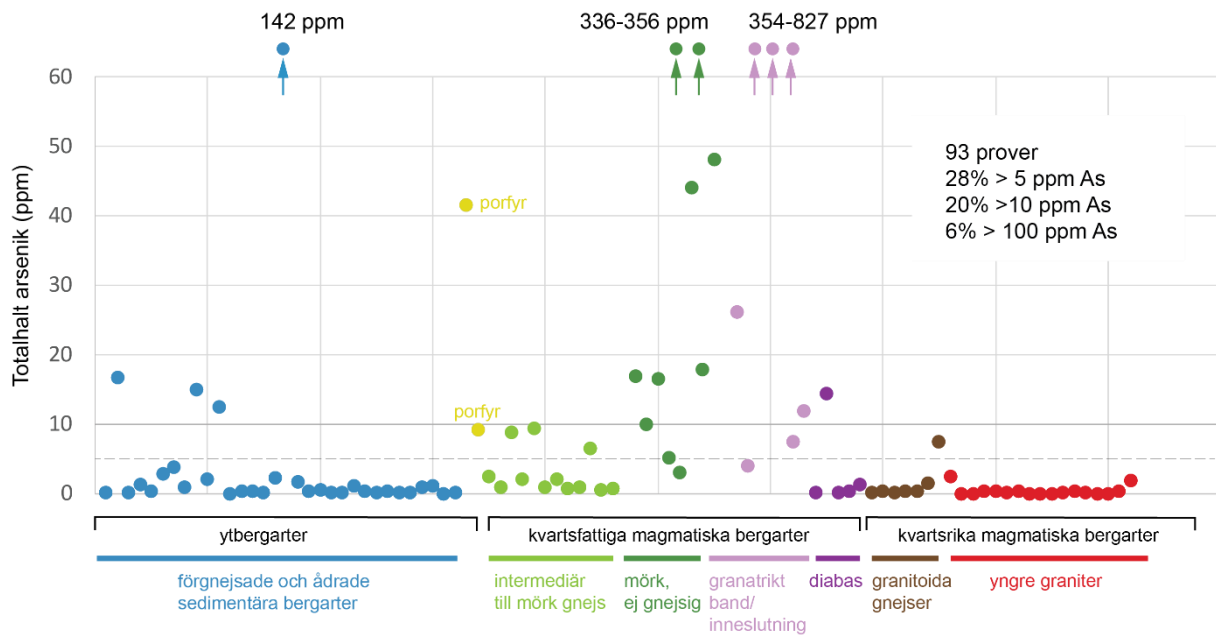
**Figur 5.** Representativt exempel på heterogen berggrund i Mariefred-Södertäljeområdet.

### *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 meter breda band i blottningar av ådergnejs som i övrigt inte uppvisat förhöjda halter av arsenik (figur 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 (figur 6). Den tredje vanligast förekommande bergarten, strukturellt äldre förgnejsade graniter och granitlika bergarter uppvisar inte heller några höga halter arsenik. Ingen analys uppvisar en halt 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.

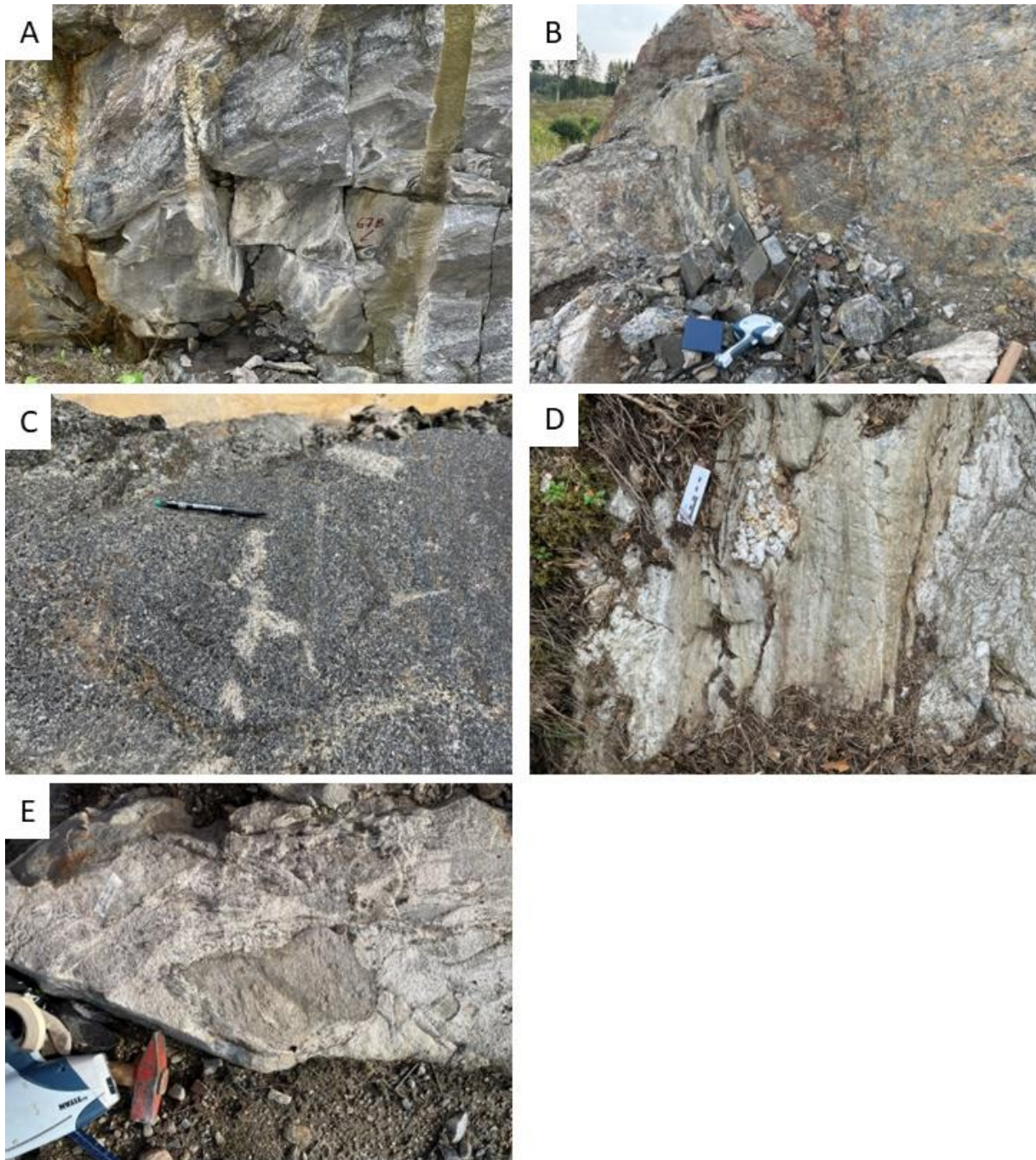


**Figur 6.** Totalhalt av arsenik i berggrunden i mellan Mariefred och Södertälje. Olika färger symboliserar olika bergartstyper. Den streckade linjen markerar halten 5 ppm.

#### *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 berggrundskartan (figur 4; Stålhös, 1983). Skivor, linser och gångar av omvandlade kvartsfattiga bergarter, så kallade amfiboliter, som ligger parallellt med deformationsstrukturen är relativt vanliga. De bildar generellt inga större sammanhängande enheter (<10 meter) och oftast mindre än 1 meter 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 (figur 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 lokaler 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, två prover uppvisar en kraftigt förhöjda halter på 336 och 356 ppm (figur 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 information om förhöjda halter arsenik i berget på platsen som tidigare rapporterats till SGU (Södertälje kommun, 2021). Den täta provtagningen inom det begränsade området visar stor variation av arsenikhalten. Hittills genomförda studier av bergartens fältutträdande, mineralogi och textur har i projektet inte kunnat tolkas för att prediktera förhöjningar av arsenikhalten.



**Figur 7.** A) Arsenikanriktat lager (142 ppm, prov JAN230067B) i sedimentådergnejs med något svagare ådring och högre halt mörka mineral än omgivande gnejs. Totalhalt av arsenik i berggrunden i mellan Mariefred och Södertälje. Olika färger symboliserar olika bergartstyper. B) Kraftigt arsenikanriktad (356 ppm) skiva av fältspat och kvartsfri magmatisk bergart i sedimentådergnejs utan arsenikanrikning (prov JAN230089B). C) Arsenikanriktad del av kvartsfattig järn-magnesiumrik magmatisk bergart (336 ppm, prov JAN230029A). D) Granatrik kvartsfattig gång i ådergnejs utan arsenikanrikning. E) Underordnad förekomst av kraftigt arsenikanriktad granatrik inneslutning i ådergnejs (827 ppm, prov JAN230019F).



Yngre diabasgångar (icke omvandlade magmatiska bergarter) är ställvis vanliga i området men sporadiskt förekommande. I det östra området uppträder unga diabaser ställvis i gångsvärmar men har inte observerats som dominerande bergart på någon av de lokaler 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.

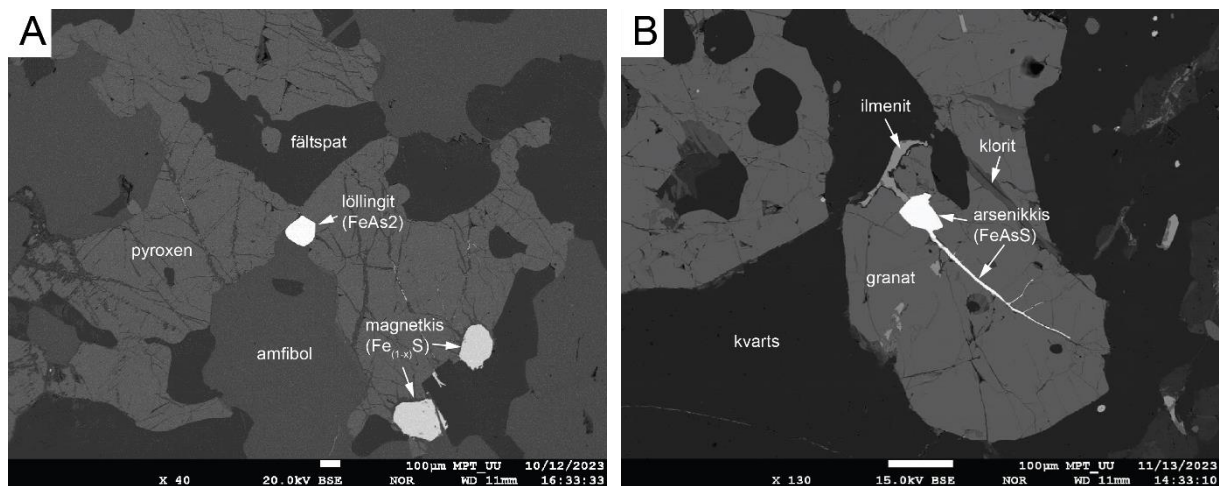
Gångar, skivor och inneslutningar av kraftigt omvandlade granatförande kvartsfattiga bergarter uppvisar i de flesta prover något till kraftigt förhöjda halter, upp till 827 ppm (figur 6 och 7C). Bergarten är volymmässigt mycket underordnad och uppträder oftast som enstaka  $\leq 1-5$  dm breda gångar eller linser (figur 7D och E). Denna bergartsförekomst har inte beskrivits vid tidigare kartläggning i området vilket indikerar endast begränsad förekomst [jämför Stålhös & Sukotjo (1983)]. Kraftigt förhöjda halter påträffades i finkorniga 1–5 dm breda linser av en gångbergart rik på medelkornig granat på en lokal (JAN230019, figur 7E). Efter att höga halter arsenik påträffats togs ytterligare två prov i samma enhet vilka båda uppvisade mycket förhöjda halter. Denna data indikerar att halten är genomgående hög i detta bergartsled. Bergarten är volymmässigt underordnad och sällsynt förekommande. Den påträffades endast på ett ställe under provtagningskampanjen.

#### *Fältspatporfyriska bergarter*

Underordnade förekomster av fältspatporfyriska bergarter har provtagits på två lokaler. Det ena provet som togs i en deformerad finkornig grå fältspatporfyrisk 0,5 till 1,5 meter 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 (figur 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,  $\text{FeAsS}$ ) eller arsenid (löllingit,  $\text{FeAs}_2$ ) kunde identifieras i optiskt mikroskop vid malmmikroskopering. Dessa mineral är mycket svåra att skilja åt med optisk mikroskopi. Ett urval av prover valdes ut för att bestämma arsenikmineralens sammansättning och deras texturella kontext med hjälp av elektronmikroskopi (elektron och våglängdsdispersiv spektrometri och back scattered elektronavbildning). Arsenik befanns uppträda både som sulfid (arsenikkis) och som arsenid (löllingit). Arsenikkis var vanligare men även löllingit var relativt frekvent förekommande. Arsenikmineralen uppträdde generellt som finkorniga singelkristaller, ca 100–200 mikrometer stora, i silikaternas korngränser (figur 8A). De hade ofta välutvecklade kristallstrukturer. I arsenikanrikad granatrik kvartsfattig inneslutning i sedimentådergnejs observerades arsenikkis även som sprickfyllnad i granat (figur 8B). Granat är ett omvandlingsmineral vilket visar att arsenik varit mobilt under omvandling av berggrunden som ägt rum under höga temperaturer (granulitfacies metamorfos).



**Figur 8.** Förekomst av arsenikmineral i omvandlade (metamorfa) arsenikanrikade kvartsfattiga magmatiska bergarter i Nykvarn-Järnaområdet. A) Ca 150 mikrometer stor löllingitkristall längs korngrens 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 sett 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 (figur 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 kvartsfattiga magmatiska bergarter, så kallad gabbro och diabas. Melkorniga linser utan tydliga gnejsstruktur (metagabbro) kan ställvis innehålla höga halter arsenik. Detaljerad provtagning av dessa indikerar mycket heterogen anrikning, från låga halter till något eller mycket höga halter av arsenik (figur 7B-E).

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

## Slutsats Mariefred-Södertäljeområdet

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

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

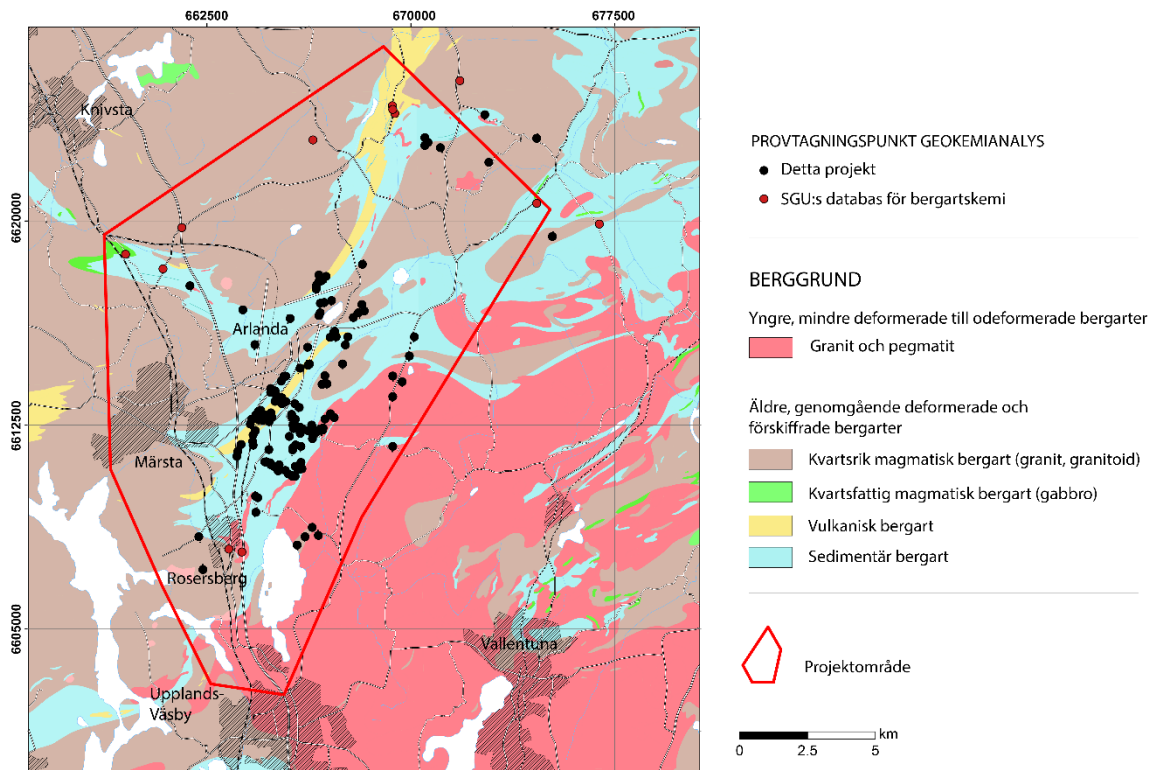
## Resultat område II: Arlanda-Rosersberg

Berggrunden i Arlandaområdet utgörs av sedimentära och vulkaniska enheter som intruderats av granitiska och granitlika djupbergarter (figur 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 har deformerades och metamorfoserades under medelhöga temperaturer och relativt låga tryck (ca 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-magnesiummineral (intermediära vulkaniter, andesitiska till dacitiska sammansättningar) och kvartsrika porfyrier av granitisk (ryolitisk) sammansättning typiskt för Bergslagens vulkanism utgör en mindre andel. Även de sedimentära bergarterna är kvartsfattigare och bortsett från enstaka skarnförekomster saknas horisonter med kalksten. Området har heller inga kända sulfidmineraliseringar som karakteriserar närliggande områden i Bergslagen och inga gruvor.

Berggrunden i undersökningsområdet är litologiskt mycket heterogen. Ofta uppträder två eller flera bergarter vid samma observationspunkt (figur 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 om 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 tillgängliga i SGU:s bergartskemidatabas. Eftersom berggrunden är heterogen har flera prover tagits på samma lokal och i anslutning till andra provtagningspunkter.

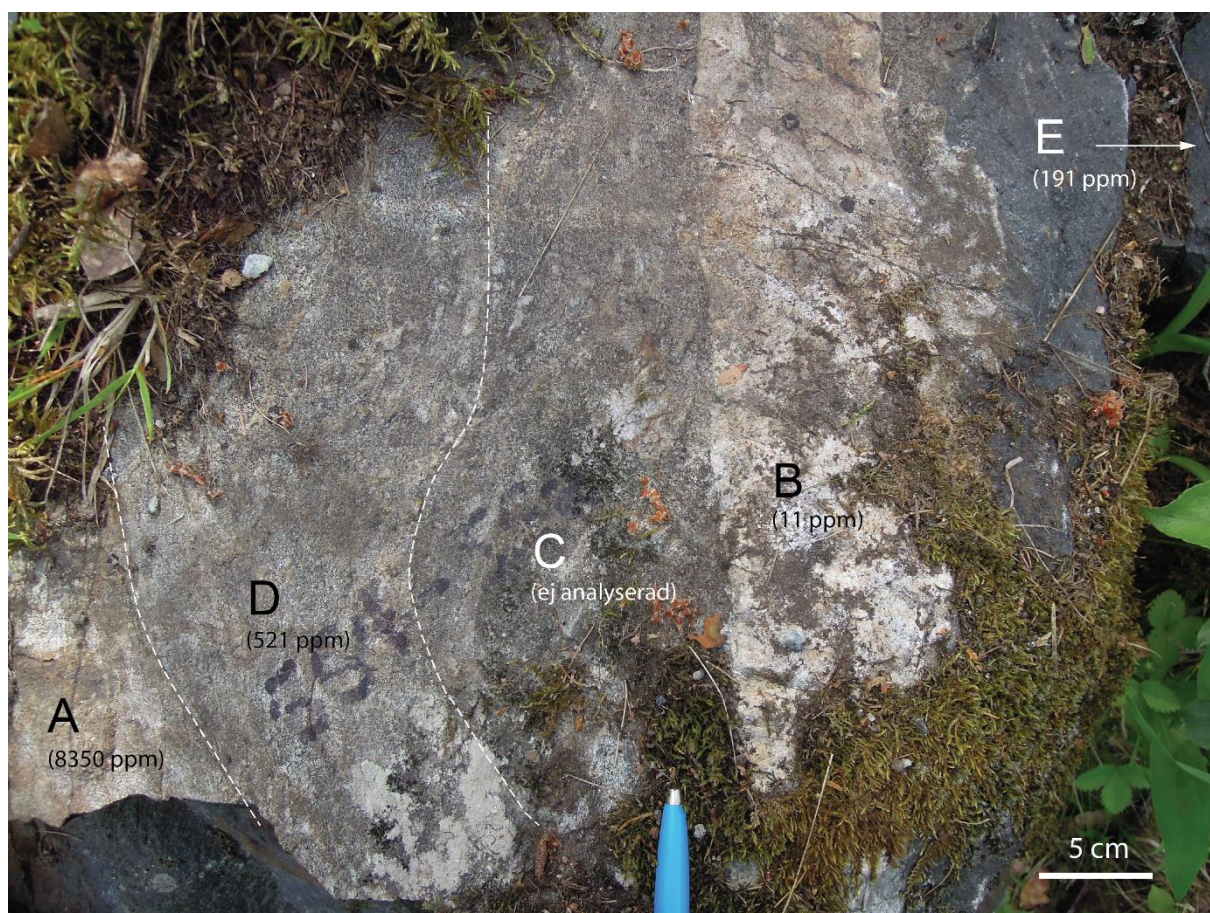


**Figur 10.** Fotografi av kraftigt deformerad och veckad ytbergartssekvens i Arlandaområdet som visar band av sedimentära bergarter (1) med invecklade omvandlade diabasgångar (2) och grovkorniga pegmatitgångar (3).

### Totalhalter av arsenik

Totalt gjordes 132 analyser av totalgeokemi. På grund av berggrundens heterogena sammansättning togs ställvis flera prov på samma lokal (se figur 11). Syftet var att undersöka hela bergmassans sammansättning. Resultat från geokemianalyserna visar att anrikning av arsenik i berggrunden uppträder i 500–1500 meter breda stråk inom vilka flera bergartsenheter uppvisar förhöjda halter (>10 ppm, figur 12). I dessa stråk är berggrunden ställvis kraftigt anrikad på arsenik med halter överstigande 100 ppm, ställvis över 1000 ppm. Utanför de arsenikanrikade stråken uppvisar samma bergartsenheter genomgående låga halter.

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.



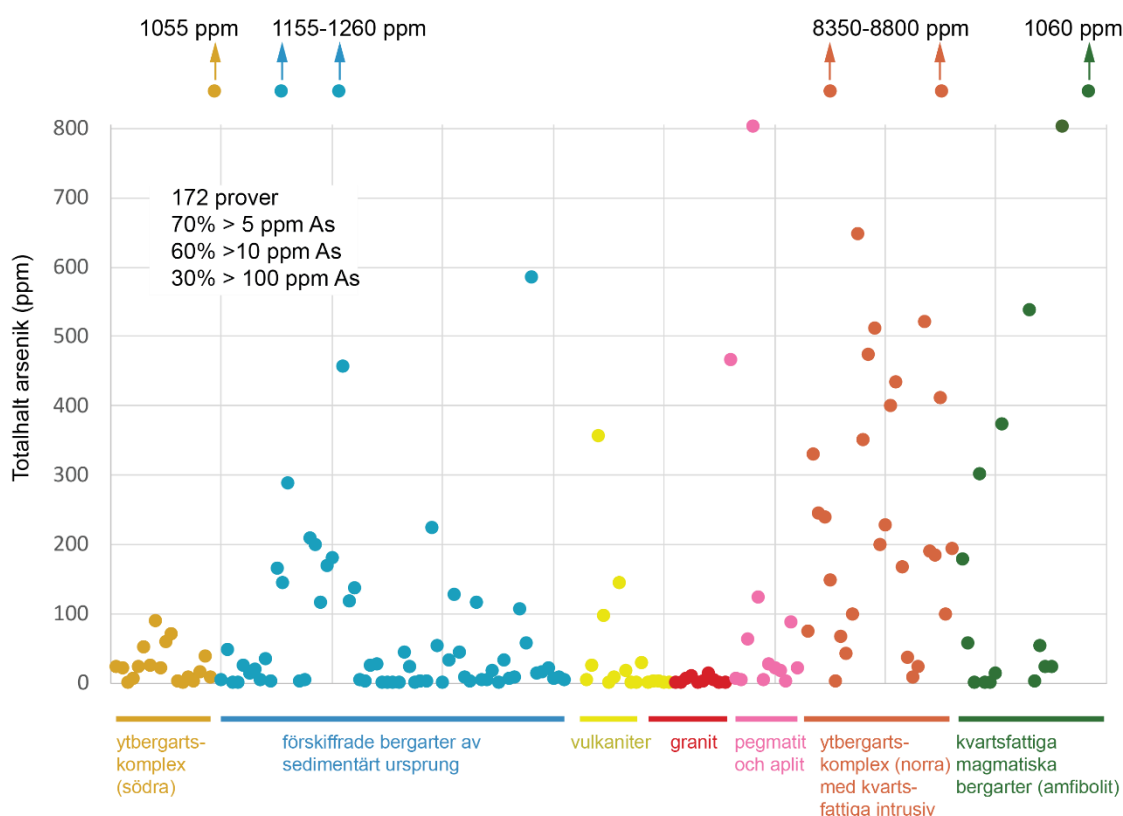
**Figur 11.** Kraftigt arsenikanrikad berggrund i mindre vägsärning längs vägen mellan Arlanda och Kimsta. Exempel på tät provtagning, totalt fyra analyser av totalkemisk sammansättning och sex prover för petrografisk analys längs en ca 1,5 meter lång profil (ProviD JAN220010A-E. Läge och prov-id anges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

### Kvartsrika bergarter av magmatiskt ursprung (granitiska och granitiska bergarter)

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

### Vulkaniska bergarter

Vulkaniska bergarter uppträder i huvudsak i en ca 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. 0,5 till mer än 5 meter 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 halt vilket kan indikera lokal arsenikanrikning i denna bergart (figur 13A).



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

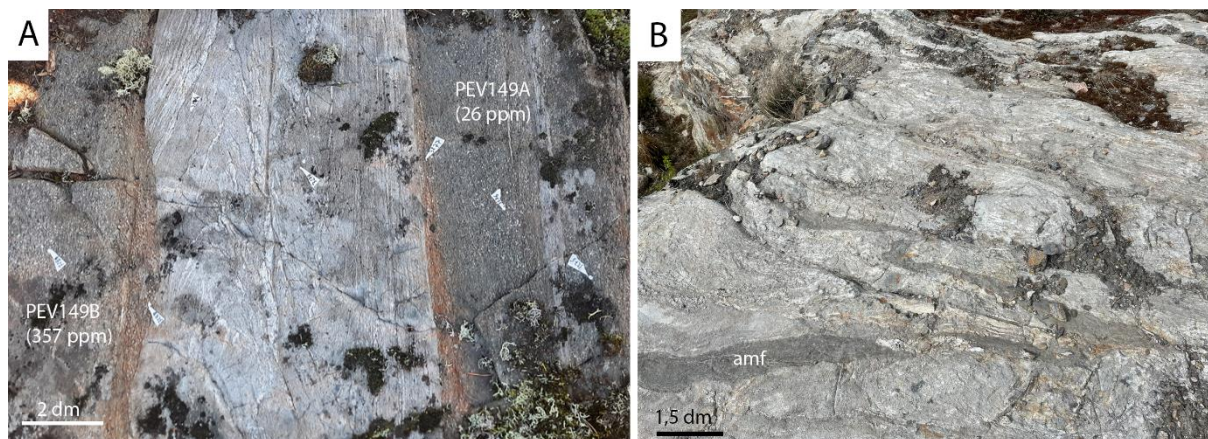
### *Arsenikanrikade ytbergartsstråk*

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% (figur 12). Längs den norra undersökningsprofilen (Kimstavägen) har 21 av totalt 28 bergartsprover en arsenikhalt över 100 ppm. I den södra profilen är halterna lägre med genomgående förhöjda halter mellan 20–100 ppm.

De arsenikanrikade ytbergartsstråken domineras av omvandlade sandstenar och lerstenar som skiljer sig åt genom kvarts-fältspathalt 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 millimeter i tjocklek. Glimmerrika 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% SiO<sub>2</sub>). Amfibolitbanden uppträder oftast som mellan 1–5 decimeter breda deformerade, veckade och ofta avslitna lager (figur 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% (8350 ppm) och skikt anrikade på arsenikmineral kunde identifieras med blotta ögat i fält (figur 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 20–800 ppm. I de grovkorniga pegmatiterna förekommer medel och grovkorniga arsenikmineral som kan observeras med blotta ögat i fält (figur 14B). Vid byggandet av landningsbana 3 på Arlanda påträffades pegmatiter med upp mot 15 cm stora kakor av arsenikkis (figur 14C). De arsenikanrikade pegmatiterna karaktäriseras av gråvit till vit fältspat och omfattande förekomst av vit glimmer samt en mindre mängd finns blågrön apatit och rosa granat. Däremot är mörk glimmer ovanlig. Förekomst av det bor-förande silikatet turmalin, ställvis i rikliga mängder, 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 (figur 10). Det förekommer även gångar med annan orientering som klipper deformationsstrukturen i sidoberget.



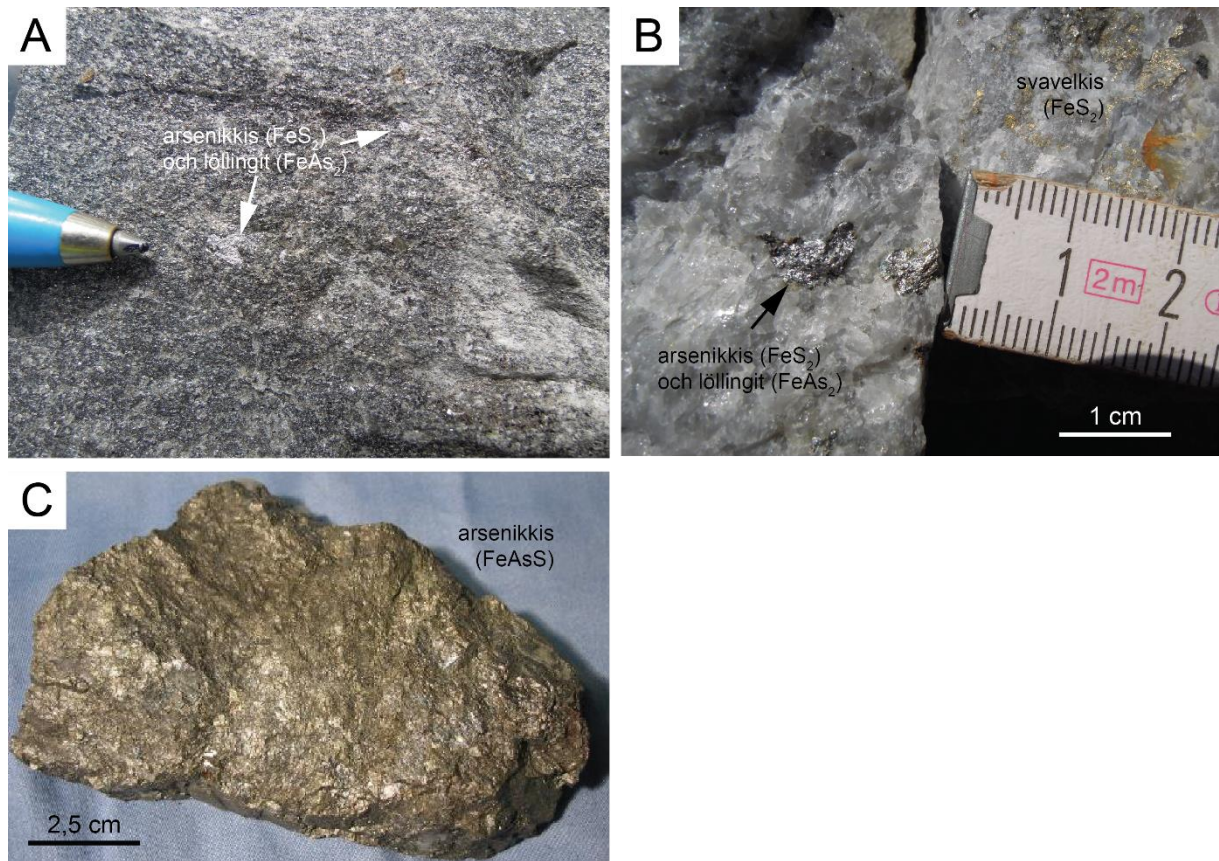
**Figur 13.** A) Heterogent arsenikanrikad vulkanisk bergart (prov 23PEV149A och B) i klippande relation till åderbandning i skiffer av sedimentärt ursprung. B) Veckad och söndersliten kvartsfattig omvandlad gång (diabas) i ådrad glimmerskiffer av sedimentärt ursprung (prov JAN220002A).

### *Förekomst av arsenikmineral*

I arsenikanrikade bergarter med halter över 500 ppm kunde arsenikmineral identifieras i fält (figur 14A och B). I grovkorniga pegmatitiska bergarter uppträder medel till grovkorniga arsenikmineral som lätt kunde identifieras med blotta ögat (figur 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 (>5000 ppm).

Förekomst av arsenik i form av sulfid (arsenikkis,  $\text{FeAsS}$ ) eller arsenid (löllingit,  $\text{FeAs}_2$ ) kunde identifieras vid malmmikroskopering. Efter optisk mikroskopering valdes prover ut för bestämning av arsenikmineralens sammansättning och texturrella kontext med elektronmikroskopi. I samtliga prover förekom arsenik både som sulfid (arsenikkis) och som arsenid (löllingit). Arsenikmineralen sitter i korngränser och inte som inneslutningar i andra silikat (figur 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 som associerat med arsenikkis och då vanligtvis med en mantel av arsenikkis, ställvis även med en ytterligare en påväxt av ren järnsulfid (figur 15, magnetkis,  $\text{FeS}$ ). Det texturrella förhållandet där kärnor av arsenid omslutna av arsenikkis är vanligt förekommande, men proportionerna mellan arsenikkis och arsenid kan variera stort i samma bergart. I bergarter av sedimentärt ursprung kan förekomst och proportionerna mellan arsenid och arsenikkis variera i mikroskala mellan olika lager i bergarten.





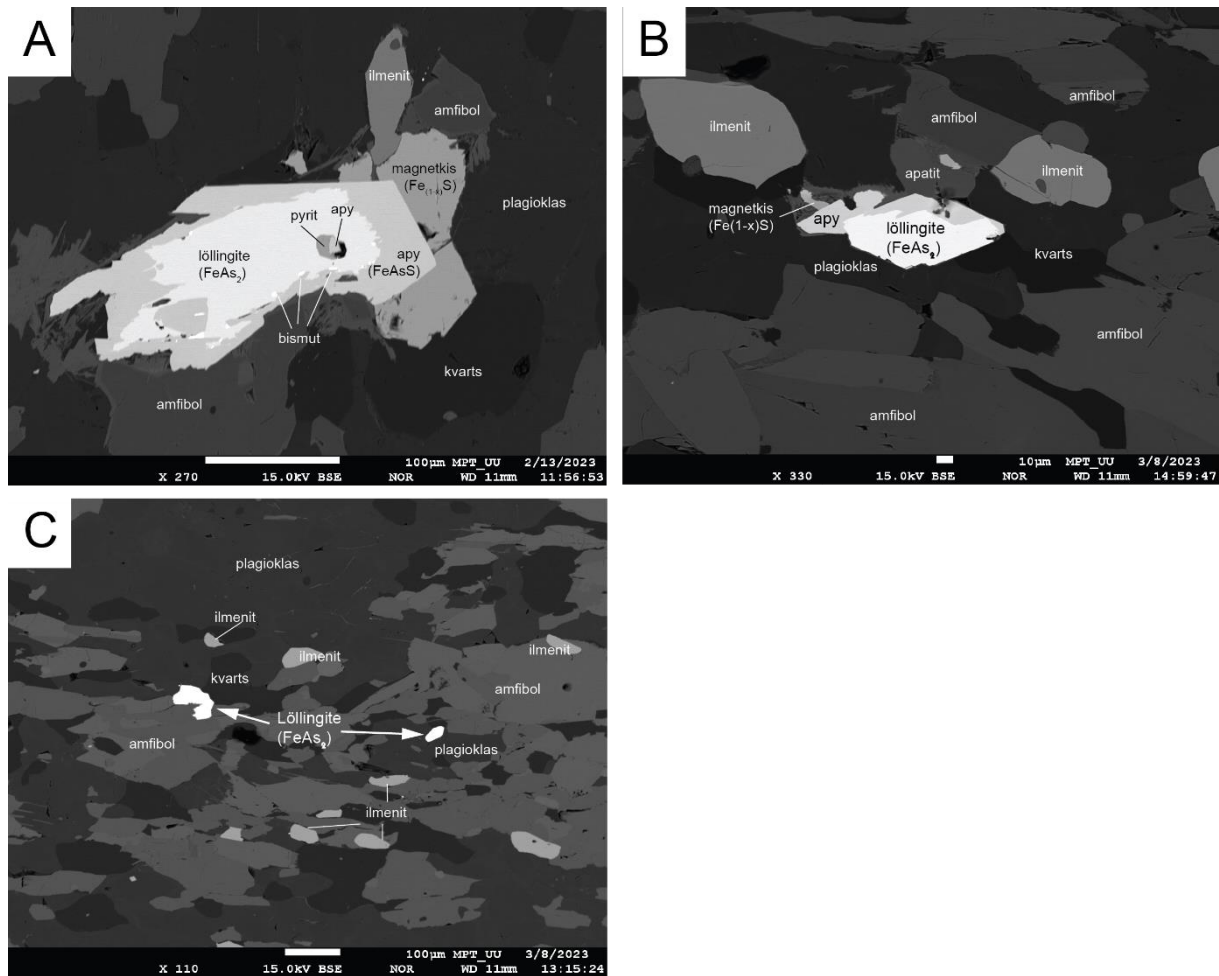
Figur 14. Arsenikmineral i berggrund på och omkring Arlanda flygplats. A) Silverglänsande arsenikkis ( $\text{FeAsS}$ ) och löllingit ( $\text{FeAs}_2$ ; pilar) i finkornig grå bergart av sedimentärt ursprung i väghäll vid vägen mellan Arlanda och Kimsta. Totalhalten av arsenik i bergarten uppgick till drygt 8800 ppm. B) Arsenikkis och löllingit (silverglänsande) och svavelkis ( $\text{FeS}_2$ ) i grov kvartsfältspatrik pegmatitgång i Uppsalagranit nära Arlanda bana 3. C) Kaka av arsenikkis från pegmatitgång vid Norrskogen, Arlanda. Provtagen vid bygget av bana 3 på Arlanda.

## Slutsats Arlanda-Rosersbergsområdet

I Arlanda-Rosersbergsområdet uppträder kraftigt arsenikanrikad berggrund i 500–1500 meter breda stråk som följer den nordnordostligt brant stående tektonisk strukturen i området. I dessa zoner är flera olika bergartsled anrikade på arsenik omfattande 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 att vara genomgående låg i samtliga bergartsled, med undantag för enstaka lager i ytbergartssekvenser som kan uppvisa något förhöjda halter (10–50 ppm).

Zoner i berggrunden med förhöjda halter arsenik uppvisar även hög frekvens av kontamination av grundvatten i bergborrade brunnar (figur 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. Elektronmikroskopfotografier (back scattered electron, BSE) av från mikroskoppreparat av lager av kraftigt arsenikanrikade omvandlade kvartsfattiga bergarter (metagabbro) i förskiffrade sedimentära bergarter i Arlandaområdet. Fotografierna illustrerar hur arsenikmineralen sitter i berget och deras inbördes relationer. Samtliga prover kommer från en väghäll i en ca 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 prismatic löllingit med kristallform karakteristisk för löllingit och delvis mantlad av euhedral arsenopyrit. C) Prov JAN220010E (samma preparat som i 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 analyserats (figur 3). I referensmaterialet ingår en handstuff, två olika fraktioner av restmaterial från geokemianalysen och ett mikroskoppreparat. Det utgörs av ett större prov grovkrossat material (70% <2 mm i kornstorlek) och ca 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 (mikroskoppreparat) 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 60-, 70- och 80-talen då geokemiska analyser var alltför kostsamma att utföra i mer omfattande skala. Det senare förhållandet gäller till exempel i det bygg- och anläggningsintensiva delar av Mälardalenregionen. 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, t.ex. genom problem med höga halter i bergmaterial eller i yt- och grundvatten.

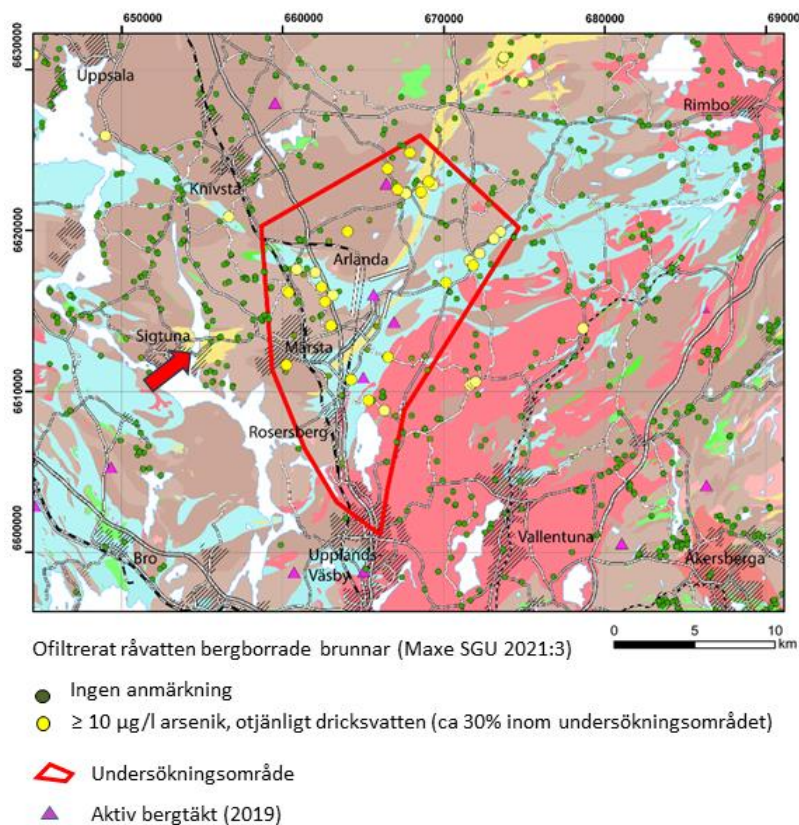
Planering av insatser för kartläggning och riskbedömning görs med fördel i samråd med regionala och lokala tillsynsmyndigheter och aktörer inom bygg- och anläggning med kunskap om specifika förhållanden och informationsbehov i undersökningsområdet. Dessa aktörer tar också fram mycket information i den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

### *Metodik vid provtagning och analys*

Förutom geologiska egenskaper, beror risk för omgivningspåverkan från bergmaterial av 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 i vilken provtagen bergart uppträder. 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 mineral och i vilken textur (kornstorlek, fördelning i bergarten m.m.). Detta innebär att 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 uppnår man 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 sedimentgnejser 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.

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

De flesta bergartskemiska analyser utförs vid ackrediterade labb 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 element som möjligt. Detta eftersom det möjliggör tolkning av den geologiska miljön och bergartstyp. Av ekonomiska skäl begränsas dock ofta mängden element som analyseras. Ibland är prisskillnaden mellan en för ett projekt anpassad analys av ett eller ett fåtal element och ett större antal element i ett färdigt analyspaket mycket liten. Fördelarna med att få ett större antal element analyserade är stora och bör undersökas och övervägas vid beställning av analyser.



Figur 16. Berggrundskarta över Arlanda-Rosersbergsområdet (SGU kartdatabas skala 1:1M). 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.

### 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 (<https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-bergartskemi.html>). 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<sub>2</sub>). 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 element 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 också specifikt användningsområde för bergmaterialet och anläggningsteknik att ha betydelse. Sammantaget innebär detta att riskbedömning behöver baseras på information från olika kompetensområden och att framtagande av 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 år 2024 satt 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 idag 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 sidor. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1574412/FULLTEXT01.pdf>
- 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/](http://projects.gtk.fi/ASROCKS_ENG/guidelines/aggregate_production/). Åtkommen 20240604.
- Hildebrand m.fl. 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. Xxx New York
- Sjöström, H. & Bergman, S., 1998: Svecofennian Metamorphic and Tectonic Evolution of East Central Sweden: Forskningsrapport, Svecofennisk metamorf och tektonisk utveckling i östra mellansverige. Uppsala. Sveriges geologiska undersökning. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1148460/FULLTEXT01.pdf> åtkommen 202305010
- Skoog m.fl., 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*.