

# Undersökning av Vena gruvfält: preliminära resultat från fältarbeten 2018

Alexander Lewerentz, Edine Bakker och Peter Hedin

maj 2019

SGU-rapport 2019:08



Omslagsbild: Ett av de många vattenfyllda gruvhål som utgör Vena  
gruvfält (6526732/502793).  
Fotograf: Alexander Lewerentz

Författare: Alexander Lewerentz, Edine Bakker och Peter Hedin  
Granskad av: Magnus Ripa  
Ansvarig enhetschef: Ildikó Antal Lundin  
Projektnamn: Bergslagen, etapp 1  
Projekt-id: 80031

Sveriges geologiska undersökning  
Box 670, 751 28 Uppsala  
tel: 018-17 90 00  
fax: 018-17 92 10  
e-post: [sgu@sgu.se](mailto:sgu@sgu.se)  
[www.sgu.se](http://www.sgu.se)

## INNEHÅLL

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| Innehåll.....                              | 3  |
| Abstract .....                             | 4  |
| Sammanfattning.....                        | 4  |
| Inledning.....                             | 4  |
| Tidigare arbeten.....                      | 4  |
| Fältobservationer och provtagning .....    | 5  |
| Geofysiska undersökningar .....            | 12 |
| Litogeokemi.....                           | 15 |
| Malmgenetisk diskussion .....              | 21 |
| Kommande arbeten.....                      | 21 |
| Referenser.....                            | 22 |
| Appendix: Figure captions in English ..... | 24 |

## ABSTRACT

This report summarizes the different surveys that were undertaken in the area around *Vena gruvfält* – the Vena mining area – during 2018. These include geological mapping, geophysical measurements and lithogeochemical analyses of collected rock samples. Results of observations, measurements and analyses are summarised and presented together with a preliminary interpretation of the overall petrogenesis of the area. The results are also speculatively discussed from a perspective of ore genesis. Lastly, planned future survey activities are listed. The remainder of this report is written in Swedish; however, figure captions are available in English as an appendix.

## SAMMANFATTNING

I denna rapport sammanfattas de undersökningar som utfördes i Vena gruvfält under 2018. Dessa består av geologisk kartering, geofysiska mätningar och litogeokemiska analyser av insamlat bergartsmaterial. Resultat av observationer, mätningar och analyser presenteras översiktligt tillsammans med en preliminär sammanvägd tolkning av områdets berggrundsgeologiska utveckling. Resultaten diskuteras också spekulativt ur ett malmgenetiskt perspektiv. Avslutningsvis listas kommande planerade arbeten i området.

## INLEDNING

Inom ramen för SGU-projektet *Bergslagen, etapp 1*, som här sammanfaller med det från näringsdepartementet erhållna *Uppdrag att kartlägga innovationskritiska metaller och mineral* (diarienummer: N2018/01044/FÖF), bedrivs olika geologiska undersökningar i Bergslagen. Vena gruvfält är beläget strax öster om tätorten Åmmeberg, Askersunds kommun, södra Närke. Området kring Vena gruvfält har valts ut som särskilt intressant eftersom man här under ungefär 100 år mellan cirka 1770 och 1870 utvann kobolt (Tegengren m.fl. 1924), en av de av EU och regeringen utpekade innovationskritiska metallerna. Målet med undersökningarna har varit att öka kunskapen om områdets koboltmineraliseringar i syfte att bättre förstå de bakomliggande bildningsprocesserna och Bergslagens potential med avseende på innovationskritiska metaller och mineral.

## TIDIGARE ARBETEN

Den storskaliga geologin i Bergslagen finns beskriven av Stephens m.fl. (2009). Geologin i området kring Vena gruvfält har tidigare karterats och undersökts av Erdmann (1889), Henriques (1964) samt Wikström & Karis (1991). Den primära stratigrafien hos områdets metavulkaniter har studerats av Kumpulainen m.fl. (1996). Malmförekomsterna vid Vena gruvfält finns beskrivna av Blomberg & Holm (1902), Tegengren m.fl. (1924) och Henriques (1964). Vena gruvfält utgör typlokal för Pb-Cu-Sb-Bi-sulfosaltmineralen kobellit (Setterberg 1839) och izoklakeit (Zakrzewski & Makovicky 1986).

Flyggeofysiska undersökningar (magnetfält, VLF och radiometri) utfördes år 1980 i området kring Vena. Dessa var en del av de regionala flygmätningar som utfördes i SV Bergslagen från slutet av 1970-talet till mitten av 1980-talet och som legat till grund för de geofysiska kartsammanställningarna i Stephens et al. (2009). En stor nackdel med dessa data är dock att man i VLF-mätningarna registrerade signalen från endast en sändare, vilket gör mätningarna rikttningsberoende. Detta innebär att resistiva strukturer vars orientering nära sammanfaller med riktningen till sändaren (mot SV i detta fall) kan framhävas väl, medan sämre resultat erhålls för strukturer med större vinkel relativt sändarriktningen. För det andra följde flygmätningarna profiler i N-S-riktning och bästa resultat erhålls om flyglinjer går vinkelrätt mot de strukturer som är av intresse. I Venaområdet är

strukturerna orienterade i en NV-SO:lig riktning vilket i detta fall är missgynnsamt för resultatet av både VLF- och magnetfältsmätningar.

Regionala tyngdkraftsmätningar har utförts i området under längre tid men med relativt låg upplösning. Avståndet mellan mätpunkterna är idag ca 1–2 km i stora delar av regionen. Detaljerade markgeofysiska mätningar utfördes 1982 i området kring Lövfallsgruvorna, strax SO om Vena gruvfält (Figur 1), med avseende på magnetfält och bergartsresistivitet (inducerad polarisation). Analys av petrofysiska prover ger information om bergarternas densitet och magnetiska egenskaper och används för korrelation med geofysiska mätningar, men endast en handfull sådana har insamlats från närliggande områden.

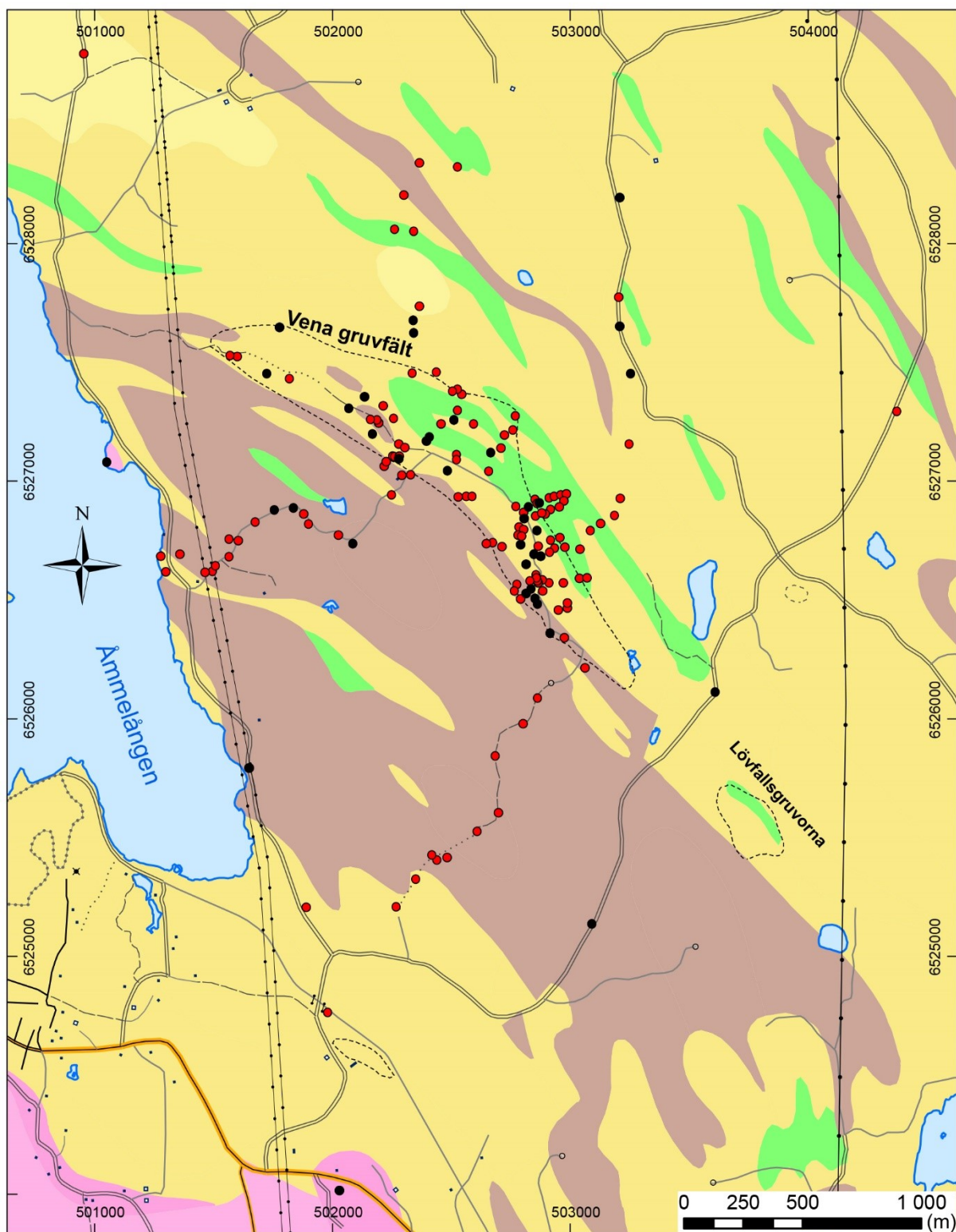
## FÄLT OBSERVATIONER OCH PROV TAGNING

Berggrundskartering utfördes av Edine Bakker och Alexander Lewerentz under perioden 28 augusti–14 september 2018. Gruvområdet och dess omgivning undersöktes längs två ca 3 km långa profiler, ungefärligt orienterade tvärs mot den generella strykningsriktningen i området. Utöver dessa profiler undersöktes också ett stort antal gruvhål, hållar och varphögar inom själva gruvområdet. Inalles har 165 observationspunkter beskrivits och inrapporterats till hälldatabasen (Figur 1). Över 40 bergartsprover från håll och varp har insamlats för litogeokemiska analyser och eventuella andra analyser, för tillverkning av tunnslip samt som referensmaterial i det fortsatta arbetet inom projektet.

Ett flertal bergarter har observerats i området kring Vena gruvfält. Större delen av det undersökta området består av svekofenniska (sub-)vulkaniska bergarter och ytbergarter tillhörande Mariedammenheten (Figur 2a & 2b; Kumpulainen m.fl. 1996), svekokarelska granodioritiska till tonalitiska magmatiska bergarter (Figur 2c) samt i underordnad utsträckning amfiboliter (Figur 2d). Dessa avsattes för 1,91–1,87 miljarder år sedan och genomgick därefter deformation och metamorfos i samband med den svekokarelska orogenesen (Stephens m.fl. 2009 och referenser däri). Inom metavulkaniterna påträffades kvartsrika och fältspatfattiga bergarter vars ursprung inte är helt uppenbart (Figur 2e). Möjliga tolkningar inkluderar hydrotermalomvandlade vulkaniska bergarter (Åberg, 1988), delvis sedimentförande vulkaniska bergarter (Åberg, 1988; Wikström & Karis, 1991) och rena sedimentbergarter (Henriques, 1964). På grund av denna osäkerhet karterades dessa bergarter under den mer försiktiga benämningen ”ytbergarter”.

Metavulkaniterna inkluderar bergarter av ryolitisk till andesitisk sammansättning. Ställvis förekommande, upp till 10 mm stora strökorn av kvarts, kalifältspat och amfibol samt i vissa fall också xenoliter indikerar ett (sub-)vulkaniskt bergartsuppträdande. Vid en lokal har *accretionary lapilli*-struktur observerats, vilket entydigt påvisar förekomsten av vulkanoklastiter i området.

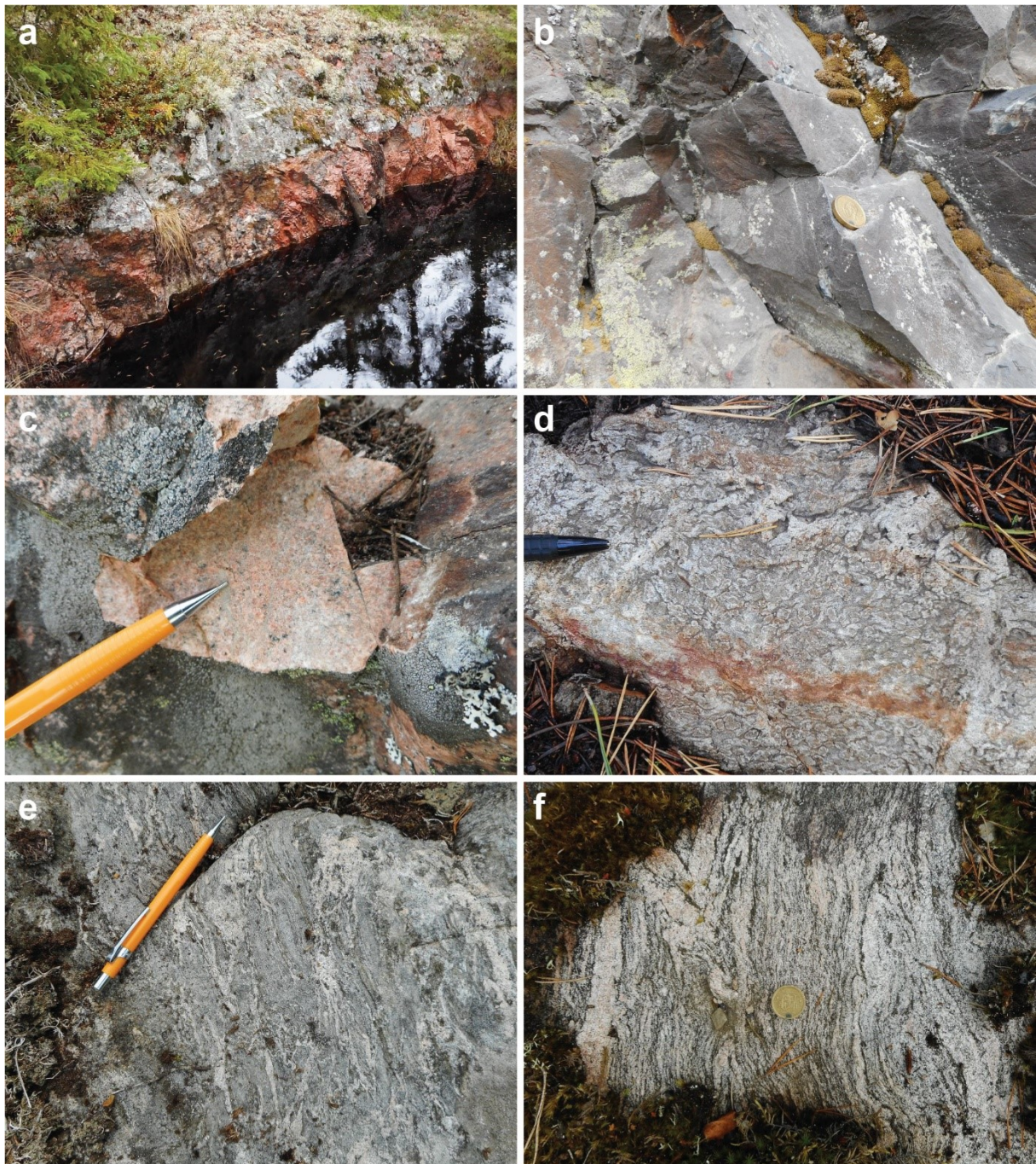
Svekokarelska granodioriter-tonaliter är inom området i regel fint medelkorniga, men både finkornigare och grovkornigare varianter förekommer. Bergarterna uppträder både som jämnkorniga och ojämnkorniga samt i enstaka fall porfyrisk med strökorn av kalifältspat. Enklaver av skiftande sammansättning är ställvis förkommande. Huvudmineralogin innefattar bl.a. kvarts, kalifältspat, plagioklas och glimmermineral och skiljer sig inte från typisk granitoid mineral-sammansättning. I enstaka fall förekommer metamorft bildade porfyroblastar av granat. Den överlag ringa kornstorleken kan indikera att dessa bergarter bildats från relativt ytnära intrusioner.



**Figur 1.** Geologisk karta över det undersökta området vid Vena gruvfält med omgivning. Ljuskult = ryolit, mörkult = ryolit-dacit odifferentierad, grönt = amfibolit, brunt = metagranodiorit till metatonalit, rosa = postorogena syenitoider. Undersökta hållar är markerade med röda och svarta punkter, där de svarta utöver att ha undersökts i fält även provtagits och analyserats med avseende på litogeokemi. Kartan är baserad på SGUs berggrundsdatabas.



**Figur 2.** Bergarter och kontaktrelationer i området inom och i närheten av Vena gruvfält. **A.** K-fältspatrik ryolit (6525208/502268). Foto: Alexander Lewerentz. **B.** Ryolit-dacit med strökorn av amfibol (6528798/500953). Foto: Edine Bakker. **C.** Granodiorit (6526617/501300). Foto: Alexander Lewerentz. **D.** Amfibolit (6526604/502858). Foto: Alexander Lewerentz. **E.** Kvartsrik "ytbergart" (6526692/502849). Foto: Alexander Lewerentz. **F.** Intrusiv kontakt mellan granodiorit och amfibolit (6525977/502802). Foto: Alexander Lewerentz.



**Figur 3. A.** Pegmatitgång som utgör väggbergart i ett av områdets många gruvhål (6527274/502771). Foto: Edine Bakker. **B.** Odeformerad diabasgång (6525816/501163). Foto: Alexander Lewerentz. **C.** Odeformerad syenit (6527078/501051). Foto: Alexander Lewerentz. **D.** Svagt deformerad metavulkanit som uppvisar primär *accretionary lapilli*-struktur (6527256/502189). Foto: Edine Bakker. **E.** Kraftigt deformerad och partiellt uppsmält (migmatiserad) metavulkanit (6526790/503086). Foto: Alexander Lewerentz. **F.** Migmatiserad och veckad metavulkanit (6527292/504376). Foto: Alexander Lewerentz.

Amfiboliterna är mestadels jämnkorniga och varierar i kornstorlek mellan mycket finkorniga och fint medelkorniga, men ojämnkorniga varianter har också observerats. Såväl strörkorn som porfyroblaster av hornblände är ställvis förekommande. Grundmassan består till största del av amfibol och plagioklas, med underordnad biotit och kvarts.

Inom metavulkaniterna uppträder amfiboliterna som långsträckta linser eller lager, vilka skulle kunna tolkas som gångar eller lagergångar (Figur 1). De svekokarelska granitoidernas kontakter tolkas som intrusiva i såväl metavulkaniterna som amfiboliterna (Figur 2f). Utifrån dessa kontaktrelationer har bergarternas relativa ålder tolkats som vulkaniter > mafiska intrusivbergarter > felsiska intrusivbergarter, vilket också överensstämmer med Wikström & Karis (1991) tolkning.

De svekofenniska och svekokarelska bergarterna skärs i sin tur av odeformerade pegmatiter som observerats på ett flertal platser (Figur 3a) och av en enstaka odeformerad diabasgång (Figur 3b). Pegmatiterna förekommer som grovkorniga ådror och gångar vars mäktighet sträcker sig från centimeter- till meterskala och som till största del består av kvarts och kalifältspat med underordnad plagioklas, glimmer och turmalin. I områdets södra och västra delar återfinns postorogena syenitoider tillhörande eller relaterade till Askersundsgraniten (Figur 3c; Persson & Wikström 1993).

Penetrativ foliation återfinns i de flesta av områdets svekofenniska och svekokarelska bergarter, ställvis förekommer även minerallineationer inom dessa plan. Denna strukturgeneration torde representera D<sub>1</sub> i den svekokarelska orogenesens deformationshändelseförlopp. Området uppvisar dock en stor gradient i deformationsgrad från i stort sett odeformerade (Figur 3d) till gnejsiga och migmatiserade bergarter (Figur 3e-f), vilket i vissa fall försvårat tolkningen av protolit.

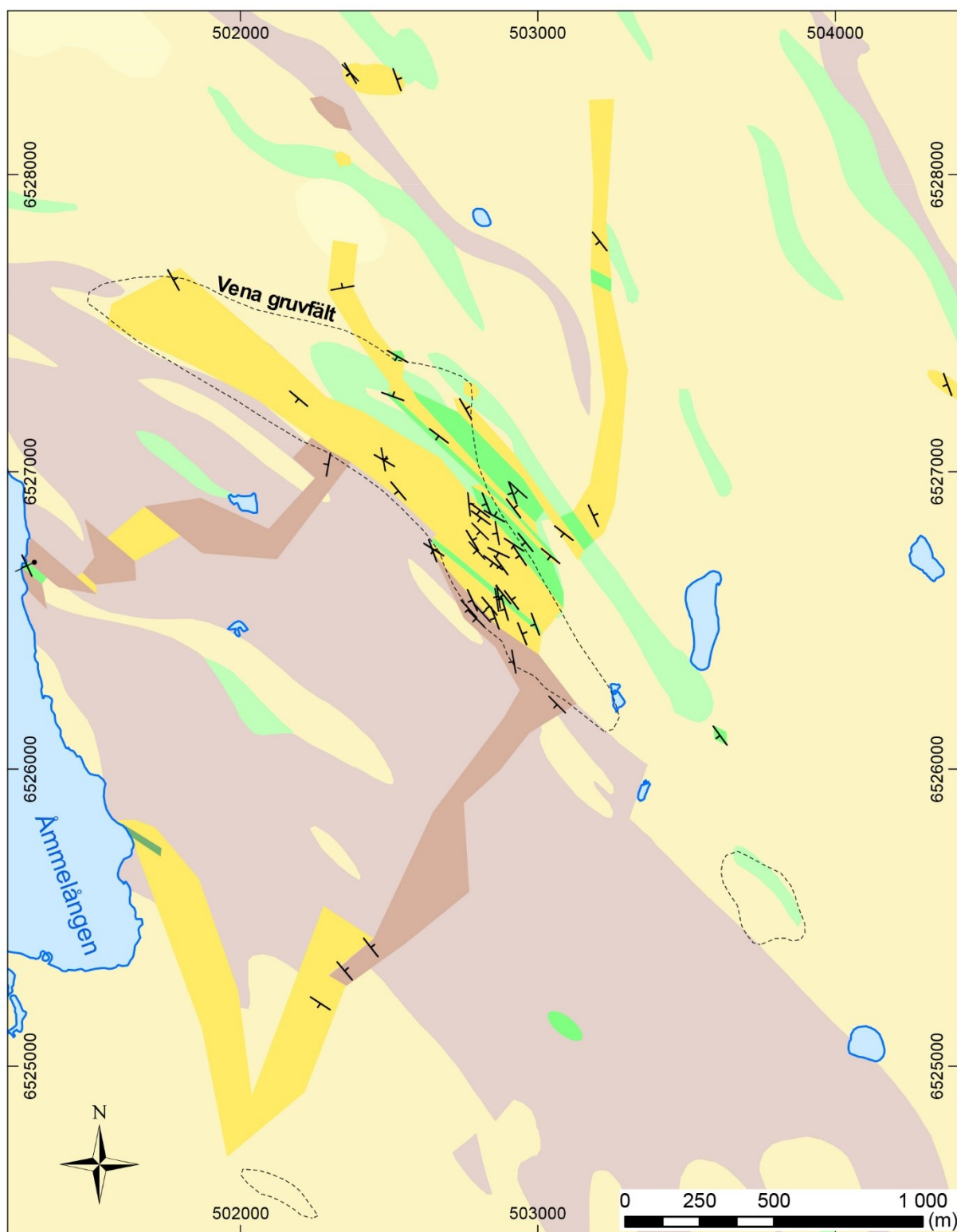
Metamorfosgraden i det omgivande området har tidigare övergripligt uppskattats till övre amfibolitfacies (Stephens m.fl., 2009 och referenser däri; Skelton, m.fl., 2018). Detta överensstämmer med den i fält tolkade mineralogin där granat observerats i metagranodiorit, att mafiska bergarter är amfibolrika och till synes fullständigt omkristalliserade samt även att metagranodioriter och metavulkaniter är ställvis migmatiserade.

Mineraliserade zoner förekommer som stråk parallella med foliationen inom metavulkaniter och amfiboliter (Tegengren m.fl. 1924). Inom dessa stråk har malmmineral observerats som disseminationer, impregneringar, lager och sprickfyllnader. Inom metavulkaniterna är det framförallt de mest kvartsrika lagren, karterade som ”ytbergarter”, som är malmförande (Figur 4). I amfiboliterna är mineraliserade zoner relaterade till skarnliknande mineralassociationer. Skarnomvandlade zoner förekommer även inom metavulkaniterna. Skarnmineralen är i samtliga fall till synes opåverkade av deformation och tolkas därför som syn- till posttektoniska. De malmbildande mineral som identifierats i fält är, utan inbördes ordning: blyglans, hematit, kopparkis, magnetit, magnetkis, malakit, svavelkis och zinkblände.

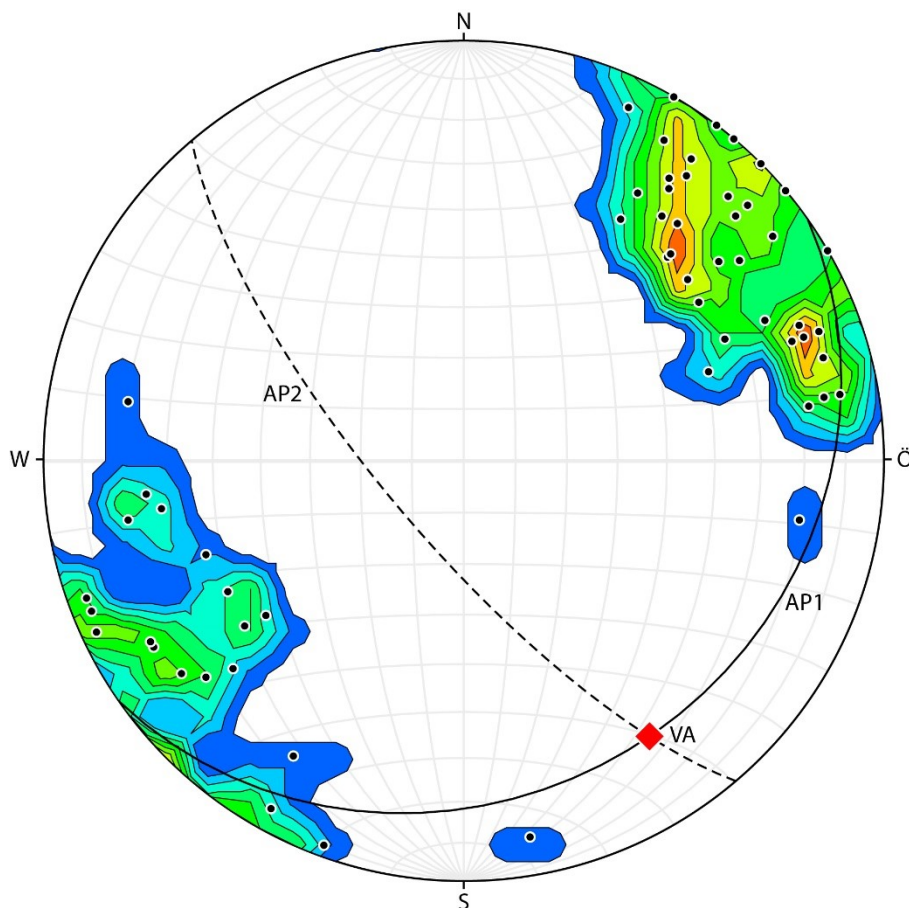
Strukturella mätningar visar att foliationer i området generellt stryker NV-SO med bitvis täta, ca 180-gradiga omslag i strykningsriktningen, i synnerhet är dessa vanliga inom och i nära anslutning till själva gruvfältet (Figur 5 & Figur 6). Detta skulle kunna tolkas som en serie tätt placerade småskaliga veckom-böjningar tillhörande en storskalig öppen veckstruktur, med ca 150° mellan veckbenen samt ett flackt stupande axialplan med strykningsriktning mot NO (055/22) och veckaxel orienterad mot SO (22/146), vilken skulle representera D<sub>2</sub>. Ett mindre antal mätningar med strykningsriktning mer mot NNV-SSO, jämfört den generella riktningen NV-SO, indikerar möjligen förekomsten av en tredje separat strukturgeneration (D<sub>3</sub>). Denna kan tolkas både som en andra foliationsgeneration eller som omveckning av den redan veckade D<sub>1</sub>-foliationen. Den senare tolkningen skulle innebära en tät veckstruktur (ca 30° mellan veckbenen), med ett brant stupande axialplan som stryker mot SO (140/75) och veckaxel identisk med D<sub>2</sub>-vecket, vilket överensstämmer med Wikström & Karis (1991) tolkning att Venafältet utgör ett isoklinalt veck.



**Figur 4. A.** Skiffrig ytbergart med brant stupande foliation som utgör väggen till ett av de gamla gruvhål (6526664/502919). Foto: Benno Kathol. **B.** Skärpning eller mindre gruvhål som följer den böljande foliationens orientering (6527042/502484). Foto: Edine Bakker. **C.** Veckad kontakt, markerad med gul streckad linje, mellan mineraliserad ytbergart vänster om icke mineraliserad metavulkanit (6527306/502071). Foto: Edine Bakker. **D.** Vittringsbenägen mineraliserad ytbergart från varphög (6527094/502280). Foto: Edine Bakker. **E.** Sågad yta av sulfidförande varpprov innehållande bl.a. kopparkis och svavelkis som sprickfyllning (6526650/502816). Foto: Alexander Lewerentz. **F.** Sågad yta av sulfidförande prov från gruvhål. Rödbruna sulfidmineral (bl.a. zinkblände) följer gränsen mellan finkornig och medelkornig ytbergart. (6527042/502484) Foto: Edine Bakker.



**Figur 5.** Preliminär karttolkning baserad endast på inom detta arbete gjorda observationer, i bakgrunden befintlig berggrundskarta med nedtonad färgskala. Färgsättning enligt figur 1 samt mörkgrönt för odeformerad diabasgång. Stryk- och stupningssymboler representerar uppmätta orienteringar för foliation och metamorf bandning eller ådring. Generellt stryker dessa NV-SO, men möjligtvis finns också en ytterligare strukturgeneration med strykriktning NNV-SSO till N-S.

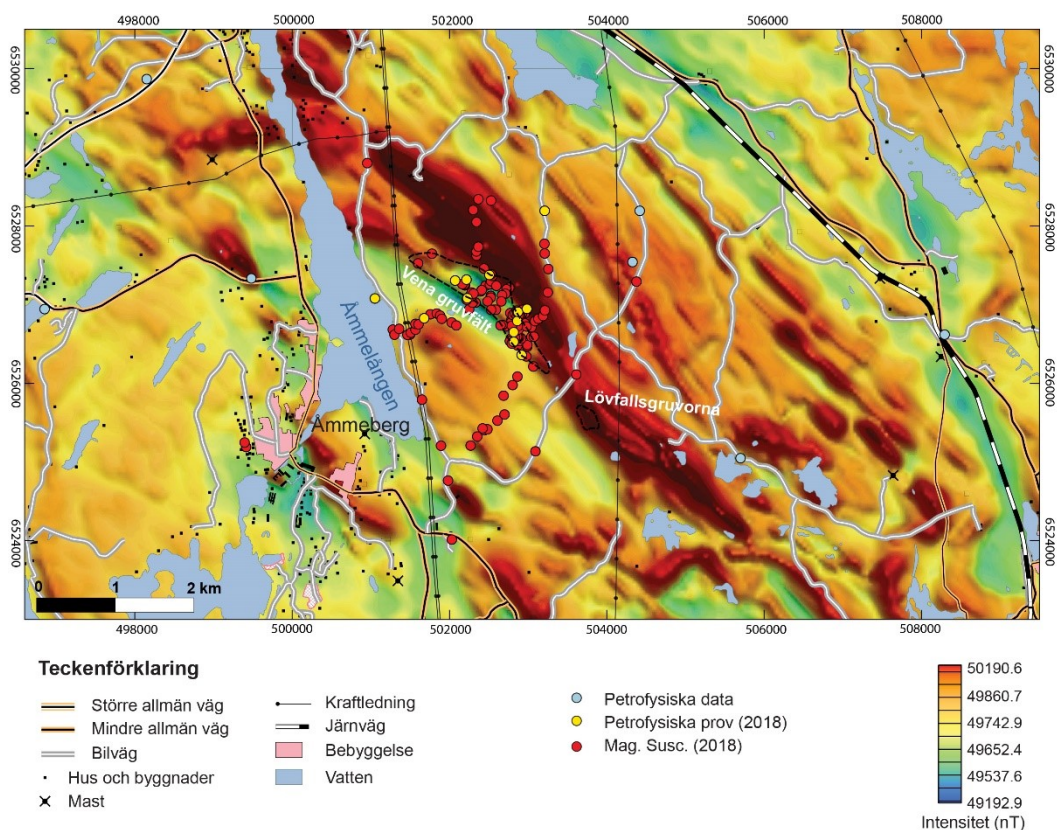


**Figur 6.** Stereografisk projektion av uppmätta foliationer som poler till plan, konturerade med 1% *area contours* (konturintervall 1, 3 $\sigma$ ). Cylindrisk passning av hela datamängden ger en storskalig öppen veckstruktur med axialplan strykande mot NO (AP1: 055/22). Möjligen kan två strukturpopulationer urskönjas i diagrammets högra del. Tolkade som två veckben innebär dessa en andra sluten veckstruktur med axialplan strykande mot SO (AP2: 140/75). De två veckens veckaxlar sammanfaller och stupar flackt mot SO (VA: 22/146).

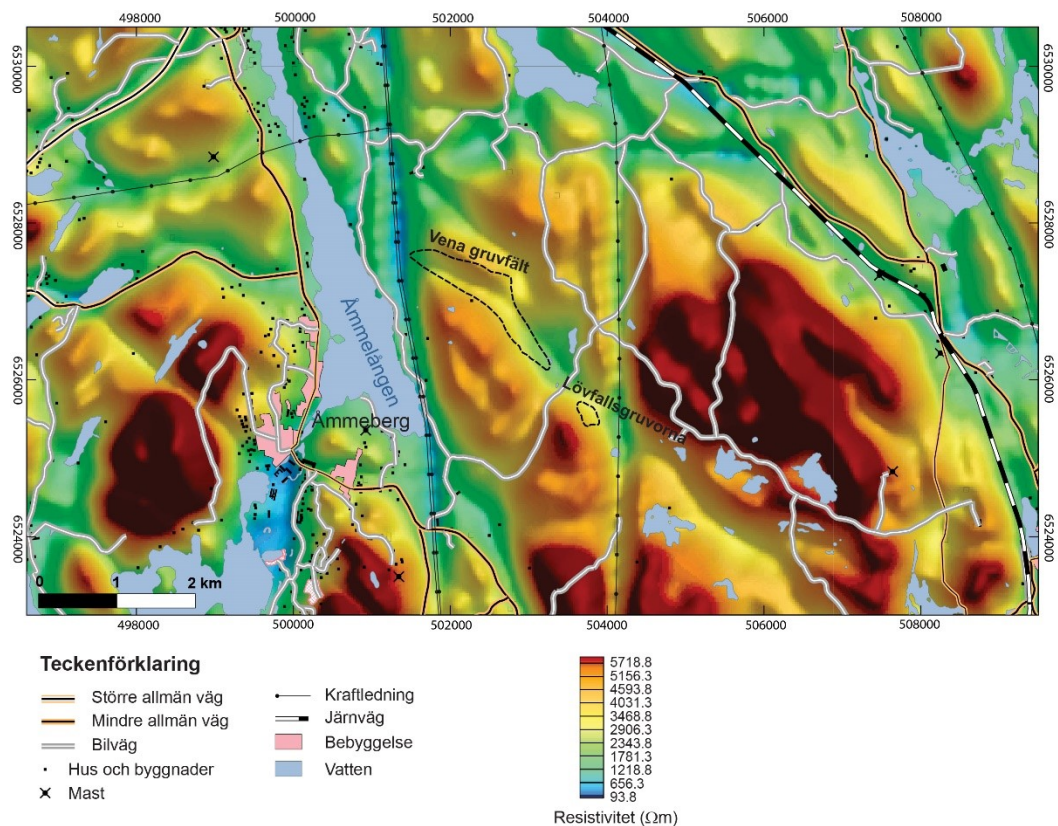
## GEOFYSISKA UNDERSÖKNINGAR

Från maj till juli 2018 insamlades nya flyggeofysiska data av SGU i samarbete med Värmlandsflyg över området runt Vena gruvfält, vilka inkluderar magnetfält, radiometri samt VLF från två sändare. Då signalen från två sändare registreras kan riktningsoberoende kartor över bland annat markens resistivitet beräknas. Känsligare sensorer och tätare mätpunktsintervall, samt att mätningarna över just Vena gruvfält utfördes med SV-NO flygriktning (dvs. vinkelrätt mot strukturerna), gör dessa data mer gynnsamma för modellering och tolkning av geologin i området. En första sammanställning av de högkvalitativa magnet- och resistivitetsdata kan ses i Figur 7 respektive Figur 8 nedan. Fördelningen av kalium, uran och torium utifrån de radiometriska mätningarna visas i ternärkartan i Figur 9.

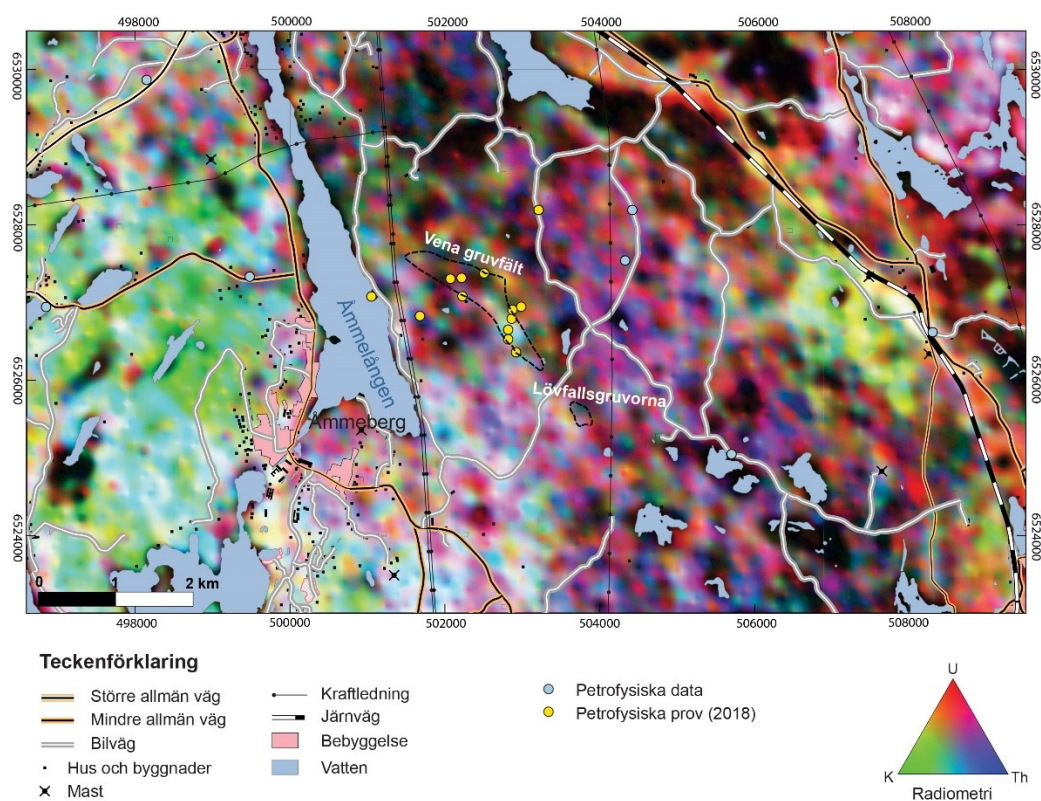
En karta över Bougueranomalin över området har sammanställts utifrån befintliga gravimetriska data och ses i Figur 10. Vid fältundersökningarna 2018 mättes magnetisk susceptibilitet på håll vid 145 platser omkring Vena gruvfält. Tretton av de bergartsprover som insamlades under fältarbetet är lämpliga även för petrofysiska analyser, med fokus på framförallt densitet och magnetiska egenskaper. Dessa utförs under vintern 2018–2019 för att komplettera befintliga mätningar och möjliggöra tolkning av geofysiska mätningar.



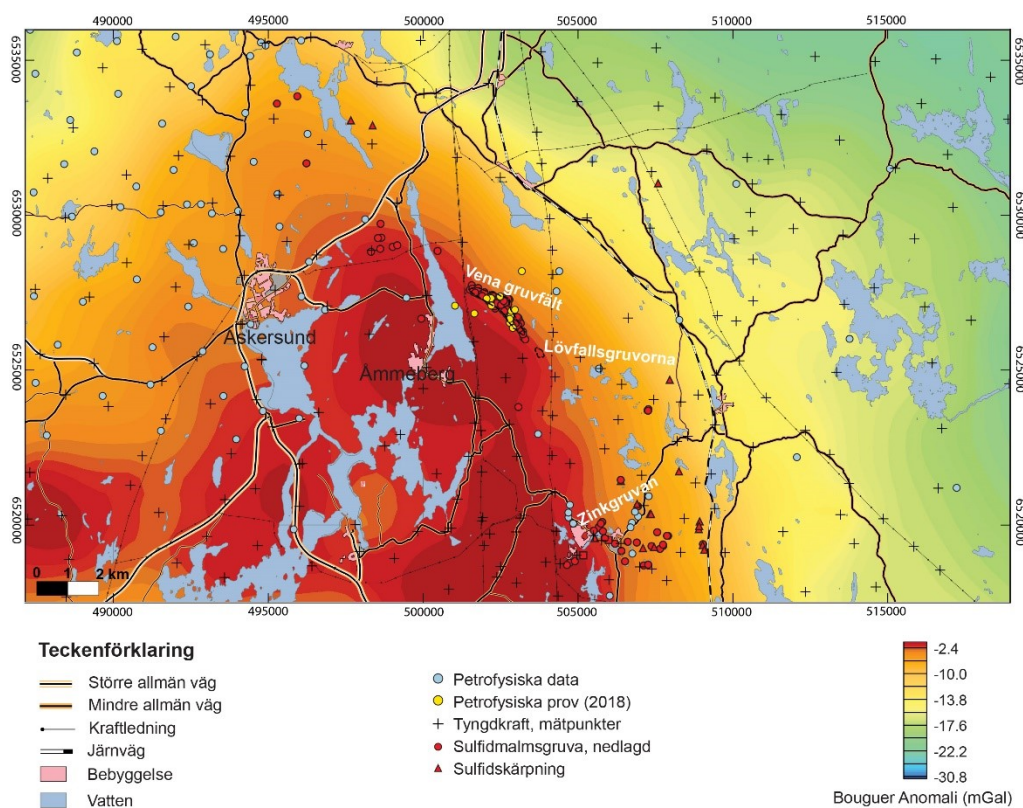
**Figur 7.** Magnetisk totalfältskarta baserad på 2018 års flygmätningar, framställd genom reduktion av magnetfältets totala intensitet till geomagnetisk pol. Lokaler för 2018 års petrofysiska prov och hållmätningar av magnetisk susceptibilitet visas med gula respektive röda punkter.



**Figur 8.** Resistivetskarta beräknad från VLF-data ur 2018 års flygmätningar. Linjära lågresistiva anomalier har viss korrelation till kraftledningar och järnvägar, men lägre resistivitet ses också sammanfalla med några av de magnetiska anomalierna kring Vena gruvfält.



**Figur 9.** Ternärkarta som visar fördelningen av uran (röd), torium (blå) och kalium (grön) baserad på 2018 års flygmätningar. Lokaler för 2018 års petrofysiska prov visas med gula punkter.

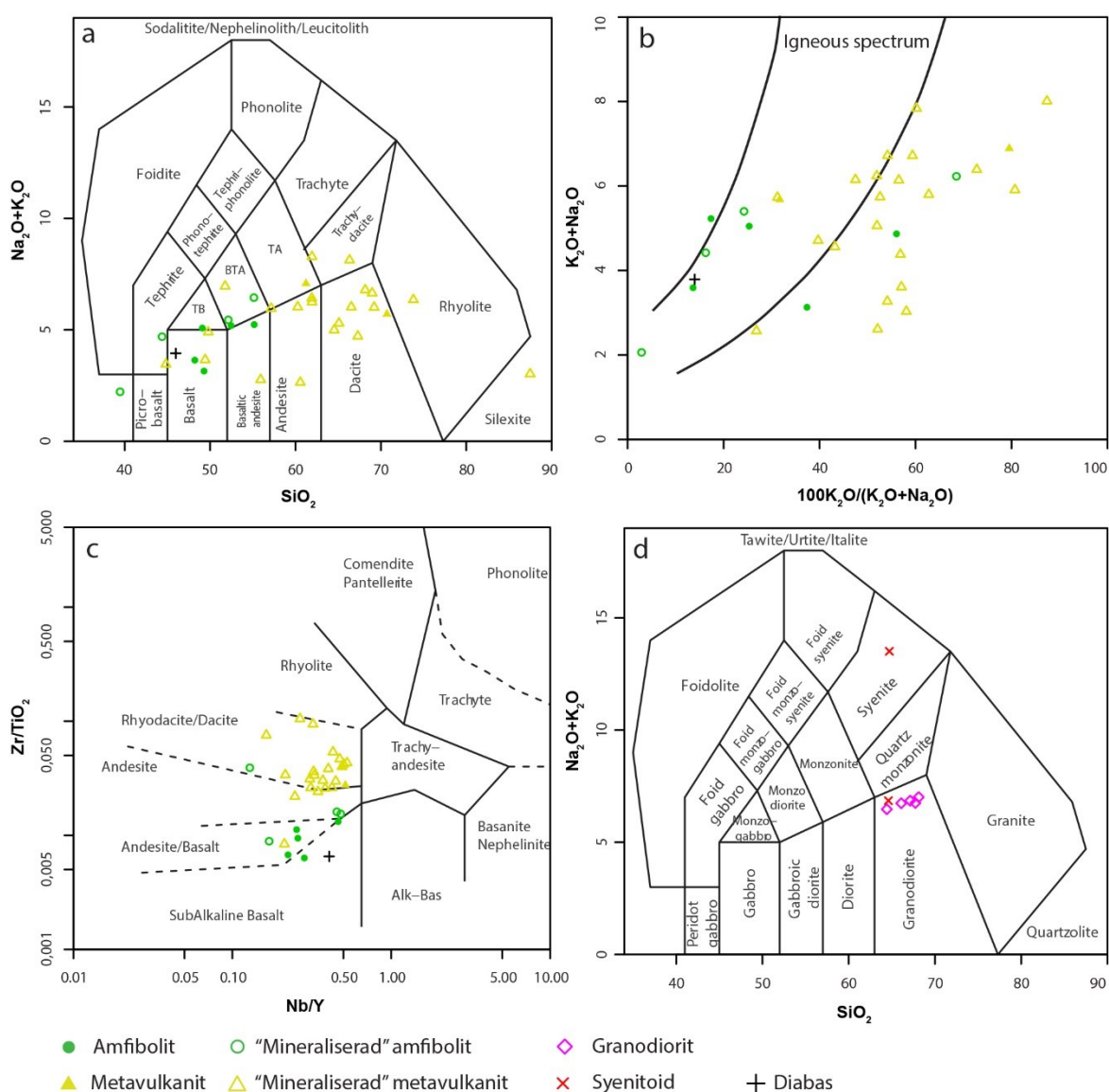


**Figur 10.** Karta över Bouguer-anomalin baserad på tidigare tyngdkraftsmätningar som insamlats med fokus på regional täckning eller på andra specifika områden i närheten. En förtätning av mätpunkter i Venaområdet planeras under våren 2019. Merparten av de kända sulfidmineraliseringarna i området (röda symboler) verkar följa ett stråk längs norra och östra sidan av den dominerande tyngdkraftsanomalin i området, vilket skulle kunna indikera ett visst samband mellan mineraliseringarna.

## LITOGEOKEMI

Kemisk sammansättning har analyserats för 40 av de insamlade bergartsproverna (Figur 1). I följande diagram har dessa analyser grupperats efter bergart. Med ”mineraliserad vulkanit” avses ett litet bredare kontext och under denna benämning ingår alla metavulkaniska bergarter som provtagits inom eller i närheten av mineraliserade zoner och som i fält tolkats som hydrotermal- och/eller fluidomvandlade. Dessa bergarter är i många fall, men inte alltid, i olika utsträckning sulfidförande.

Litogeochemiska data kan användas för att klassificera vulkaniska och subvulkaniskt intrusiva bergarter efter kemisk sammansättning. En av de vanligaste klassificeringsmetoderna är TAS-diagrammet (*total alkali versus silica*). För Venafältets vulkaniter och amfiboliter visar detta en alkalirik vulkanisk serie, med sammansättningar i gränslandet mellan normala vulkaniter och traktyvulkaniter (Figur 11a).



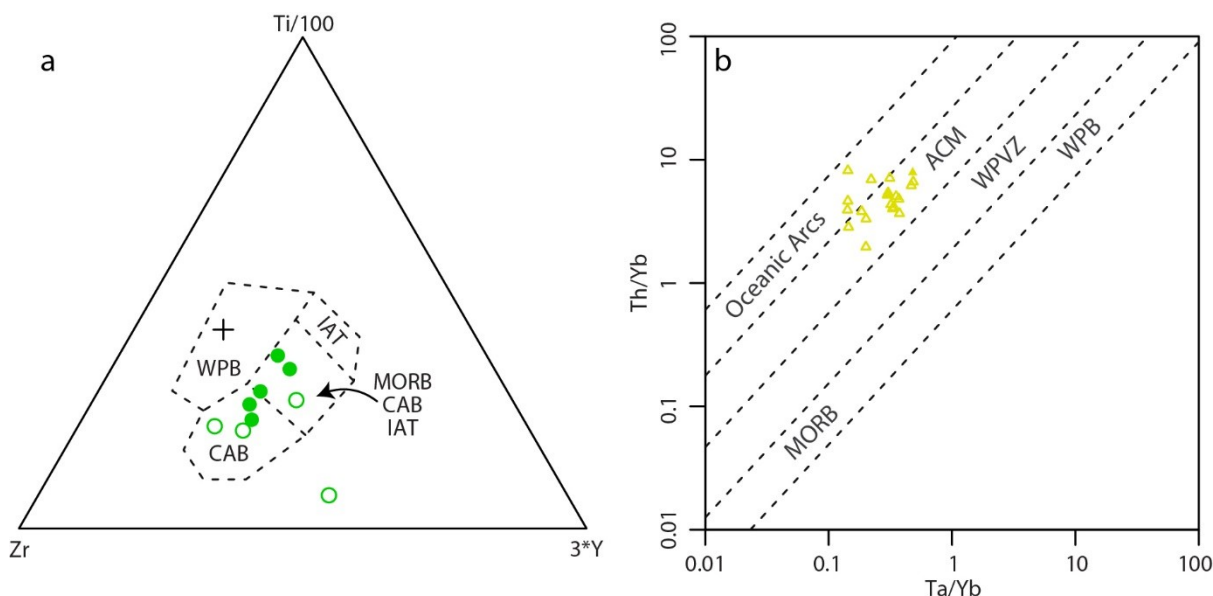
**Figur 11. A.** Klassificering av vulkaniska bergarter med avseende på alkali- och kiselhalt (TAS; efter Middlemost 1994). **B.** Diagram för utvärdering av omvandling hos vulkaniska bergarter. Sammansättning till höger om det magmatiska spektrumet tyder på att bergarterna är K-omvandlade (efter Hughes, 1973). **C.** Klassificering baserad på immobila

grundämnen, som inte påverkas av sekundära processer, visar att bergarternas sammansättning faller inom en normal basalt-till ryolitserie (efter Winchester & Floyd 1977). D. TAS-diagram för plutoniska bergarter (efter Middlemost 1994).

Utbredd förekomst av kaliumomvandlade vulkaniska bergarter, vilket skulle kunna förklara de förhöjda alkalivärdena, är dock dokumenterad i närliggande Zinkgruvan (Jansson m.fl. 2017, 2018) och i Bergslagen i stort (Stephens m.fl. 2009). Djupare analys av sammansättningen hos Venafältets vulkaniska bergarter visar att dessa till stor del har ett alkaliförhållande som ligger utanför det magmatiska spektrumet (Figur 11b), vilket är en stark indikation på att de har utsatts för kaliumomvandling. Klassificering kan även utföras med hjälp av immobila ämnen, vilket kan vara att föredra här eftersom förhållandet mellan dessa inte påverkas av sekundära processer såsom kaliumomvandling. En sådant tillvägagångssätt visar att Venafältets vulkaniska bergarter motsvarar en högst normal vulkanisk till subvulkaniskt intrusiv serie (Figur 11c).

De bergarter som tillhör den metamorft påverkade magmatiska tonalit-granodioritsekvensen (bruna i fig. 1) faller alla inom enligt TAS-diagrammet väntad sammansättning för granodioriter (Figur 11d). De två analyserade proverna av postorogena bergarter, i fält tolkade som syenitoider, har sammansättningar motsvarande granodiorit respektive syenit (Figur 11d).

En bergarts kemiska sammansättning kan också ge ledtrådar om dess tektoniska bildningsmiljö. Med avseende enbart på kemisk sammansättning verkar Venafältets amfiboliter vara avsatta vid någon typ av tektoniskt aktiv plattgräns: mittoceanrygg, kontinental subduktionszon eller vulkanisk öbåge (Figur 12a). De mineraliserade amfiboliternas position i detta diagram bör dock tolkas med försiktighet, eftersom de malmbildande processerna kan ha påverkat den kemiska sammansättningen. Den odeformerade diabasgångens sammansättning faller till skillnad från amfiboliterna inom fältet för basalter avsatta inom en kontinentalplatta (WPB), vilket ytterligare stärker tolkningen att denna bergart har bildats i ett annat tektoniskt sammanhang. Vad gäller Venafältets vulkaniter, verkar dessa vara avsatta vid en aktiv plattgräns (Figur 12b). Dessa tektoniska klassificeringar stämmer överlag överens med den tektoniska modell för Bergslagen som presenterats av Stephens m.fl. (2009).



**Figur 12. A.** Klassificering av tektonisk bildningsmiljö för mafiska intrusiva bergarter. WPB = *within plate basalt*, IAT = *island arc tholeiite*, MORB = *mid-ocean ridge basalt*, CAB = *continental arc basalt* (efter Pearce & Cann 1973). **B.** Klassificering av tektonisk bildningsmiljö för vulkaniska bergarter. ACM = *active continental margin*, WPVZ = *within plate volcanic zone*, (efter Schandl & Gorton 2002). Symboler enligt figur 11.

Överlag är de vulkaniska bergarterna anrikade på litofila grundämnen med stor jonradie (LILE – *large ion lithophile elements*, t.ex. Ba, Rb, Th och K) jämfört med grundämnen med hög fältstyrka (HFSE – *high field strength elements*, t.ex. Zr, Hf och Y). Noterbara är de negativa anomalier för Nb, Sr, P och Ti (Figur 13a), där det förstnämnda indikerar bildning vid en aktiv kontinental plattgräns (Brown m.fl. 1984), medan de övriga kan förklaras med fraktionering av plagioklas, apatit och någon Ti-bärande fas. Metagranodioriterna visar ett mycket likt mönster, vilket kan indikera ett gemensamt ursprung (Figur 13b). Givet att så är fallet skulle samtliga svekofenniska och svekokarelska bergarter ha bildats vid samma händelse eller åtminstone vara del av samma vulkaniska, subvulkaniska och intrusiva svit.

De postorogena syenitoiderna liknar delvis varandra med anrikning av LILE jämfört HFSE och negativa anomalier för Ta, Nb, Sr, P och Ti, men stora skillnader finns också. (Figur 13b). Ett av de två proverna uppvisar därutöver också negativa anomalier för Cs och Th och sammanfaller i övrigt nästan helt med de svekokarelska granitoidernas sammansättning.

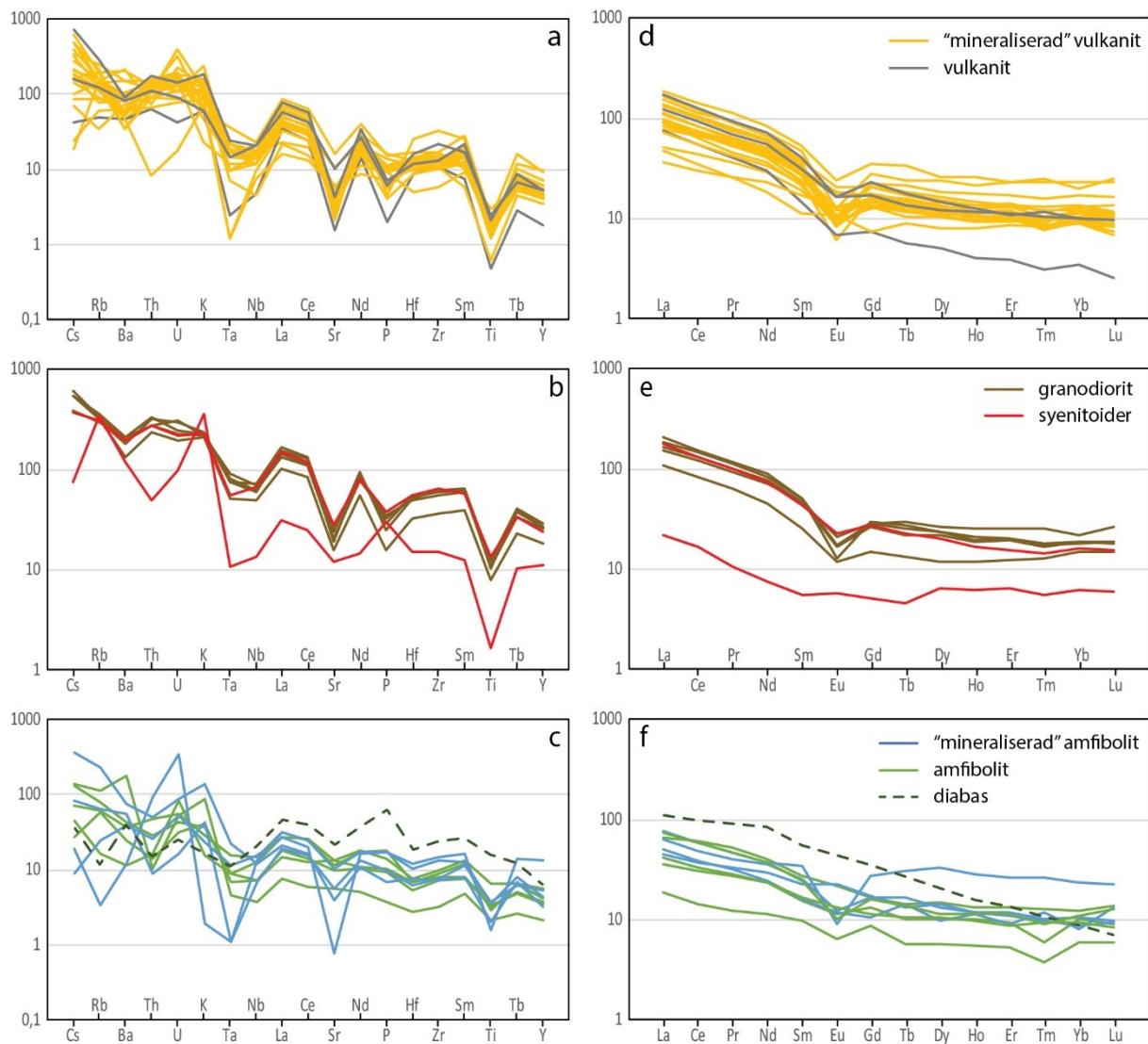
Amfiboliterna uppvisar anrikning av LILE jämfört HFSE samt negativa anomalier för Th, Ta och Nb (Figur 13c), vilket är vanligt för basalter bildade i subduktionszoner och kan indikera en sådan bildningsmiljö (Pearce & Parkinson 1993). De mineraliserade amfiboliterna uppvisar därutöver, precis som vulkaniterna, en negativ Sr-anomali (Figur 13c). Strontium substituerar för Ca i plagioklas och förväntas därför vara anrikat i plagioklasrika mafiska bergarter såvida inte magman är Ca-fattig (t.ex. O'Hara & Nui 2009), vilket dock inte kan anses troligt med tanke på att de icke mineraliserade amfiboliterna saknar Sr-anomali. En möjlig förklaring är att bergarterna i ett senare skede till följd av hydrotermala, fluidrelaterade eller metamorfa processer utsatts för albitisering, det vill säga omvandling till ren Na-fältspat, varvid Sr tillsammans med Ca mobiliserats (jfr Burgath m.fl. 2003). Detta måste dock undersökas mineralgeokemiskt för att kunna fastställas.

Den icke deformerade diabasgången uppvisar jämfört amfiboliterna en helt annan sammansättning av spårämnen med överlag likvärdiga nivåer av LILE och HFSE (Figur 13c), vilket talar emot ett gemensamt ursprung för dessa bergarter.

Samtliga bergartsgrupper, med undantag för ett fåtal prover, uppvisar ett liknande mönster för sammansättningen av REE (Figur 13d-f). Bergarterna har i allmänhet högre halt av de lättare sällsynta jordartsmetallerna (LREE; La till Sm) jämfört med de tyngre (HREE; Gd till Lu). Därutöver är HREE-trenden i det närmaste platt för de flesta amfiboliter och metavulkaniter. Detta utseende överensstämmer med det hos subduktionsrelaterade vulkaniska och subvulkaniska bergarter (Kelemen m.fl. 2003).

De flesta prover uppvisar också en negativ Eu-anomali. En negativ Eu-anomali är att vänta i felsiska vulkaniska och intrusiva bergarter (Figur 13d-e), eftersom plagioklas (där Eu substituerar för Ca) fraktioneras ut under magmans utveckling. Diabaser och amfiboliter uppvisar vanligtvis dock ingen eller mycket ringa Eu-anomali eftersom basiska bergarter bildas från relativt sett juvenila magmor, vilket också överensstämmer med de icke mineraliserade amfiboliternas sammansättning av sällsynta jordartsmetaller. I de mineraliserade amfiboliterna observeras däremot i vissa fall prominenta Eu-anomalier (Figur 13f). Detta kan tyda på albitisering av plagioklas likt beskrivet för Sr ovan, även om magmatisk fraktionering inte helt kan uteslutas. Den odeformerade diabasgången uppvisar ingen Eu-anomali (Figur 13f), vilket tillsammans med avsaknaden av en platt HREE-trend stärker bilden av att denna bildats i en annan tektonisk kontext.

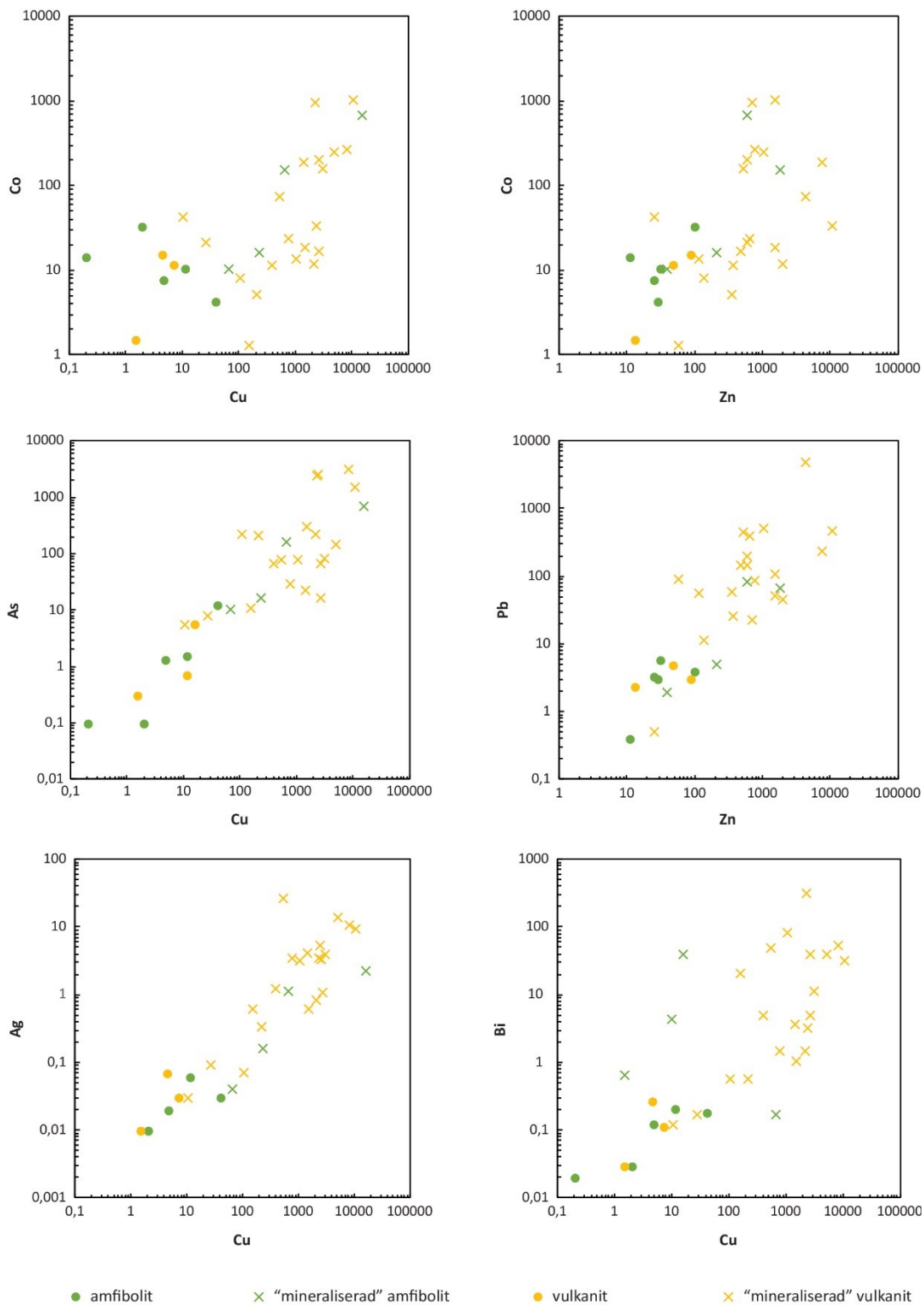
Proverna av två postorogena syenitoider uppvisar inbördes olika REE-sammansättning (Figur 13e). Ett av proverna har generellt tydligt högre REE-halter och sammanfaller, precis som för övriga spårämnen (Figur 13b), istället mycket väl med de svekokarelska granodioriterna. Detta indikerar att denna bergart (prov ALZ180085) tillhör de svekokarelska intrusivbergarterna men tidigare felaktigt tolkats som del av de postorogena intrusivbergarterna.



**Figur 13.** Diagram över koncentrationer av utvalda spårämnen för **A.** vulkaniter, **B.** granodioriter-tonaliter och postorogena intrusivbergarter samt **C.** amfiboliter och diabas, samtliga normaliserade mot primitiv mantel (Wood m.fl. 1979). **D–F.** Koncentration av sällsynta jordartsmetaller för samma bergarter, här normaliserade mot kondritter (Boynton 1984).

Överlag stämmer de nya spårämnesanalyserna väl överens med tidigare data från Bergslagen som region (jfr Stephens m.fl. 2009). Venafältets vulkaniter uppvisar dock en mer prominent Eu-anomali. Kanske kan inte denna enbart förklaras av magmatisk fraktionering, utan albitisering av plagioklas har också bidragit (jfr ovan).

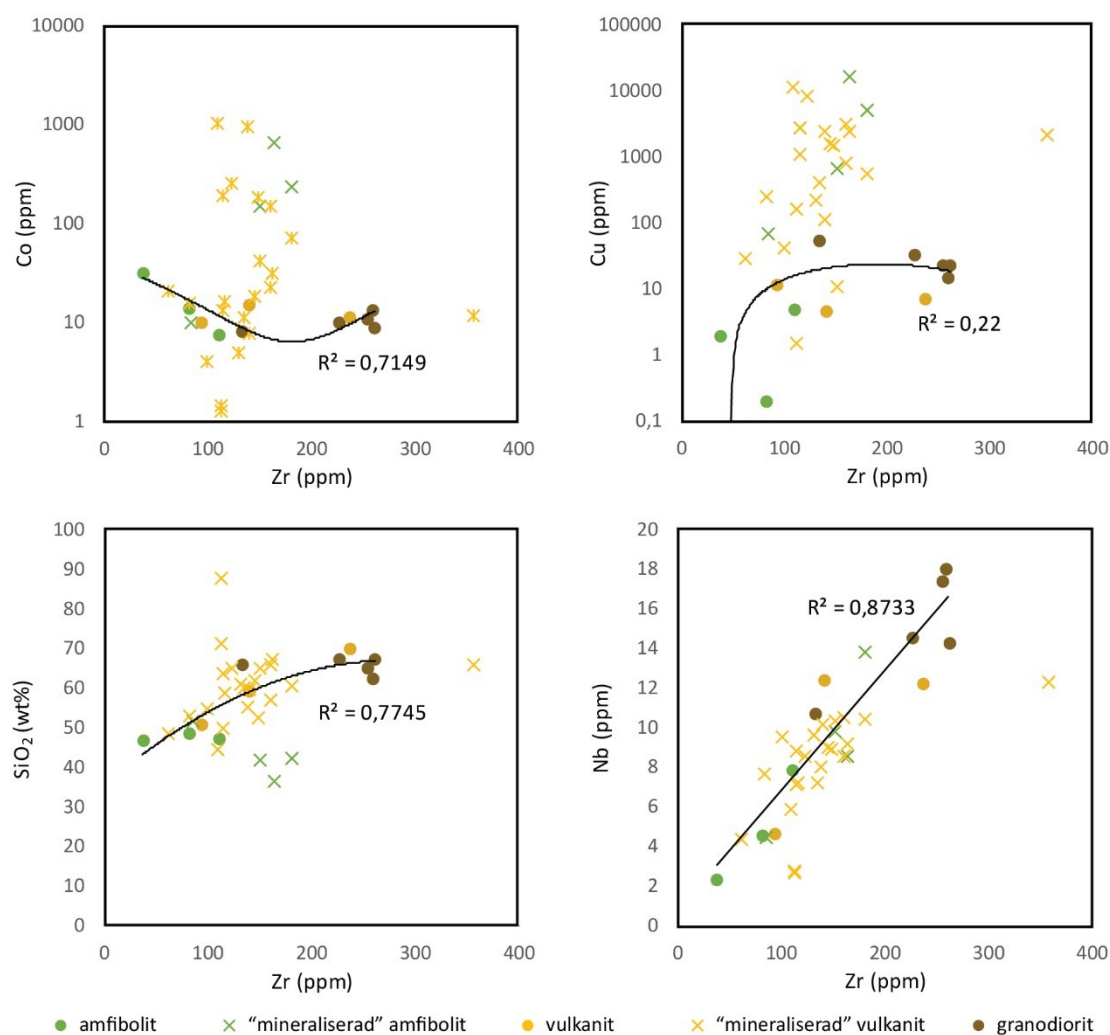
Det är uppenbart att de mineraliserade bergarterna har anrikats på Cu, Zn, Pb, Co, Ag och Bi jämfört sina icke mineraliserade motsvarigheter (Figur 14). Ett visst samband finns mellan Co och Cu, vilket är att vänta då Co- och Cu-mineral ofta uppträder tillsammans, men många prover har förhöjd halt av enbart Cu. Det samma gäller förhållandet mellan Co och Zn. I jämförelse med analyser av bergarter kring den närliggande Zinkgruvan finns vissa likheter, men där samvarierar Co och Cu ännu tydligare och Co-fattiga Cu-mineraliseringar likt dem i Figur 14 har inte observerats (Jansson m.fl. 2017, 2018). As, Ag och Bi samvarierar väl med Cu, liksom Zn med Pb.



**Figur 14.** Diagram över Co-, Cu-, Zn-, As-, Pb-, Bi- och Ag-halter i amfiboliter och vulkaniter. Notera att samtliga skalor är logaritmiska med enheten ppm (vikt). De mineraliserade bergarterna är tydligt anrikade på dessa metaller jämfört sina icke mineraliserade/omvandlade motsvarigheter.

Under antagandet att vulkaniter, granodioriter-tonaliter och amfiboliter delar en och samma magmakälla kan jämförelse med Zr, ett förmodat immobilt grundämne, användas för att undersöka om de icke mineraliserade bergarterna följer en generell magmatisk fraktioneringstrend (Figur 15; jfr Kampmann m.fl. 2016). För många grundämnen är korrelationskoefficienten för fraktioneringstrenden hög, varvid bergarternas sammansättning kan sägas vara direkt avhängig magmans mognadsgrad. Det väl korrelerande sambandet mellan Zr och ett annat immobilt grundämne, Nb, stödjer antagandet om att Zr faktiskt varit immobilt (Figur 15).

Tre av de mineraliserade amfiboliterna har SiO<sub>2</sub>-halt avsevärt lägre än fraktioneringstrenden, medan vissa mineraliserade vulkaniter istället har avsevärt högre SiO<sub>2</sub>-halt. Detta tyder på att Si efter bergarternas bildning har mobiliserats av hydrotermala, metamorfa eller andra senare processer. Kobolthalten i de flesta mineraliserade proverna är anrikad upp mot 100 gånger över fraktioneringstrenden medan ett fåtal prover istället visar urlakning med upp till en faktor 10, vilket tillsammans indikerar återmobilisering av Co analogt med ovan anført för Si. För Cu är dock utseendet annorlunda, här finns endast anrikade prover (upp till faktor 1000) och det är dålig korrelation mellan de icke mineraliserade proverna och en tänkt fraktioneringstrend, vilket ytterligare visar att Co och Cu inte fullt ut samvarierar.



**Figur 15.** Diagram över koncentrationen av Co, Cu, SiO<sub>2</sub> och Nb jämfört med Zr, ett förmodat immobilt ämne. Den svarta trendlinjen baseras på de icke mineraliserade proverna och representerar en ponerad magmatisk fraktioneringstrend, där hög korrelationsfaktor ( $R^2$ ) i fallen Co och SiO<sub>2</sub> ger stöd för denna hypotes. Notera att skalorna för Co och Cu är logaritmiska medan övriga är linjära.

## MALMGENETISK DISKUSSION

Ett stort antal möjliga processer kan ställas upp för bildningen av Venafältets mineraliseringar. Dessa inkluderar vulkaniska eller andra hydrotermala processer före den svekokarelska orogenesen, metamorfa fluider kopplade till densamma, magmatiska fluider från sen- och postorogena intrusioner samt postorogena krustala fluider. Sannolikt är mineraliseringarna både bildade och ombildade till följd av en kombination av flera av dessa processer.

Mineraliseringarna i Zinkgruvan har klassificerats som stratiforma och bildade av hydrotermala processer (Jansson m.fl. 2017). Det är inte helt klarlagt hur Zinkgruvan och Venafältet hör ihop strukturellt, eftersom en skjuvzon norr om Zinkgruvan separerar områdena (Jansson m.fl. 2017, 2018). Närheten till och likheter med Zinkgruvan gör ändå dessa processer till troliga kandidater även för Venafältet. Sannolikt kan processer kopplade till bildandet av en stratiform Cu-Zn-Pb-(Ag)-mineralisering förklara större delen av anrikningen av dessa metaller, liksom av Co och Bi (Figur 14). Zinkgruvans mineraliseringar har tolkats vara kopplade till strukturell kanalisering av fluider i den sedimentära/vulkaniska lagerföljden (Jansson m.fl. 2018). Givet att Marie-dammenhetens vulkaniter underlagrar Zinkgruvans malmhorisonter bör Venafältets stratigrafiska läge vara lägre än Zinkgruvans (Kumpulainen m.fl. 1996). En möjlig hypotes är därmed att Venafältet var del av den till Zinkgruvan kopplade fluidkanaliserande strukturen, eller en till Zinkgruvan orelaterad men närliggande liknande struktur. Kobolt samvarierar dock inte alltid med Cu och Zn, varför en enda hydrotermal händelse inte helt kan förklara malmbildningen.

Venafältets mineraliseringar är lokaliserade längs kanten av en något mer storskalig, regional tyngdkraftsanomali (Figur 10). Exakt vad som orsakar anomalin är i dagsläget oklart, men kommande geofysiska mätningar och modellering av geofysiska data kan förhoppningsvis klarlägga om mineraliseringarna kan ha koppling till denna anomali. Att Zinkgruvans mineraliseringar även de påträffas i kanten av denna anomali skulle i så fall ytterligare indikera ett samband mellan Venafältets och Zinkgruvans malmgenes.

Även om mineraliseringarna primärt bildats i hydrotermala system kan de ha påverkats av senare processer. Deras sammansättning kan ha ändrats genom urlakning eller utfällning av grundämnen som mobiliserats av metamorfa, magmatiska eller krustala fluider. På så vis kan vissa stråk i berggrunden anrikas på bekostnad av de omgivande bergartsleden, i vilka malmen då kan sägas ha koncentrerats med avseende på en eller flera metaller (jfr Beunk & Kuipers 2012). Preliminära tolkningar visar att Co utarmats i vissa av de mineraliserade metavulkaniterna men samtidigt anrikats i andra (Figur 15), vilket indikerar att fördelningen av Co i Venafältet kan ha påverkats av senare fluidrelaterade processer.

Att skarn påträffas i Co-förande mineraliseringar visar att dessa, om inte bildades, åtminstone påverkades av de skarnbildande fluiderna. De skarnbildningar som påträffats i området är till synes opåverkade av deformation, vilket visar att dessa bildades till följd av en sen- eller postorogen fluidhändelse. Denna skulle kunna vara kopplad till fluidrörelser under den retrograda metamorfosen, men postorogena syenitoider och pegmatiter är också troliga fluidkällor.

Befintliga insamlade observationer tillåter inte någon mer konklusiv diskussion om Venafältets malmgenes. Ytterligare arbeten och analyser, i syfte att utvärdera och vidareutveckla de i denna rapport framlagda hypoteserna och modellerna för Co-mineraliseringarnas bildning, är planerade att utföras under 2019.

## KOMMANDE ARBETEN

För att ytterligare undersöka koboltmineraliseringarna och omgivande geologi vid Vena gruvfält kommer det under 2019 utföras ytterligare arbeten. Ett urval av de bergartsprover som insamlades under 2018 har beretts som tunnslip, vilka ska undersökas mikroskopiskt för att få ytterligare insikt

i områdets mineralogiska variationer. Som komplement till tunnslipsmikroskopi kommer också ett antal prover att väljas ut för röntgendiffraktionsanalyser som ger information om vilka mineral som bergarterna består av. Åldersbestämning av en av metavulkaniterna är planerad, vilket ger en övre gräns för mineraliseringarnas ålder. Petrofysiska analyser ska utföras på ett urval av de insamlade proverna. Under våren 2019 planeras ytterligare fältarbeten för komplettering av de observationer och den provtagning som gjordes under 2018. Här kommer även hållmätningar och stenprover samlas specifikt för förtätning av petrofysiska data och uppföljning av geofysiska anomalier, eventuellt längs profiler. Förtätande tyngdkraftsmätningar planeras genomföras i området under våren 2019 och profilmätningar med markbaserad magnetisk och/eller VLF-utrustning kan bli aktuella vid lovande resultat från modelleringar och petrofysiska prov.

## REFERENSER

Beunk, F.F. & Kuipers, G., 2012: The Bergslagen ore province, Sweden: Review and update of an accreted orocline, 1.9–1.8 Ga BP. *Precambrian Research*, 216–219, 95–119.

Blomberg, A. & Holm, G., 1902: Geologisk beskrifning öfver Nerike och Karlskoga bergslag samt Fellingsbro härad. *Sveriges geologiska undersökning Ca 2*, 124 s.

Boynton, W.V., 1984: Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. I P. Henderson (red.): *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 63–114.

Brown, G.C., Thorpe, R.S. & Webb, P.C., 1984: The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. *Journal of the Geological Society*, London 141, 413–426.

Burtath, K.-P., von Rad, U., van der Linden, W., Block, M., Khan, A.A., Roeser, H.A. & Weiss, W., 2003: Basalt and peridotite recovered from Murray Ridge: are they of supra-subduction origin? I P. Clift, D. Kroon, C. Gaedicke & J. Craig (red.): *The tectonic & climatic evolution of the Arabian Sea region. Geological Society Special Publication 195*, 117–135.

Erdmann, E., 1889: Beskrifning till kartbladet Askersund. *Sveriges geologiska undersökning Aa 84*, 100 s.

Henriques, Å., 1964: Geology and ores of the Åmmeberg district (Zinkgruvan) Sweden. *Arkiv för mineralogi och geologi 4*, 1–246.

Hughes, C.J., 1973: Spilites, keratophyres, and the igneous spectrum. *Geological Magazine 109*, 513–527.

Jansson, N.F., Zetterqvist, A., Allen, R.L., Billström, K. & Malmström, L., 2017: Genesis of the Zinkgruvan stratiform Zn-Pb-Ag deposit and associated dolomite-hosted Cu ore, Bergslagen, Sweden. *Ore Geology Reviews 82*, 285–308.

Jansson, N.F., Zetterqvist, A., Allen, R.L. & Malmström, L., 2018: Geochemical vectors for stratiform Zn-Pb-Ag sulfide and associated dolomite-hosted Cu mineralization at Zinkgruvan, Bergslagen, Sweden. *Journal of Geochemical Exploration 190*, 207–228.

Kampmann, T.C., Jansson, N.F., Stephens, M.B., Majka, J. & Lasskogen, J., 2016: Systematics of hydrothermal alteration at the Falun base metal sulfide deposit and implications for ore genesis and exploration, Bergslagen Ore District, Fennoscandian Shield, Sweden. *Economic Geology 112*, 1 111–1 152.

Kumpulainen, R.A., Mansfeld, J., Sundblad, K., Neymark, L. & Bergman, T., 1996: Stratigraphy, age, and Sm-Nd isotope systematics of the country rocks to Zn-Pb sulphide deposits, Åmmeberg district, Sweden. *Economic Geology 91*, 1 009–1 021.

- Middlemost, E.A.K., 1994: Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Science Reviews* 37, 215–224.
- Kelemen, P.B., Hanghøj, K. & Greene, A.R., 2003: One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. I R.L. Rudnick (red): *Treatise on geochemistry*. Elsevier, Oxford, 593–659.
- O'Hara, M.J. & Niu, Y., 2009: MORB mantle hosts the missing Eu (Sr, Nb, Ta and Ti) in the continental crust: New perspectives on crustal growth, crust–mantle differentiation and chemical structure of oceanic upper mantle. *Lithos* 112, 1–17.
- Pearce, J.A. & Cann, J.R., 1973: Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters* 19, 290–300.
- Pearce, J.A. & Parkinson, I.J., 1993: Trace element models for mantle melting: application to volcanic arc petrogenesis. I H.M. Prichard, T. Alabaster, N.B.W. Harris & C.R. Neary (red.): *Magmatic processes and plate tectonics. Geological Society Special Publication* 76, 373–403.
- Persson, P.-O. & Wikström, A., 1993: A U–Pb dating of the Askersund granite and its marginal augen gneiss. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar* 115, 321–329.
- Schandl, E.S. & Gorton, M. P., 2002: Applications of high field strength elements to discriminate tectonic setting in VMS environments. *Economic geology* 97, 629–642.
- Skelton, A., Mansfeld, J., Ahlin, S., Lundqvist, T., Linde, J. & Nilsson, J., 2018: A compilation of metamorphic pressure–temperature estimates from the Svecofennian province of eastern and central Sweden. *GFF* 140, 1–10.
- Stephens, M.B., Ripa, M., Lundström, I., Persson, L., Bergman, T., Ahl, M., Wahlgren, C.-H., Persson, P.-O. & Wickström, L., 2009: Synthesis of bedrock geology in the Bergslagen region, Fennoscandian Shield, south-central Sweden. *Sveriges geologiska undersökning Ba* 58, 259 s.
- Setterberg, J., 1839: Undersökning af ett nytt mineral, funnet uti Hvena Kobolt-grufvor uti Nerike. *Kongliga vetenskapsacademiens handlingar* 27, 188–193.
- Tegengren, F.R. m.fl., 1924: Sveriges äldre malmer och bergverk. *Sveriges geologiska undersökning Ca* 17, 406 s.
- Wikström, A. & Karis, L., 1991: Beskrivning till berggrundskartorna Finspång NO, SO, NV, SV. *Sveriges geologiska undersökning Af* 162, 163, 164, 165, 216 s.
- Winchester, J.A. & Floyd, P.A., 1977: Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20, 325–343.
- Wood, D.A., Joron, J.L., Treuil, M., Norry, M. & Tarney, J., 1979: Elemental and Sr isotope variations in basic lavas from Iceland and the surrounding ocean floor; the nature of mantle source inhomogeneities. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 70, 319–339.
- Zakrzewski, M.A. & Makovicky, E., 1986: Izoklakeite from Vena, Sweden, and the kobellite homologous series. *Canadian Mineralogist* 24, 7–18.
- Åberg, A., 1988: Ädelmetaller och deras relation till Co-Ni-arsenider i den svekokarelska orogenesisen. *STU-rapport*, 12 s.

## APPENDIX: FIGURE CAPTIONS IN ENGLISH

**Figure 1.** Geological map of the surveyed area around *Vena gruvfält* (Vena ore field). Light yellow = rhyolite, dark yellow = rhyolite-dacite undifferentiated, green = amphibolite, brown = metagranodiorite to metatonalite, pink = post-orogenic syenitoids. Red and black dots mark the examined outcrops, where black dots represent sample localities for lithogeochemical analyses. The map is based on the bedrock database of the Geological Survey of Sweden (SGU).

**Figure 2.** Rock types and contact relations observed in the studied area. **A.** K-feldspar-rich rhyolite, **B.** dacite with phenocrysts of amphibole, **C.** granodiorite, **D.** amphibolite, **E.** quartz-rich “supracrustal rock”, and **F.** intrusive contact between granodiorite and amphibolite. See Swedish caption for coordinates.

**Figure 3.** **A.** Pegmatite dyke occurring as wall rock to one of the many mine pits found in the area, **B.** undeformed dolerite dyke, **C.** undeformed syenite, **D.** relatively undeformed metavolcanic rock with primary accretionary lapilli structure, **E.** strongly deformed and partially melted (migmatized) metavolcanics rock, as well as **F.** migmatized and small-scale folded metamvolcanic rock. See Swedish caption text for coordinates.

**Figure 4.** **A.** Steeply dipping foliation in an incompetent schistose supracrustal rock in the wall of an old mine pit. **B.** Old mine workings following the 70 degrees north-northeast dipping, undulating foliation. **C.** Folded contact (yellow dashed line) between mineralized supracrustal rocks on the left and unmineralized metavolcanic rocks on the right. **D.** Incompetent mineralized supracrustal rock from a waste pile. **E.** Clean-cut surface of a sulphide-bearing sample collected from a waste pile, pyrite and chalcopyrite occurs as fracture fill. **F.** Clean-cut surface of a sulphide-bearing sample from an old mine pit. Red-brown sulphide minerals (sphalerite) follow the compositional boundary between a fine-grained and a medium-grained supracrustal rock.

**Figure 5.** Stereogram of the measured foliations plotted as poles to planes, contoured with 1% area contours (interval 1, 3 $\sigma$ ). Cylindrical best fit of the entire dataset yields an open fold structure with an axial surface striking towards NO (AP1: 055/22). The two concentrations of poles seen on the right-hand side of the diagram may suggest two separate populations of foliations. Interpreted as two fold limbs, these imply a secondary tight fold structure with an axial surface striking towards SO (AP2: 140/75). The two folds have a coinciding fold axis that plunges to the SO (VA: 22/146).

**Figure 6.** Preliminary interpretation of field observations with the existing bedrock map (dimmed colours) as background. Colours according to figure 1, with the addition of dark green for undeformed dolerite. Strike and dip symbols represent measured orientations for foliation and metamorphic banding or layering, which generally strikes towards NW-SE. Some measurements possibly indicate an additional generation of structures with strike towards NNW-SSE to N-S.

**Figure 7.** Total magnetic intensity based on aeromagnetic measurements in 2018, generated by reduction of the total magnetic field intensity to the geomagnetic pole. Locations for outcrop measurements of magnetic susceptibility are shown with red circles, and petrophysical samples collected in 2018 with yellow circles.

**Figure 8.** Resistivity calculated from airborne VLF measurements acquired in 2018. Many linear anomalies of low resistivity correlate with powerlines and railroads, but low resistivity anomalies also correlate with some of the magnetic anomalies in *Vena gruvfält* (Vena ore field).

**Figure 9.** Ternary map showing the relative abundance of uranium, thorium and potassium, which is based on airborne measurements in 2018. The location of petrophysical samples collected in 2018 are shown with yellow circles.

**Figure 10.** Bouguer anomaly map based on gravity measurements acquired in previous work with a focus on regional coverage or other specific targets in nearby areas. A gravity campaign is planned for the spring of 2019 for denser coverage in the Vena area. Most of the known sulphide mineralizations in the area (red markers) appear as a chain following the northern and eastern side of the dominant gravity anomaly in the area, which possibly indicates a regional correlation between the mineralizations.

**Figure 11.** **A.** Classification of volcanic rocks with respect to total alkali versus silica content (after Middlemost 1994). **B.** Evaluation of the degree of secondary alteration. Many data points lie to the right of the igneous spectrum, which indicates that the rocks have undergone K alteration (after Hughes 1973). **C.** Classification with respect to immobile elements that are mostly unaffected by secondary processes show results consistent with a normal basalt-rhyolite volcanic series (after Winchester & Floyd 1977). **D.** TAS diagram for plutonic rocks (after Middlemost 1994).

**Figure 12.** **A.** Classification of the tectonic environment for formation of mafic intrusive rocks. WPB = within plate basalt, IAT = island arc tholeiite, MORB = mid-ocean ridge basalt, CAB = continental arc basalt (after Pearce & Cann 1973). **B.** Classification of the tectonic environment for formation of volcanic rocks. ACM = *active continental margin*, WPVZ = *within plate volcanic zone* (after Schandl & Gorton 2002). Symbols according to figure 11.

**Figure 13.** Plots of the concentrations of selected elements for **A.** metavolcanic rocks, **B.** granodiorites-tonalites, **C.** amphibolites, as well as **D.** post-orogenic syenitoids and dolerite, all normalised against primordial mantle (Wood et al. 1979). **E–F.** Rare earth element concentrations for the same rock groups, normalised to chondrite (Boynton 1984).

**Figure 14.** Plots of concentrations of Co, Cu, As, Pb, Bi and Ag in amphibolites and metavolcanic rocks. Note that all axes are logarithmic with the unit ppm (weight). The mineralised samples are significantly enriched in these metals in comparison to their non-mineralised counterparts.

**Figure 15.** Plots of Co, Cu, SiO<sub>2</sub> and Nb versus Zr, an immobile element. The black trendline represents a hypothetical magmatic fractionation trend for the non-mineralised samples. High correlation factor ( $R^2$ ) for this trend indicates that magmatic fractionation is the main control on distribution of Co and SiO<sub>2</sub> within non-mineralised samples. Note that Co and Cu are plotted on logarithmic scales.