

Bergslagen, etapp 1

# REE-linjen i Bergslagen

## – sammanfattning av provtagning och analyser

Erik Jonsson

maj 2020

SGU-rapport 2020:17



Omslagsbild: Del av de mycket omfattande och delvis REE-rika varphögarna vid det gamla järnmalmsfältet Rödbergsgruvorna, väster om Nora.  
Fotograf: Erik Jonsson

Författare: Erik Jonsson  
Granskad av: Dick Claeson  
Ansvarig enhetschef: Ildiko Antal Lundin  
Redaktör: Lina Rönnåsen  
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)

## INNEHÅLL

Sammanfattning.....	4
Inledning och bakgrund .....	5
Provtagning och analyser .....	8
Innehåll av REE och andra kritiska metaller.....	9
Fagerstaområdet.....	10
Riddarhytteområdet.....	12
Noraområdet .....	16
Slagger och anrikningsgods.....	28
Förekomst av andra kritiska metaller.....	30
Antimon.....	30
Beryllium.....	30
Gallium .....	30
Germanium .....	31
Hafnium.....	31
Indium.....	31
Kobolt.....	31
Niob och tantal.....	32
Platinagruppens metaller .....	32
Skandium .....	32
Vanadin.....	32
Vismut.....	32
Volfram.....	33
Slutsats och diskussion .....	33
Förslag till uppföljning.....	35
Referenser.....	36

## SAMMANFATTNING

Sällsynta jordartsmetaller (oftast förkortade REE, efter engelskans *Rare Earth Elements*) är bland de mest kritiska råmaterialen för dagens och morgondagens industri och teknologi. De förekommer i en mångfald av geologiska miljöer i Europa, med en stor koncentration i den svenska delen av den Fennoskandiska skölden. Inte minst i den paleoproterozoiska malmprovinsen Bergslagen uppträder REE anrikade i ett flertal olika typer av mineraliseringar; från tidigorogena apatitjärnmalmer via skarn till mestadels senorogena granitpegmatiter – liksom i en del mindre väl kända mineraliseringstyper. De bildades i anslutning till olika faser av den svekokarelska orogenesisen under en tidsperiod åtminstone omfattande cirka 100 miljoner år.

Specifikt den så kallade REE-linjen är ett mer än 100 km långt, nordost-sydvästligt utsträckt bälte av felsiska metavulkaniska bergarter med inlagrade karbonatstenar i västra centrala Bergslagen. Bältet hyser REE-rika järn ± polymetalliska skarnmineraliseringar av så kallad Bastnästyp. Namnet härrör från Bastnäsfältets gruvor, i vilka man upptäckt både de första lätta REE samt ett flertal mineral med höga halter av dessa metaller, till exempel just bastnäsit. Inom REE-linjen uppträder bastnästyp-mineraliseringarna främst koncentrerade i form av lokala kluster, specifikt kring Nora i sydväst, Riddarhyttan i den centrala delen, samt Norbergsområdet och Knutsbo i nordost.

Det aktuella projektet genomfördes för att försöksvis undersöka om REE-mineraliseringar kan uppträda i vidare omfattning i anslutning till REE-linjen och dess kluster, liksom för att testa om fler mineraliseringstyper än vad som är känt också kan ha associerade anrikningar av REE. En grundtanke var och är att många REE-mineraliseringar kan ha missats under tidigare karteringar och undersökningar på grund av att de enskilda mineralen kan vara mycket finkorniga och inte speciellt uppseendeväckande— i synnerhet inte för ett otränat öga – och alltså därmed lätt kan ha förbisetts ("osynliga REE"). Några associationer från "klassiska" lokaler provtogs i referenssyfte samt för att också i dessa fall utvärdera förekomsten av REE i prov utan makroskopiska REE-mineral. Därutöver är information om förekomst av kritiska metaller i gruvavfall idag efterfrågad i Sverige liksom internationellt.

Totalt har fler än 150 prov insamlats från 60 fältbesökta lokaler och inalles har 114 litogeokemiska analyser utförts (inklusive SGU-standarder). Av dessa uppvisar 27 lokaler markant till kraftigt förhöjda REE-halter [omkring 500 respektive över 1 000 ppm (REE+Y)<sub>tot</sub>]. Åtminstone 18 av dessa representerar i sin tur sådana utan tidigare känd REE-mineralisering. Försöksvis provtagning och analyser av slagg och anrikningsgoods visar också markanta förhöjningar av REE. Därutöver har intressanta förhöjda halter av ett antal andra kritiska och sällsynta metaller som gallium, kobolt och skandium uppmätts i prov från flera lokaler. Alla analysresultat är inlagrade i SGU:s litogeokemiska databas.

## INLEDNING OCH BAKGRUND

De sällsynta jordartsmetallerna (eng. *Rare Earth Elements*, vanligen använt i form av akronymen ”REE”) är en grupp av grundämnen som enligt kemisk nomenklatur omfattar lantaniderna (lantanoïderna); lantan (La), cerium (Ce), praseodym (Pr), neodym (Nd), prometium (Pm), samarium (Sm), europium (Eu), gadolinium (Gd), terbium (Tb), dysprosium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), tulium (Tm), ytterbium (Yb) och lutetium (Lu), tillsammans med yttrium (Y) och skandium (Sc), alltså inalles 17 stycken metaller med mestadels mycket likartade egenskaper. Inom geologin och geokemin räknar man oftast inte med skandium, utan klassificerar REE som lantaniderna tillsammans med yttrium. Därutöver är prometium i gemen aldrig med då den endast förekommer i en försvinnande liten total mängd på planeten.

De sällsynta jordartsmetallerna utgör idag kritiska beståndsdelar i en mycket stor andel av modern teknologi och inte minst sådan med centrala applikationer inom ”grön” eller ”fossilfri” energi-produktion och elektromobilitet, för vilka behoven av REE förutspås att öka kraftfullt (Haxel m.fl. 2002, Alonso m.fl. 2012, Wall 2014). Det faktum att Kina helt dominerar världsmarknaden för REE (med omkring 95 procent av produktionen av de flesta REE) och att Europa idag inte har någon egen produktion, har gjort att förnyad intra-europeisk prospektering efter dem blivit högaktuell. Det senare inte minst då återvinning inte kan kompensera de ökande behoven i någon relevant utsträckning i den närmaste framtiden (se t.ex. Binnemans m.fl. 2013, Ladenberger m.fl. 2018, samt referenser däri).

Ur ett europeiskt perspektiv är ett av de mest prospekteringsrelevanta områdena för REE den Fennoskandiska skölden, och då inte minst dess svenska del (Goodenough m.fl. 2016), i vilken den klassiska malmprovinen Bergslagen framstår som ovanligt diversifierad med avseende på geologiska processer som koncentrerat dessa metaller. De sällsynta jordartsmetallerna uppträder här anrikade i ett flertal olika typer av mineraliseringar: från apatitjärnmalm (kirunatypmalm, till exempel Grängesberg) via skarn till senorogena granitpegmatiter, liksom i en del mindre väl kända mineraliseringstyper, vilka alla bildades under olika delfaser av den svekokarelska orogesen (Jonsson m.fl. 2019a, b). Beroende på mineraliseringstyp varierar totalhalterna av REE, deras inbördes proportioner, liksom värde mineralogin. Så är exempelvis apatitjärnmalmerna och skarnen främst anrikade på de lättare REE (dominerade av cerium och lantan, men också ofta relativt rika på exempelvis neodym), medan i princip alla granitpegmatiter av anrikad typ (det vill säga främst sådana tillhörande den så kallade NYF-familjen, efter deras rikedom på niob, yttrium och fluor) domineras av de tunga REE tillsammans med just yttrium (se t.ex. Jonsson m.fl. 2019a). Av dessa torde dock idag endast apatitjärnmalmerna samt skarnförekomsterna vara av potentiellt ekonomiskt intresse.

Den globala upptäcktshistorien för REE startade i östra Bergslagen i och med publikationen om det nya grundämnet *yttria* (Gadolin 1794), sedermera påvisat varande en blandning av yttrium och tunga REE som ytterbium. Denna först upptäckta jordartsmetall(-blandning) hade isolerats ur ett mineral senare känt under namnet gadolinit, från en granitpegmatit som då bröts vid Ytterby norr om Stockholm. I och med upptäckten av den första lätta sällsynta jordartsmetallen, cerium, och den vetenskapliga publikation som utkom 1804 som resultat av detta (Hisinger & Berzelius 1804) sattes också Bastnäsgruvorna vid Riddarhyttan i västra centrala Bergslagen på de kemiska och mineralogiska kartorna världen över. Fortsatta undersökningar av de udda, metallrika mineralassociationerna som dessa gruvor successivt blottade ledde också till ytterligare ett antal upptäckter av både grundämnen och mineral, exempelvis det som namnsattes just efter förekomsten, bastnäsit (ursprungligen beskrivet av Hisinger 1838 som ”basiskt fluorcerium” fick den sedermera namnet ”bastnäsit” efter upptäcktslokalen). Det var också i Bastnäsfältet som den första fokuserade brytningen av REE-malm i världen startades under 1800-talet (se t.ex. Carlborg 1923). Då ett flertal förekomster i regionen uppvisade besläktad mineralogi, kemi och geologisk

position myntades sedermera den övergripande beteckningen ”förekomster av bastnästyp” (Geijer 1961). Utmärkande för dem är att de alla är järnskarnmalmer dominerade av magnetit samt att de är rika på REE, mestadels bundet i silikater som allanitgruppens mineral, cerit-(Ce), törnebohmit-(Ce) etc., men också i form av REE-fluorokarbonater, mest typiskt i form av bastnäsit-(Ce). Den totala floran av REE-mineral är omfattande och diversifierad (tabell 1). Typiskt i flertalet av dessa mineraliseringar är ett cerit- eller britolitartat mineral, tillsammans med ett allanitgruppmineral och eventuell bastnäsit.

**Tabell 1.** Mineral med essentiella REE i bastnästypmineraliseringarna och deras kemiska formler.

Mineral:	Formel:
Allanit-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{LREE})\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2[\text{SiO}_4][\text{Si}_2\text{O}_7]\text{O}(\text{OH})$
Bastnäsit-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})(\text{CO}_3)\text{F}$
Bastnäsit-(La)	$(\text{La}, \text{LREE})(\text{CO}_3)\text{F}$
Cerianit-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{REE})\text{O}_2$
Cerit-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE}, \text{Ca})_9(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{SiO}_4)_6(\text{SiO}_3\text{OH})(\text{OH})_3$
Delhuyarit-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})_4\text{Mg}(\text{Fe}_2\text{W})\square[\text{Si}_2\text{O}_7]_2\text{O}_6(\text{OH})_2$
Dissakisit-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{LREE})\text{MgAl}_2[\text{SiO}_4][\text{Si}_2\text{O}_7]\text{O}(\text{OH})$
Dollaseit-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{LREE})\text{Mg}_2\text{Al}[\text{SiO}_4][\text{Si}_2\text{O}_7]\text{F}(\text{OH})$
Ferriallanit-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{LREE})\text{Fe}^{3+}\text{AlFe}^{2+}[\text{SiO}_4][\text{Si}_2\text{O}_7]\text{O}(\text{OH})$
Ferriperbøeit-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{LREE})_3(\text{Fe}^{3+}\text{AlFe}^{2+})[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4]_3\text{O}(\text{OH})_2$
Fluocerit-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})\text{F}_3$
Fluocerit-(La)	$(\text{La}, \text{LREE})\text{F}_3$
Fluorbritolit-(Ce)	$\text{Ca}_2(\text{Ce}, \text{LREE})_3[\text{SiO}_4]_3\text{F}$
Fluorbritolit-(Y)	$\text{Ca}_2(\text{Y}, \text{REE})_3[\text{SiO}_4]_3\text{F}$
Gadolinit-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE}, \text{Y})_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$
Gadolinit-(Nd)	$(\text{Nd}, \text{Y}, \text{REE}, )_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$
Gadolinit-(Y)	$(\text{Y}, \text{REE}, )_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$
Håleniusit-(La)	$(\text{La}, \text{LREE})\text{OF}$
Hingganit-(Y)	$(\text{Y}, \text{REE}, )_2\text{Be}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$
Lantanit-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})(\text{CO}_3)_3\text{F} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Magnesorowlandit-(Y)	$(\text{Y}, \text{REE})_4\text{MgSi}_4\text{O}_{14}\text{F}_2$
Monazit-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})(\text{PO}_4)$
Parisit-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{LREE})_2(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$
Percleveit-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})_2\text{Si}_2\text{O}_7$
Synchysit-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{LREE})(\text{CO}_3)_2\text{F}$
Taipingit-(Ce)	$(\text{Ce}_7\text{Ca}_2)_9\text{Mg}(\text{SiO}_4)_3[\text{SiO}_3(\text{OH})]_4\text{F}_3$
Törnebohmit-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})_2\text{Al}[\text{SiO}_4]_2(\text{OH})$
Ulfanderssonit-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})_{15}\text{CaMg}_2[\text{SiO}_4]_{10}[\text{SiO}_3\text{OH}](\text{OH}, \text{F})_5\text{Cl}_3$
Västmanlandit-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})_3\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_2\text{Si}_5\text{O}_{19}(\text{OH})_2(\text{F}, \text{OH})$

Vissa av förekomsterna, särskilt de i Bastnäsfältet, uppvisar också – utöver de allestädes närvarande magnetitdominerade järnmalmerna – associerad koppar-, kobolt-, molybden- och vismutmineralisering (se t.ex. Geijer 1923, Andersson 2004 samt analysdata från detta projekt; se avsnitt *Riddarhytteområdet*). Sedermera har också lokalt bastnästypliknande REE-mineralisering uppmärksammat i närliggande bandade järnmalmer som i Högforsgruvorna nordnordost om Bastnäs (Jonsson & Högdahl 2013). Totalt sett, och om man väljer att räkna in både de REE-anrikade skarnen i Noratrakten och de genetiskt möjligen mera tvetydiga (och endast sparsamt undersökta) mineraliseringarna i Knutsboområdet (Jonsson m.fl. 2019a), förekommer bastnästyp-mineraliseringarna fördelade längs en markant specifik zon i Bergslagen.

Begreppet ”REE-linjen” introducerades av Jonsson & Högdahl (2013) för att beskriva det mer än 100 km långa, nordost-sydvästligt utsträckta, linjära bälte av i varierande grad omvandlade felsiska metavulkaniska bergarter med inlagrade karbonatstenar i västra centrala Bergslagen, som hyser REE-rika järn ± polymetalliska skarnmineraliseringar av så kallad Bastnästyp (figur 1). Över lag är förekomsterna av bastnästyp representanter för processer där mineraliseringar bildats av högt tempererade hydrotermala lösningar med övervägande magmatiskt ursprung, sannolikt i anslutning till en fas av den (svekofenniska) vulkaniska-subvulkaniska aktiviteten för omkring 1,90 till 1,89 miljarder år sedan (Jonsson m.fl. 2019a, Sahlström m.fl. 2019). Med tanke på utbredningen av förekomster har dessa processer uppenbarligen varit verksamma på regional skala och är därmed inte bara betrakta som lokala, isolerade fenomen. Detta innebär, tillsammans med andra kända mineraliseringstyper av både bas-, special- och ädelmetaller, att REE-linjen i sin vidare bemärkelse kan betraktas som prospekteringsrelevant.

Under tidigare undersökningar av REE-linjen med omnejd (Högdahl m.fl. 2015, Jonsson m.fl. 2017, Jonsson m.fl. 2019a) konstaterades att avsevärda mängder REE förekommer i form av (mycket) finkorniga mineralaggregat i både bekanta och tidigare okända mineral- och bergartsassociationer, sålunda vad man kunde kalla ”osynliga REE”. Om detta förekommer i vidare skala och områden avsågs också testas i föreliggande studie.

Det aktuella provtagnings- och analysarbetet gjordes med denna bakgrund för att testa utbredningen av REE-anrikning och potentiell mineralisering i områden i och i närhet av REE-linjen, med fokus på luckor mellan kända förekomster och där vi inte har just någon information. Kunskap om förekomster av REE och andra kritiska metaller i befintligt gruvavfall som varphögar är idag efterfrågad, liksom deras potential som vektorer för att hitta nya mineraliseringar och mineraliseringstyper.

REE-linjens idag kända förekomster och deras mineralogi sammanfattades nyligen av Jonsson m.fl. (2019a).

## PROVTAGNING OCH ANALYSER

Under 2017 gjordes grundläggande litteratur- och kartstudier, och därefter tre kortare fältinsatser för provinsamling i vad som kan betecknas som ”luckor” i den centrala och södra delen av REE-linjen, samt för att till dels provta referensmaterial i den centrala delen (se figur 1). De förra insatserna riktades dels mot mineraliseringar i området nordost om Fagersta, samt i trakten av Nora, med fokus sydväst därom. År 2018 genomfördes ytterligare två fältinsatser i det sydvästra till södra delområdet av REE-linjen. Över lag begränsades arbetet på grund av tids- och personalbrist, och endast en av tre ursprungligen inbokade personer (EJ) var i slutändan verksam inom delprojektet.

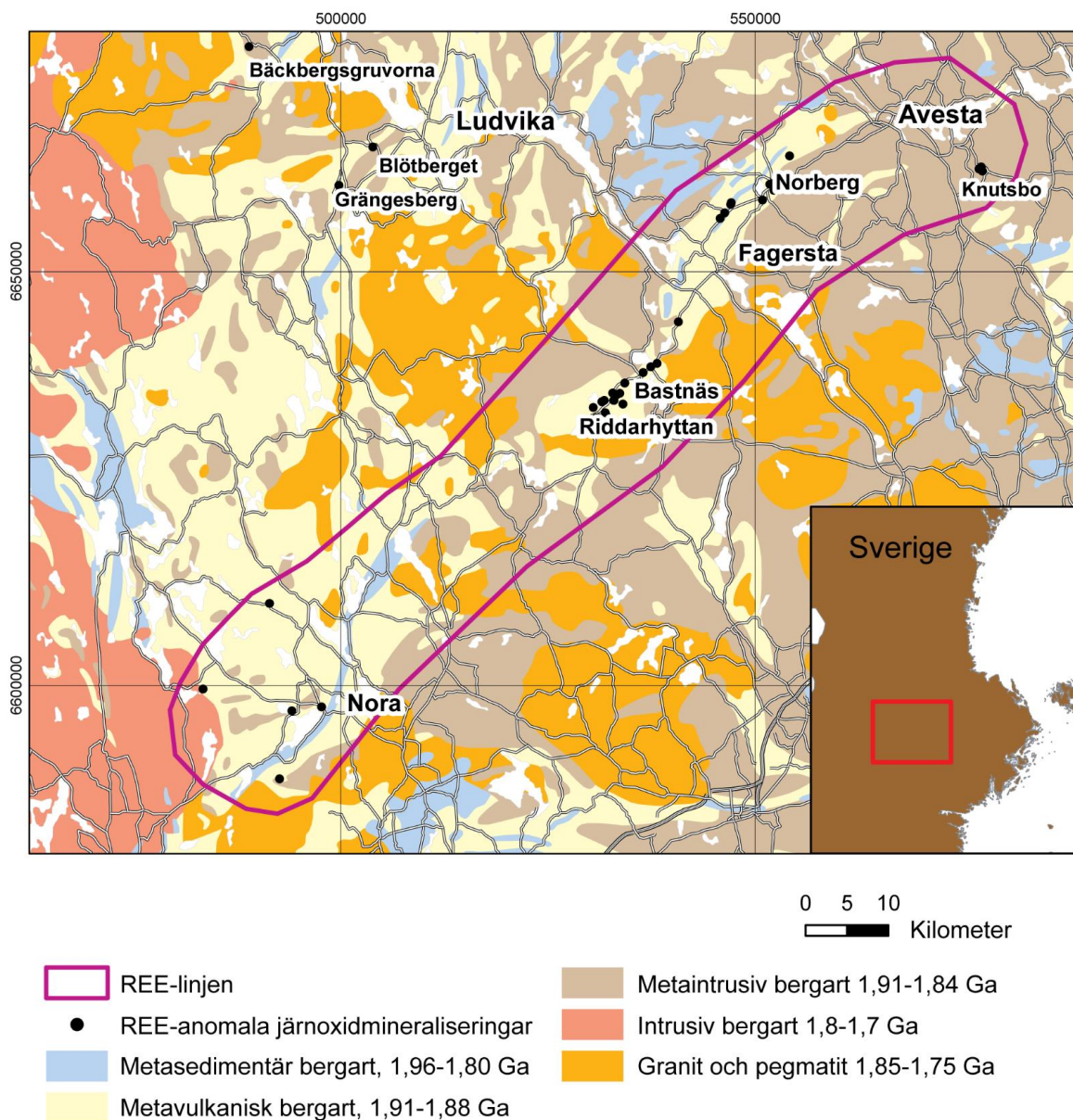
Totalt har cirka 150 prov insamlats från inalles 60 lokaler (gruvor, mineraliseringar och hållar i mineraliserade stråk) för i första hand litogeokemisk analys av bulkprov. På sikt finns möjligheten att utföra mer detaljerade mineralogiska och petrografiska undersökningar, analyser och karakterisering (de sistnämnda undersökningstyperna dock inte inom ramen för föreliggande studie; se avsnitt *Förslag till uppföljning*). Av de insamlade proven har 114 bulkgeokemiska analyser utförts (inkluderande SGU-standarder; begränsning av antalet analyser baserades på projektbudget). Huvudfasen av kemiskt analysarbete avslutades under december 2018 och analysresultaten har under 2019 införts i SGU:s bergartskemiska databas. Alla analyser har utförts av ALS Scandinavia AB och omfattade provberednings- och analysprogrammen PREP-31Y, CCP-PKG01, ME-MS41 och PGM-ICP23. Detta urval baserades på att erhålla maximal täckning av analyserade metaller och samtidigt synkronisera med andra litogeokemiska analysdataset för berggrund vid SGU, tillsammans med SGU:s etablerade interna standarder. I flera fall av verkligt höga halter av individuella REE i proven innebar användandet av dessa analysprogram att de gick över maxgränsen för metoden och kan därför endast avrapporteras som minima, exempelvis ”>10 000 ppm Ce” eller ”>1 000 ppm Dy”. Då provresterna efter analys har återförts till SGU kan fullständiga analyser (med annan metodik) av sådana REE-rika prov genomföras vid en eventuell fortsättning av projektet, eller efter detsamma, om så efterfrågas. Alla angivelser i rapporten avseende totala REE-halter omfattar lantaniderna (utom prometium; Pm, som knappt existerar och därmed varken kan mätas eller avrapporteras) + yttrium REE+Y), men ej skandium (Sc). Skandium beter sig mineralkemiskt eller geokemiskt normalt inte som lantaniderna + yttrium, bland annat på grund av sin avvikande jonradie och åtföljer således inte de senare i de flesta geologiska processer. Alla plottar (så kallade spindelplottar) i rapporten visar REE-halter normaliserade mot en primitiv mantelsammansättning efter McDonough & Sun (1995).

Provtagningslokalerna (områdena) baserades generellt på en eller en kombination av följande parametrar: geografiskt (inklusive logistik) och tentativt stratigrafiskt läge (i relation till kända REE-mineraliseringar eller förmodade sådana stråk), karakteristiska mineral i förekomsten eller området, och/eller närhet till vad som kunde bedömas som potentiellt karakteristiska typer av omvandling av värdbergarterna, främst felsiska metavulkaniska bergarter. Andra kända anomalier innefattade i något fall också exempelvis förhöjd radioaktivitet/höga uran ± toriumhalter. Generellt är dessa parametrar inhämtade från respektive sammanställda på basis av litteratordata från äldre publikationer och rapporter med tyngdpunkten på klassiska SGU-arbeten som de av Geijer (1921, 1923, 1927, 1936) och Geijer & Magnusson (1944). För en bredare genomgång och ytterligare referenser till relevant litteratur, se Jonsson m.fl. (2019a).

Den föreliggande undersökningen är ej på något sätt komplett, utan skall betraktas som en rekognosceringsstudie. Antalet prov som analyserats per förekomst/gruva/fält är i samtliga fall litet, vilket innebär att representativiteten är liten eller obefintlig. Resultaten visar på 1) flera nya mineraliserade områden och förekomster, 2) den regionala naturen av REE-anrikning i och i anslutning till REE-linjen, 3) att konceptet ”osynliga REE” gäller i bredare bemärkelse, och 4) att det finns mycket god potential för ytterligare upptäckter av REE-mineraliseringar i det aktuella området i Bergslagen.

## INNEHÅLL AV REE OCH ANDRA KRITISKA METALLER

Huvuddelen av REE-linjen löper från Noraområdet i sydväst, via Riddarhyttanområdet, till Norbergsområdet i nordost (fig. 1). Därutöver tillkommer vad som kan tolkas som en fragmentarisk rest i form av det delvis metavulkanitdominerade stråk som hyser mindre väl kända REE-mineraliseringar i Knutsboområdet, i sin tur öster om Norberg. De tre delområdena vid Nora, Riddarhyttan och Norberg hyser de ”formellt” kända förekomsterna av bastnästyp, liksom några ytterligare (Geijer 1961, Jonsson m.fl. 2019a). För den aktuella undersökningen var fokus ursprungligen dels på de luckor som finns mellan Norberg och Riddarhyttan, dels kring och söder om de sämre kända förekomsterna i REE-linjens sydvästra del, runt Nora med omnejd. Ett mera sydligt fokus blev snart logiskt på grund av den då påbörjade malm- och mineralinventeringen av Västmanland, vilken täcker in en signifikant del av den centrala till nordöstra delen och därför överlappade geografiskt.



**Figur 1.** Förenklad berggrundsgeologisk karta över nordvästra Bergslagen med utbredningen av REE-linjen markerad (lilaröd linje) samt REE-rika järnoxidmineraliseringar utsatta. Modifierad efter Jonsson m.fl. (2019a).

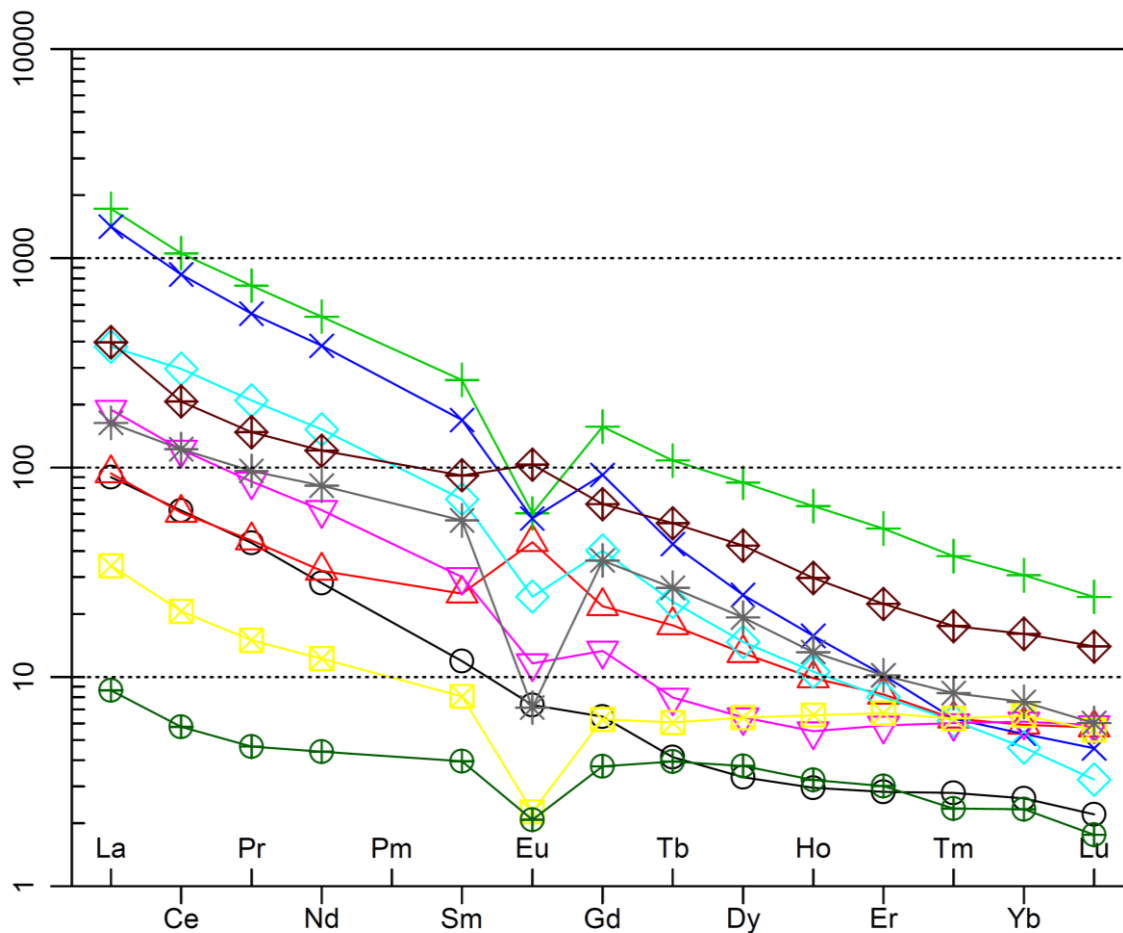
## Fagerstaområdet

Fagerstaområdets järnmalm domineras av i varierande grad skarnförande bandade järnmalm med olika proportioner mellan hematit och magnetit, men också mera typiska skarnjärnmalm uppträder lokalt och inte sällan intimt med de bandade järnmalmerna (se t.ex. Geijer & Magnusson 1944, Magnusson 1973). De största järnmalmerna var de i Semlafältet, i det stråk av mineraliseringar som huvudsakligen återfinns väster om Fagersta. Områdets gruvor är i sig inte kända för REE-mineralisering, men de ligger i REE-linjen – mellan Norberg i nordost och Riddarhyttan i sydväst – och de sydligaste av Norbergsområdets förekomster är relativt nära (fig. 1). Av dessa är specifikt Malmkärragruvorna, nordnordost om Lilla Malmkärra, en känd mineralisering av bastnästyp, med lokalt mycket rika REE-associationer (se t.ex. Holtstam & Andersson 2007, Jonsson m.fl. 2019a och referenser däri). Söder därom försvinner det kända spåret av REE-anrikning, med undantag för nyligen uppmätta förhöjda halter av REE i Aspgruvan-Korsstensgruvan direkt sydsydväst om Malmkärra (Jonsson m.fl. 2019a). Till synes följer mineraliseringarna i dessa tre gruvor en karbonatstenshorisont som utgör en (separat) parallell till de karbonatstenar som hyser merparten av kända REE-förekomster i Norbergsområdet. I synnerhet i det östra stråket (östra Fagersta-Västanfors och norrut) har påträffats lokala mineraliseringar med kopparsulfider och molybdenglans i amfibolförande skarn. Ibland förekommer enheter av malmkvarst, lokalt med ofikalcitiska associationer, där merparten av mineralisering ofta är lokaliserade i kraftigt glimmeromvandlade felsiska metavulkaniter (se också Geijer & Magnusson 1944, Magnusson 1973). Dessa egenheter erinrar på flera sätt om sådana relaterade till många av de mest karakteristiska mineraliseringarna av bastnästyp.

En svit av mineraliseringar provtogs i Fagersta-Västanfors i söder/sydost, till området kring Lilla Malmkärra och Väg-/Vilhelminagruvorna i norr/nordväst. Av de provtagna gruvorna finns flera olika mineraliseringstyper representerade, från till synes mineralogiskt enkla, hematitdominerade bandade järnmalm, via magnetitrikare malmer (konverterad hematit?), till mera komplexa skarnassociationer, inklusive sådana med i sammanhanget potentiella nyckelmineral som molybdenglans och kopparsulfider. Det är också intressant och sannolikt relevant att notera den starka glimmeromvandlingen av de vulkaniska värdbergarterna i flera av dessa stråk.

Över lag uppvisar de analyserade proven från Fagerstaområdet allmänt till starkt förhöjda REE-halter, med fyra lokaler omkring eller över 1 000 ppm totalhalt REE+Y (Nordstjärnegruvan 1 105 ppm, Vilhelmina-Väggruvorna 1 054 ppm, Åsgruvan 984 ppm, Mossgruvan 1 377 ppm) och ytterligare sex lokaler/prov med halter kring eller över 500 ppm REE+Y. Av dessa ligger Vilhelmina-Väggruvorna samt gruvan sydväst om Thomasgruvan i närheten av det kända REE-mineraliserade stråket vid Malmkärra-Korsstensgruvorna (Jonsson m.fl. 2019a). De uppvisar även varierande men till dels markanta halter av REE (47–1 054 ppm, respektive 567 ppm totalhalt REE+Y).

Generellt visar REE-plottar normaliserade mot primitiv mantel anrikningstrender som är lika de klassiska förekomsterna i Bastnäs, men med en viss variation avseende de gängse negativa Eu-anomalierna som utmärker de senare (fig. 2). Även i Riddarhytteområdet uppträder dock liknande avvikelser, som i fallet med analyserade varpprov från Bäckegruvan (fig. 2).



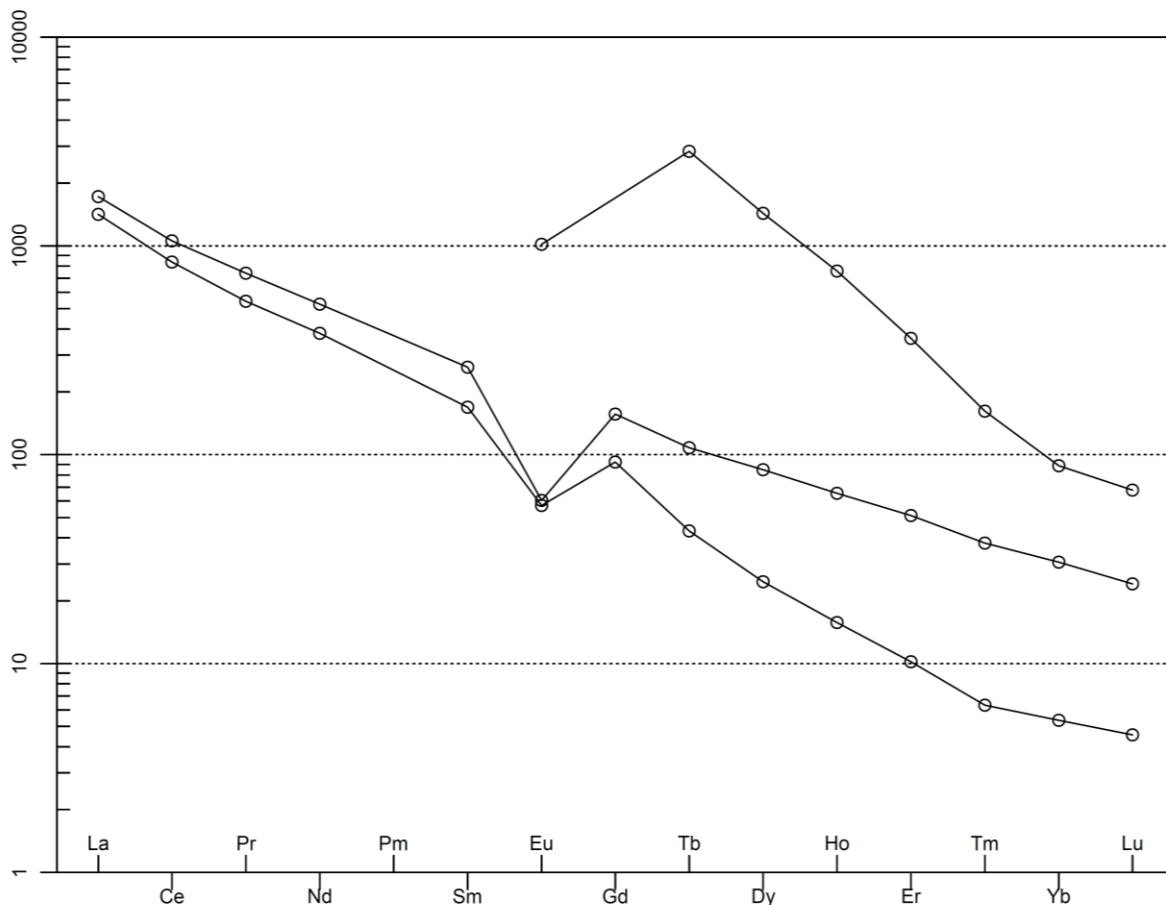
**Figur 2.** REE-plottar av utvalda prov från Fagerstaområdet. 3 prov från Nordstjärnegruvan: ljusblå/turkos kurva med rutertecken, rosa kurva med upp-och-nedvända trianglar samt gul kurva med kvadrater. 1 prov från gruva SSO Lilla Malmkärra/SV Thomasgruvan: grå kurva med asterisker. 2 prov från Vilhelmina-Väggruvorna: brun kurva med rutertecken med + samt grön kurva med cirklar med +; den förstnämnda med en svag positiv Eu-anomali. Som referens visas även varierande REE-anrikade varpprov från Nya Bastnäs (ljusgrön kurva med + och mörkblå kurva med x) och Bäckegruvan (svart kurva med cirklar och röd kurva med trianglar; den sistnämnda med markant positiv Eu-anomali), Riddarhyttan. Alla normaliserade mot primitiv mantel enligt McDonough & Sun (1995).

Av provtagna associationer med högre REE-halter är det noterbart att de utgörs av såväl amfibolskarn, som i varierande grad järnoxidförande glimmerrika omvandlingsbergarter, och vad som kan betecknas som mer eller mindre uppenbara järnoxidmalmer (magnetitdominerade). Så är exempelvis provet med högst REE-halt från Nordstjärnegruvan (1 105 ppm) en grovt magnetitblastisk hematitmalm. Detta är en smula oväntat, då järnoxiderna i sig inte kan hålla några relevanta mängder REE och man i normala fall förväntar sig att de föreligger bundna i form av silikater, fosfater eller karbonater. I fallet med de snarlika halter och förhållandevis REE-anrikade proven från Jakobsgruvans varpar (395–635 ppm totalhalt REE+Y), utgörs de av amfibolskarn, sporadiskt molybdenglansförande, liksom sulfidförande magnetitmalm. Av proven från Vilhelmina-Väggruvorna är det REE-rikaste provet (1 054 ppm) en svagt magnetitförande glimmer-amfibolbergart (sannolikt metamorft överpräglad omvandlingsbergart). Det är intressant att notera att särskilt Nordstjärnegruvan, med uppmätta REE-halter till över 1 000 ppm REE+Y, också är den gruva i området som historiskt varit känd för sina höga halter molybden (Magnusson 1973). Så är också ett av de analyserade proven markant förhöjt på denna metall, med 123 ppm Mo. I detta prov är också kobolt något förhöjt, med 22 ppm Co (se även nedan, avseende karakteristiska associerade metaller i Bastnäs-/Riddarhytteområdet).

## Riddarhytteområdet

Även om järnoxidmalmer, främst magnetitdominerade i skarn, men också bandade hematit-magnetitmalmer, helt dominerat gruvbrytningen i Riddarhyttan med omnejd har också andra malmtypen varit lokalt och periodvis viktiga. Exempelvis har koppar, kobolt och REE utvunnits ur malmer i samma stråk. Det var också i malm härifrån som Georg Brandt ursprungligen påvisade kobolt på 1730-talet (se t.ex. Tegengren 1924). Riddarhytteområdets malmer, och specifikt de i Bastnäsfället (fig. 1), är de ojämförligt mest välkända av skarnmineraliseringarna i REE-linjen, inte bara på grund av att de kom att ge namn åt mineraliseringstypen utan också för deras centrala roll i internationell kemisk och mineralogisk vetenskapshistoria (se t.ex. Andersson 2004). De utgör också de mest diversifierade med avseende på REE-mineral (Holtstam & Andersson 2007, Jonsson m.fl. 2019a; tabell 1).

I Bastnäsfället provtogs specifikt varpmaterial både med och utan makroskopisk REE-mineralisering för att testa förekomsten av ”osynliga REE” och ge baslinjedata för referensändamål avseende analyser av andra möjliga REE-anrikade mineraliseringar (fig. 3–6). Således uppvisade ett grönt amfibolskarn med något magnetit och modest makroskopisk REE-mineralisering (allanitgruppmineral) en totalhalt om >40 000 ppm REE+Y; analyserna av ett flertal REE resulterade i halter över analysmetodens kapacitet, med Ce >10 000, Gd >1 000, La >10 000, Nd >10 000, Pr >1 000 och Sm >1 000 ppm. Andra noterbara halter av REE är Dy 965 och Y 4 170 ppm.



**Figur 3.** REE-plottar av tre varpprov från Nya Bastnäs, Riddarhyttan, normaliserade mot primitiv mantel enligt McDonough & Sun (1995). För provet med de högsta halterna av REE finns endast de tunga (Eu-Lu) representerade, då övriga (La-Sm) överskred den övre detektionsnivån (för höga halter för metoden).

Skarnassociationerna från Nya Bastnäs är karakteristiskt anrikade på ett flertal metaller utöver REE, vilka i kombination torde vara utmärkande för deras bildningsprocess. Troligen är de bildade genom reaktioner mellan en högtempererad, metallrik hydrotermal lösning av huvudsakligen magmatiskt ursprung och befintliga karbonatstenshorisonter i en lagrad vulkanosedimentär sekvens (se t.ex. Sahlström m. fl. 2019). Det REE-rika amfibolskarnprovet (ovan) uppvisade utöver förväntade järn- och kopparhalter således signifikanta halter av vismut, kobolt, molybden, något selen och tellur, guld, volfram och beryllium (Bi 2 420 ppm, Co 258 ppm, Mo 1 730 ppm, Se 1,8 ppm, Te 14 ppm, Au 2,2 ppm, W 339 ppm och Be 168 ppm). Gallium och germanium är också markant anrikade med halter om 911 respektive 104 ppm (jämför Jonsson & Högdahl 2019), medan tenn är modest men tydligt anrikat med en halt om 15 ppm Sn. I fallet med prov av amfibolskarn utan synliga REE-mineral uppmättes en totalhalt om 4 360 ppm REE+Y, vilket tydligt visar att signifikanta REE-halter kan föreligga i mineralassociationer utan observerbara nyckelmineral med essentiella REE ("osynliga REE"). En kvartsrik, svagt bandad "magnetitmalm" gav i sin tur 3 172 ppm REE+Y, och i båda dessa prov kan mindre förhöjningar ses av flera av ovan nämnda karakteristiska metaller (tydligast för kobolt, med 714 respektive 77 ppm).



**Figur 4.** Varp och gruvhål vid Nya Bastnäsfältet. Stängslen i övre delen av bakgrunden (i skogen) visar läget för S:t Göransgruvan och Ceritgruvan. I dessa varphögar uppträder en rad olika skarn- och malmassociationer, av vilka många innehåller REE-mineral. Foto: Erik Jonsson.



**Figur 5.** Bandat, något rostfläckt magnetit-amfibolskarn av en typ som i detta fall inte håller makroskopiska REE-mineral, men som ändå kan uppvisa markanta REE-halter (>4 000 ppm totala REE+Y enligt analys). Varpen vid Nya Bastnäsfältet, Riddarhyttan. Snusdosans diameter är 70 mm. Foto: Erik Jonsson.



**Figur 6.** Zonerad, mycket REE-rik association i ljusgrönt amfibolskarn; finkornig ljus cerit-(Ce) sammanvuxen med mindre mängder bastnäsit-(Ce) med flera mineral, omges av en mera grovkristallin bård av svarta kristaller av ferriallanit-(Ce). Den här typen av prov kan innehålla flera tiotals viktprocent REE+Y. Från varpen vid Nya Bastnäsfältet, Riddarhyttan. Bildbredd cirka 5 cm. Foto: Erik Jonsson.

Provtagning genomfördes också av varp vid Bäckegruvan (fig. 7), då denna representerar en sydlig fortsättning (i strykriktningen) på ”Bastnässtråkets” mineraliseringar samt representerar de ojämförligt största varpvolymererna i närområdet (gruvan bröts fram till 1979). Att Riddarhytteområdets mineraliseringar, även sådana som inte direkt kan sägas vara av bastnästyp, kan hålla förhöjda halter av REE visades tydligt av Jonsson m.fl. (2019a). De här analyserade proven från Bäckegruvan, en sulfidförande magnetitmalm och ett magnetitförande amfibolskarn, båda rika på järn och ett med markanta mängder koppar, uppvisar förhöjda halter av REE, 238 respektive 309 ppm REE+Y, vilket tillsammans med kombinerade förhöjningar av molybden (maximalt 25 ppm Mo), kobolt (maximalt 77 ppm Co), vismut (maximalt ppm Bi) tenderar till att anknyta till bastnästypens metallanomalier. Svaga förhöjningar av volfram (1,7 respektive 2,0 ppm W) är tillsammans med likaledes svagt förhöjda berylliumhalter noterbara i sammanhanget (2,4 respektive 3,8 ppm Be). Ett av Bäckegruveproven visar också på en förhöjning av guld, nära 0,1 ppm.



**Figur 7.** De mycket vidsträckta och delvis REE-förhöjda (aktuella analyser gav upp till >300 ppm REE+Y) varphögarna vid Bäckegruvan, vars moderna lave syns i bakgrunden till höger. De järnrika proven är förutom sina markanta kopparhalter också anomalt om än måttligt anrikade på kobolt, molybden och guld. I området finns också större ansamlingar med bland annat anrikningssand och slagg efter kopparframställning. Riddarhyttan. Foto: Erik Jonsson.

## Noraområdet

Nora med omnejd utgör det minst väl kända och sydvästligaste ”klustret” i REE-linjen (se t.ex. Jonsson m.fl. 2019a; fig. 1) i och med de närbelägna förekomsterna i Rödgruvefältet och Östra Gyttorpsgruvan. Området hyser en stor mängd äldre gruvor, främst brutna på järnmalm, men med lokala och mindre koncentrationer också av åtminstone ställvis (historiskt) brytbara sulfidmalmer. Provtagning genomfördes här dels i och kring från litteraturen bekanta REE-anrikade förekomster, dels också med bredare ansats för att potentiellt fånga upp okända typer av REE-mineralisering, också utanför den ”egentliga” REE-linjen.

Gruvorna vid Pershyttan (direkt sydväst om Nora; fig. 1, 8–9) bröts på vad som sannolikt utgjorde de största koncentrationerna av järnmalm i Noraområdet (Nora eller Nora-Vikers bergslag), från medeltiden och fram till 1967 (Geijer & Magnusson 1944, Magnusson 1973). Pershyttans malmer är i huvudsak bandade järnmalmer med både magnetit (dominerande) och hematit, vilka blivit relativt kraftigt påverkade av metamorfos, omkristallisation, deformation och intrusion av senare granitiska till pegmatitiska bergarter. Den sistnämnda processen har tolkats till att ha lett till spridd förekomst av exempelvis turmalin och ”ortit” i malmen (Geijer & Magnusson 1944, Magnusson 1973). Dåtidsens ”ortit” motsvarar alltså dagens allanitgrupp-mineral, vilka är mycket utbredda värdfaser för REE i mineraliseringarna av bastnästyp (se tabell 1). Även ordinär allanit-(Ce) och allanit-(Y) tillsammans med närbesläktad REE-förande epidot, är bland de viktigaste värdmineralerna för REE i många typer av bergarter.

Över lag visade inget av proven från Pershyttfältet några verkligt höga halter (det vill säga betydligt högre än 1 000 ppm REE+Y), även om ganska många prov visade på REE-förhöjningar. Varpvolymerna i området är dock totalt sett mycket stora, vilket bör beaktas med tanke på det i sammanhanget mycket måttliga antal prov som tagits och analyserats. Av de analyserade proven kan nämnas Åkergruvan med över 200 ppm REE+Y, Lockgruvan med 335 ppm REE+Y, Gropatorpsgruvorna (i sydvästra delen av Gamla Pershyttfältet) med flera prov med halter mellan 290 och 430 ppm REE+Y, samt Dammgruvorna (vid Nya Pershyttan, i den sydvästra förlängningen av fältet) med dryga 150 ppm REE+Y.



**Figur 8.** Mycket omfattande varphögar från historisk gruvbrytning fram till relativt sen tid föreligger vid Pershyttan (här vy över en del av den gamla Lockgruvans varpar). Pershyttan, sydväst om Nora. Prov från dessa högar visade halter till 335 ppm REE+Y. Foto: Erik Jonsson.



**Figur 9.** Åkergruvans plåtbeklädda lave i Pershyttanfältet; gruvan lades ned 1966. Analyser av prov från varparna uppvisar modesta men tydligt förhöjda REE-halter. Pershyttan, sydväst om Nora. Foto: Erik Jonsson.

Striberg (väster om Nora) utgör en omfattande ansamling av gruvor brutna på bandade järnmalmer; dessa är hematitdominerade (men lokalt ganska rika på magnetit) och över lag till synes betydligt mera välbevarade än de i Pershyttan. Också i fallet med Stribergsfältets malmer upphörde brytningen 1967 (Magnusson 1973). Två analyser av dessa vackert bandade järnmalmer visar att de är låghaltiga med avseende på REE med totalhalter kring 50–70 ppm REE+Y, och de kan betraktas som tämligen ”normala” bandade järnmalmer i Bergslagen, till skillnad mot vissa förekomster i bland annat Riddarhytteområdet (se Högdahl m.fl. 2015). Modesta förhöjningar av andra kritiska eller nära-kritiska metaller som skandium, vanadin och kobolt noterades i prov från Striberg (se nedan).

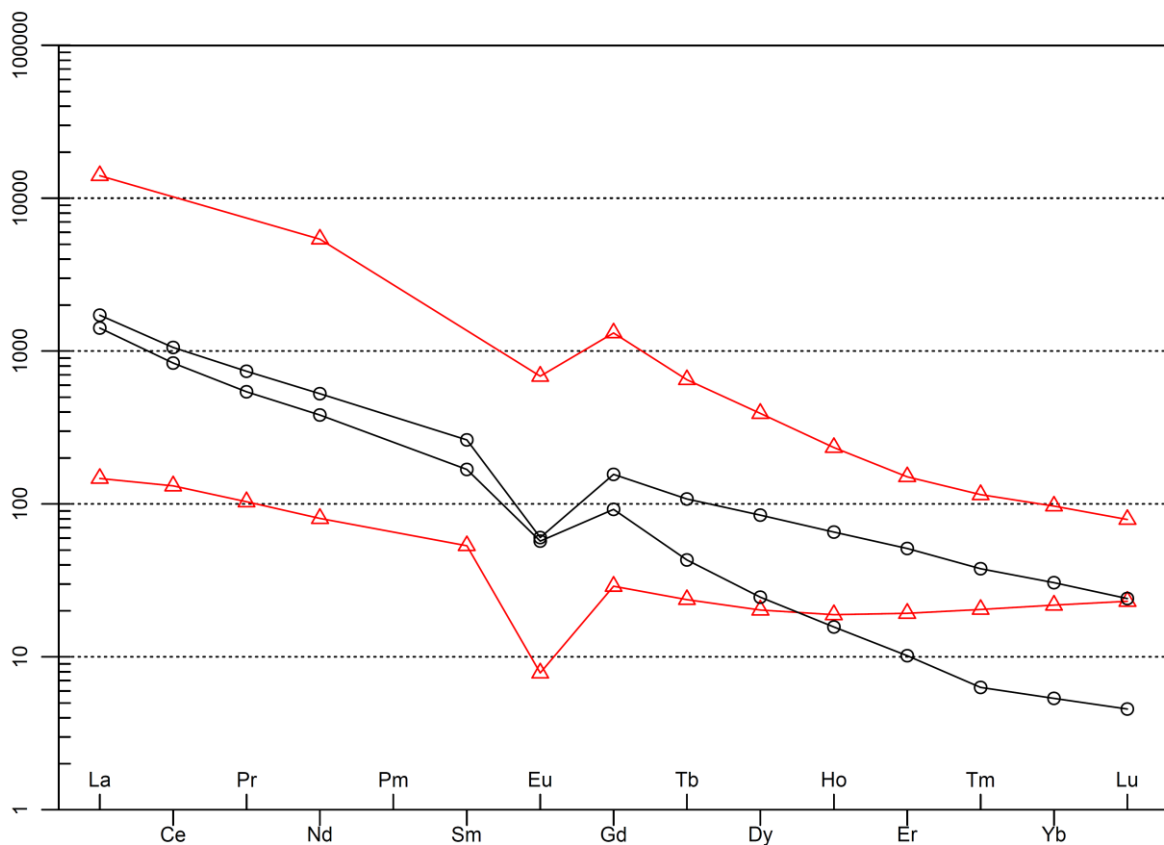
I området väster om Nora ligger utöver Stribergs gruvfält ett större antal både större och mindre järngruvor, av vilka ett urval har besökts och provtagits.

Bland de större och historiska gruvorna i detta område står också Åsbobergsgruvorna ut. De bröts främst på bandade järnmalmer men innehöll också bland annat lokala koncentrationer av sulfider. Av flera prov tagna i Åsbobergsgruvans varpar analyserades tre prov, vilka gav totala

REE-halter om 83, 174 och 572 ppm REE+Y; av dessa bestod provet med högst REE-halt av ett finkornigt ljusgrönt skarn, troligen epidotförande. Det är noterbart att ett av proven (sulfidrikt) uppvisade en markant förhöjd molybdenhalt om 134 ppm Mo.

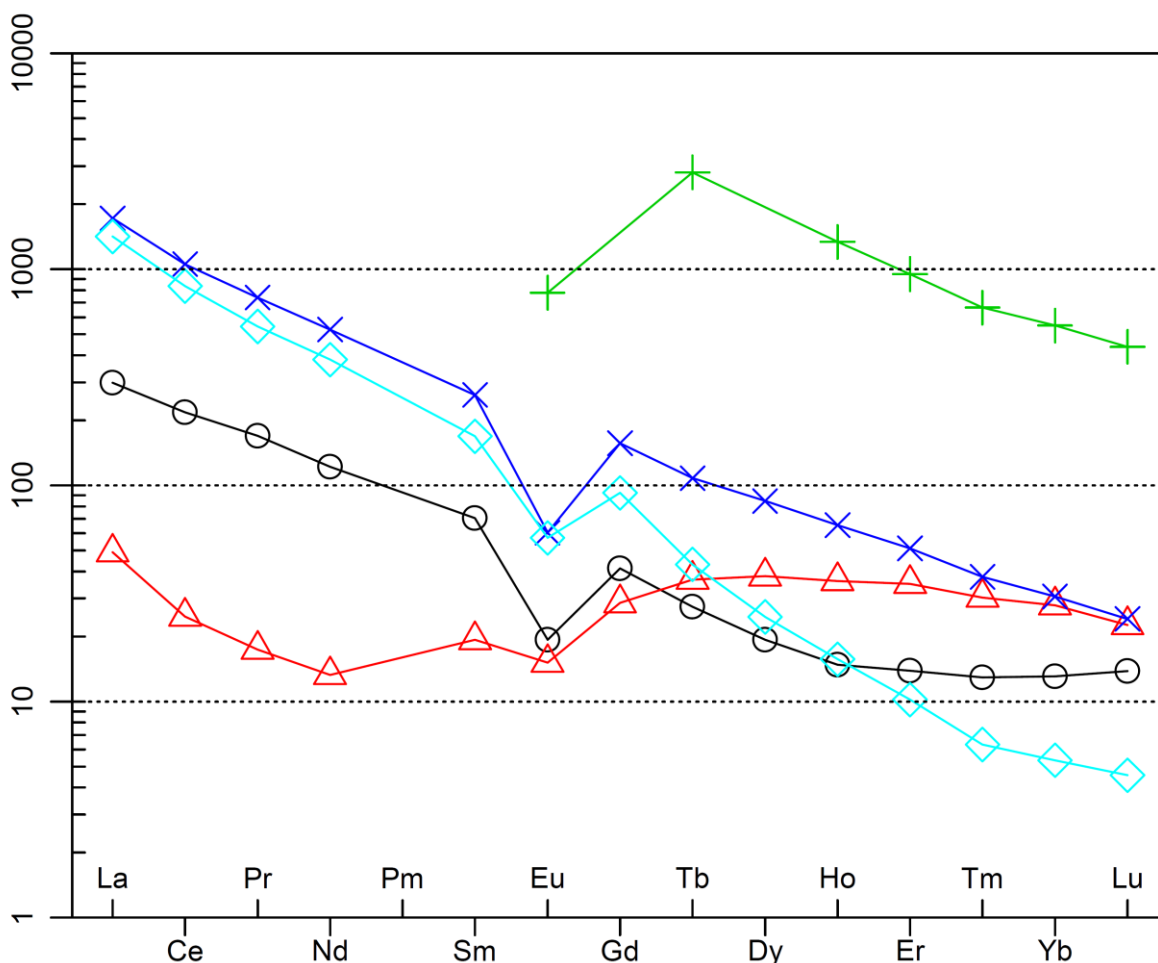
Flera andra mindre gruvor i området provtogs och visade totalhalter mellan 30, och som högst, 350 ppm REE+Y. I fallet med Södra Repabergsgruvorna gav analys av två varpprov i det ena fallet en signifikant förhöjd halt om knappa 600 ppm REE+Y, medan det andra analyserade provet uppvisade en synnerligen hög halt om >30 000 ppm REE+Y (analyserna passerade den övre detektionsnivån för flera REE; Ce >10 000 ppm, Pr >1 000 ppm och Sm >1 000 ppm; La låg nära övre detektionsnivån med över 9 000 ppm).

I båda fallen uppvisar REE (normaliserade mot primitiv mantel) en trend med relativ anrikning av de lättare REE, en markerad negativ Eu-anomali, samt, dock i varierande grad mellan de två, svagare till något svagare anrikade tyngre REE (fig. 10). Kurvorna överensstämmer över lag väl med trenden hos de karakteristiska bastnässkarnen (inlagda som referens i figuren). Yttriumhalten för det rikare provet var dryga 1 000 ppm Y.



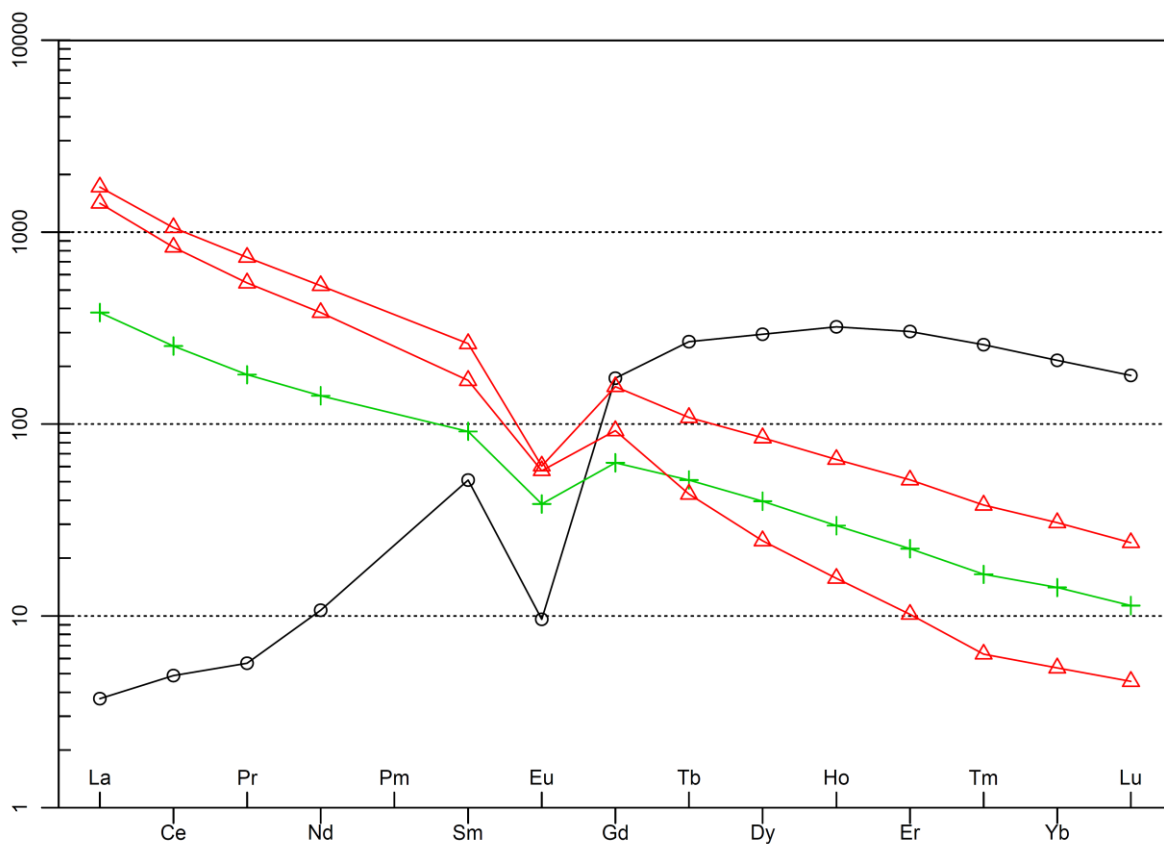
**Figur 10.** REE-plottar av två prov från Södra Repabergsgruvorna, väster om Nora (röda kurvor med trianglar) tillsammans med, som referens, två REE-rika varpprov från Nya Bastnäs, Riddarhyttan (svarta kurvor med cirklar), alla normaliserade mot primitiv mantel efter McDonough & Sun (1995). Det REE-rikaste provet från Södra Repabergsgruvorna (översta kurvan) saknar flera haltangivelser/punkter i plotten, då dessa jordartsmetaller (Ce, Pr och Sm) passerade den övre detektionsnivån för metoden.

Östra Gyttorpsgruvan är en mindre järngruva väster om Gyttorp (och Nora) som var bekant för sin lokalt rika förekomst av ”ortit” under sent 1800-tal (Nordenström 1890; Jonsson m.fl. 2019a). Provtagning av varpmaterial, både i varierande grad omvandlad värdbergart och malm samt ett prov med makroskopiskt misstänkt REE-mineralisering, visade från signifikanta REE-förhöjningar till mycket höga halter (passerade den övre detektionsnivån för analysmetoden), över 300 och 900 ppm, respektive >40 000 ppm REE+Y. Av de två förstnämnda utgörs det ena av en glimmeromvandlad (skölig) metavulkanisk bergart (904 ppm REE+Y) och den andra av amfibol-kloritförande magnetitmalm (305 ppm REE+Y). REE-mönstret för den omvandlade metavulkaniten uppvisar tydliga likheter med de från den klassiska bastnästypens mineralisering, med stark anrikning av i synnerhet de lätta REE (La-Sm) och en markant negativ Eu-anomali (fig. 11). Provet av silikatförande magnetitmalm med sin lägsta observerade totalhalt, däremot, uppvisar ett tämligen avvikande mönster; visserligen med en förhöjning av La+Ce, men med en knappt urskiljbar negativ Eu-anomali och en markant förhöjning av medeltunga REE (Gd-Yb).



**Figur 11.** REE-plottar av prov från Östra Gyttorpsgruvan (röd kurva med trianglar, svart kurva med cirklar samt grön kurva med +; den sistnämnda endast partiell då de lättare REE, La-Sm, alla överskred den övre detektionsnivån för den använda metoden). Som referens visas REE-rika varpprov från Nya Bastnäs, Riddarhyttan (ljusblå kurva med rutertecken och mörkblå kurva med x). Alla normaliserade mot primitiv mantel efter McDonough & Sun (1995).

Stråket med järnmalmer väster om Gyttorp och Östra Gyttorpsgruvan och nordost om Rödbergsgruvorna innehåller ett flertal, mestadels mindre järngruvor och järngruvefält. Av de som provtagits och analyserats bör nämnas Kopparbäcksgruvan vid Övre Kopparbäcken, med en förhöjning om knappa 230 ppm REE+Y, Bromsatorpsgruvan väster därom, med ett prov av magnetitförande amfibolskarn som uppvisade nära 1 900 ppm REE+Y, samt de (intressant benämnda) Stora Bastnäsgruvorna (eller Bastnäsbergsgruvan) med ånyo ett magnetitförande amfibolskarn med knappa 1 200 ppm REE+Y. Av dessa står det REE-rikare provet från Bromsatorpsgruvan ut, då det är förvånansvärt fattigt på LREE, men anrikt på HREE och, vilket inte syns i plotten, en stor andel yttrium (1 205 ppm Y av totalt 1 900 ppm REE+Y). Det skiljer således sig kraftigt i sin REE-profil, medan provet från Stora Bastnäsgruvan däremot uppvisar ett REE-innehåll som väl matchar de karakteristiska bastnässkarnens (fig. 12).



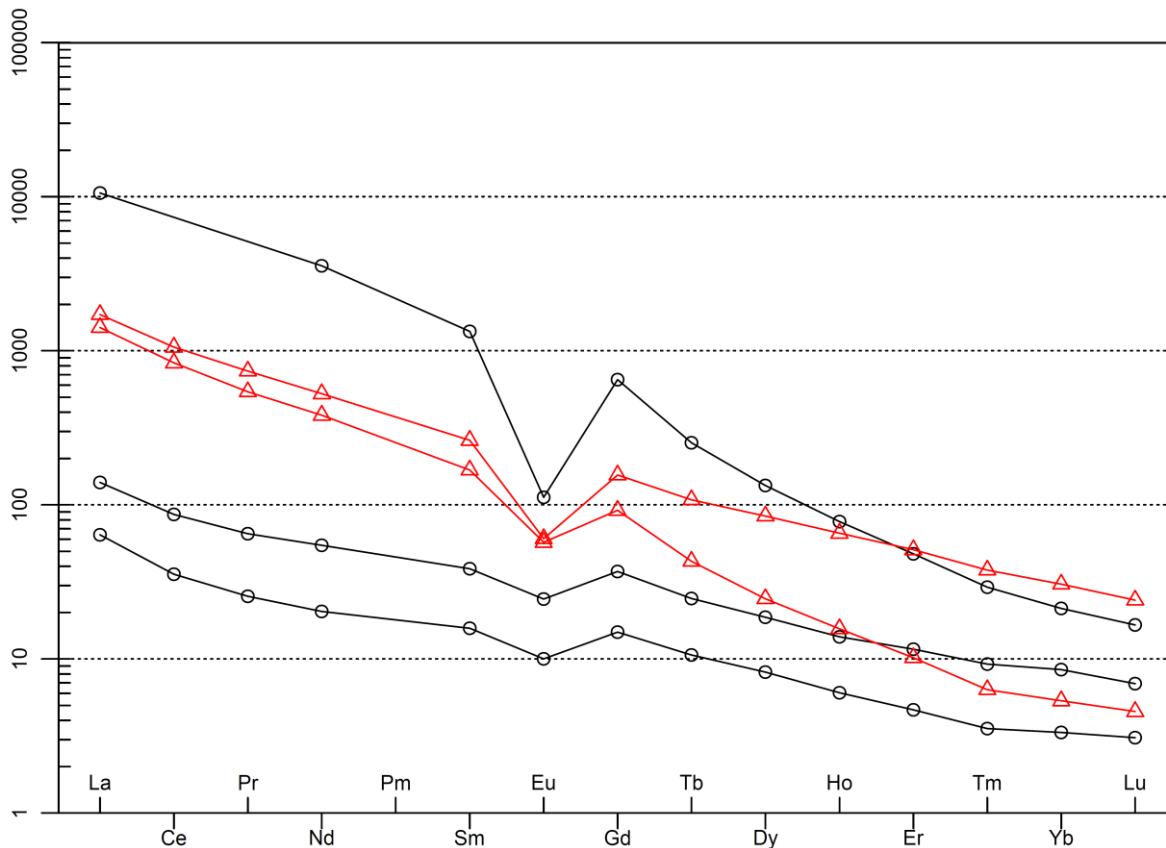
**Figur 12.** REE-plottar av prov från två mindre järngruvor väster om Gyttorp; Bromsatorpsgruvan (svart kurva med cirklar) och Stora Bastnäsgruvan (grön kurva med +) tillsammans med, som referens, två REE-rika varpprov från Nya Bastnäs, Riddarhyttan (röda kurvor med trianglar), alla normaliserade mot primitiv mantel efter McDonough & Sun (1995).

Rödbergsgruvefältets järngruvor, vidare väster om Gyttorp, har sedan slutet av 1980-talet varit bekanta för att åtminstone mycket lokalt hysa mineralassociationer av bastnästyp (Hammergren 1989, Holtstam & Andersson 2007, Jonsson m.fl. 2019a). Aktuell provtagning av de mycket stora och vidsträckta varphögarna i detta fält har fokuserats på dels olika amfibolskarn, inklusive sådana med sannolik, makroskopisk REE-mineralisering, samt varierande rikhaltiga koppars- respektive järnmalmsassociationer.

Ett mörkgrönt amfibolskarn med sparsamt förekommande sulfidmineral uppvisade en totalhalt av REE+Y på 476 ppm, en signifikant anrikning, medan ett annat, grovkristallint mörkt amfibolskarn med ganska rikligt med kopparkis gav 665 ppm totala REE+Y (från den övre, nordöstra delen av gruvområdet). En breccialiknande magnetit-kopparkisassociation gav 209 ppm och en magnetitmalm med associerad glimmerbergart uppvisade den lägsta uppmätta halten bland proven från Rödbergsgruvorna, 58 ppm REE+Y. Ett sandigt anrikningsgods av magnetit gav hela 846 ppm REE+Y (se också nedan), medan ett grovt anrikningsgods endast uppvisade 14,5 ppm REE+Y. Ett prov av ett ljusgrönt amfibolskarn (fig. 13) med vad som i fält tolkats som sannolika makroskopiska REE-mineral (tillhörande allanitgruppen) passerade den övre detektionsnivån med >24 000 ppm totalhalt REE+Y.



**Figur 13.** Amfibolskarn med markanta till höga halter av REE i varphög i Rödgruvefältet, väster om Nora. Prov med mindre korn och aggregat av makroskopiskt förmodade REE-silikater (allanit *sensu lato*) passerade den övre detektionsnivån för flera jordartsmetaller med en totalhalt REE+Y >24 000 ppm. Foto: Erik Jonsson.



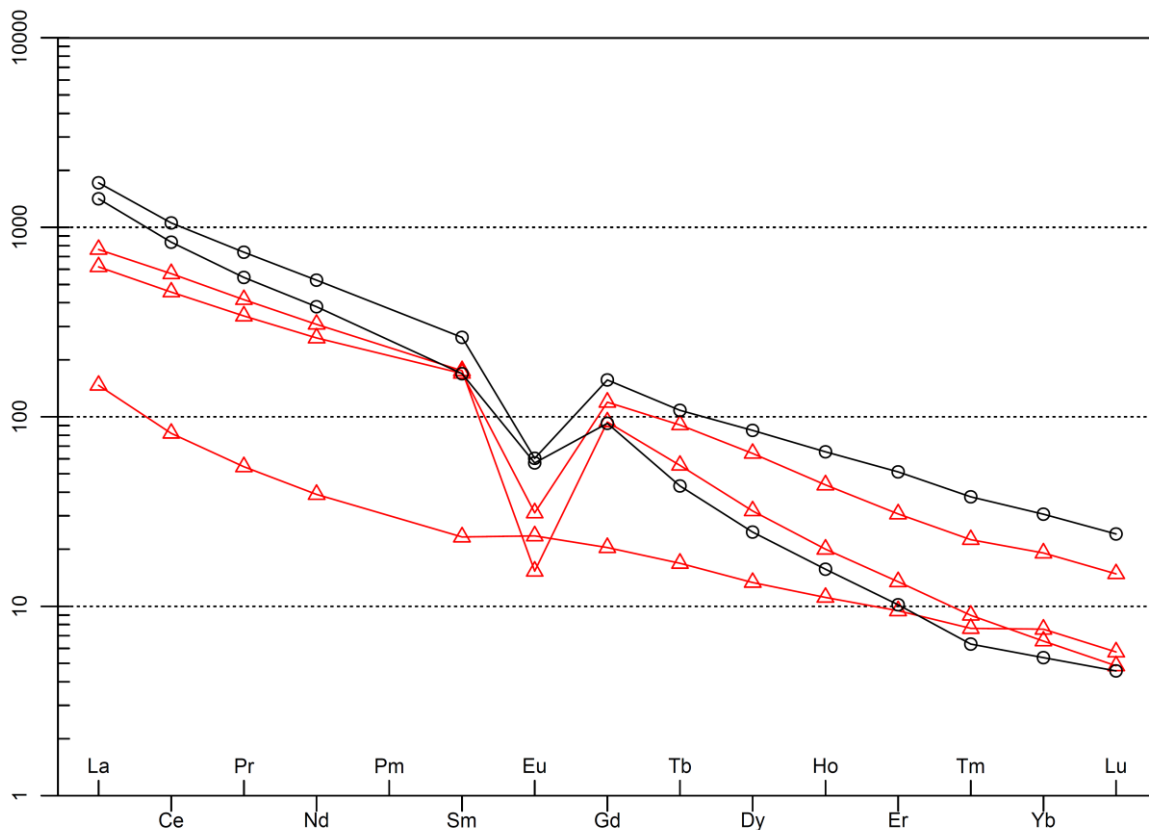
**Figur 14.** REE-plottar av tre varpprov från Rödbergsgruvorna (varparna i NV delen av fältet; svarta kurvor med ringar) tillsammans med referensdata i form av två prov från Nya Bastnäs, Riddarhyttan (röda kurvor med trianglar), normaliserade mot primitiv mantel efter McDonough & Sun (1995). För Rödbergsgruveprovet med de högsta halterna av REE saknas punkter för två av dem i plotten (Ce och Pr), då de passerade den övre detektionsnivån (för höga halter för metoden).

Den mycket stora dominansen av Ce+La+Nd+Pr över andra REE i denna typ av skarn är noterbar (av dessa är specifikt Nd  $\approx$  4 500 ppm och Pr >1 000 ppm). Generellt uppvisar REE-innehållet (plottat normaliserat mot primitiv mantel) i dessa prov mycket stora likheter med motsvarande från Nya Bastnäs klassiska skarn (fig. 14), med markerade förhöjningar av de lättare REE (vilka dock planar ut för de mera låghaltiga proven) och markanta negativa Eu-anomalier.

Skarntypen med riktigt höga REE-halter verkar endast förekomma mycket lokalt på varphögarna, men även mera allmänt förekommande (mörkare) typer håller alltså markanta halter, och inte minst den relativt höga halten uppmätt i ett prov av magnetitdominerat anrikningsgods är anmärkningsvärd.

Förekomsten av markanta förhöjningar av guld i Rödbergsgruvornas skarn är också noterbart, med två sulfidförande prov som uppvisade 0,33 respektive 0,60 ppm Au. Dessa prov är också något förhöjda i fallen med tellur, med halter om 1,8 och 3,2 ppm Te, och selen, med 24 och 26 ppm Se. De är också förhöjda på tenn, med halter om 10 respektive 15 ppm Sn, liksom för kobolt med upp till 46 ppm Co. Likaså vismut och molybden uppvisar noterbara halter med 71 respektive 243 ppm Bi och 96 ppm Mo. Volfram uppträder med halter upp till omkring 16 ppm W, även förhöjt i det sandiga anrikningsgodset. Flertalet av dessa metaller är karakteristiskt (starkt) koncentrerade i de mest REE-rika skarnassociationerna i Bastnäs/Riddarhyttan (se avsnitt *Riddarhytteområdet*).

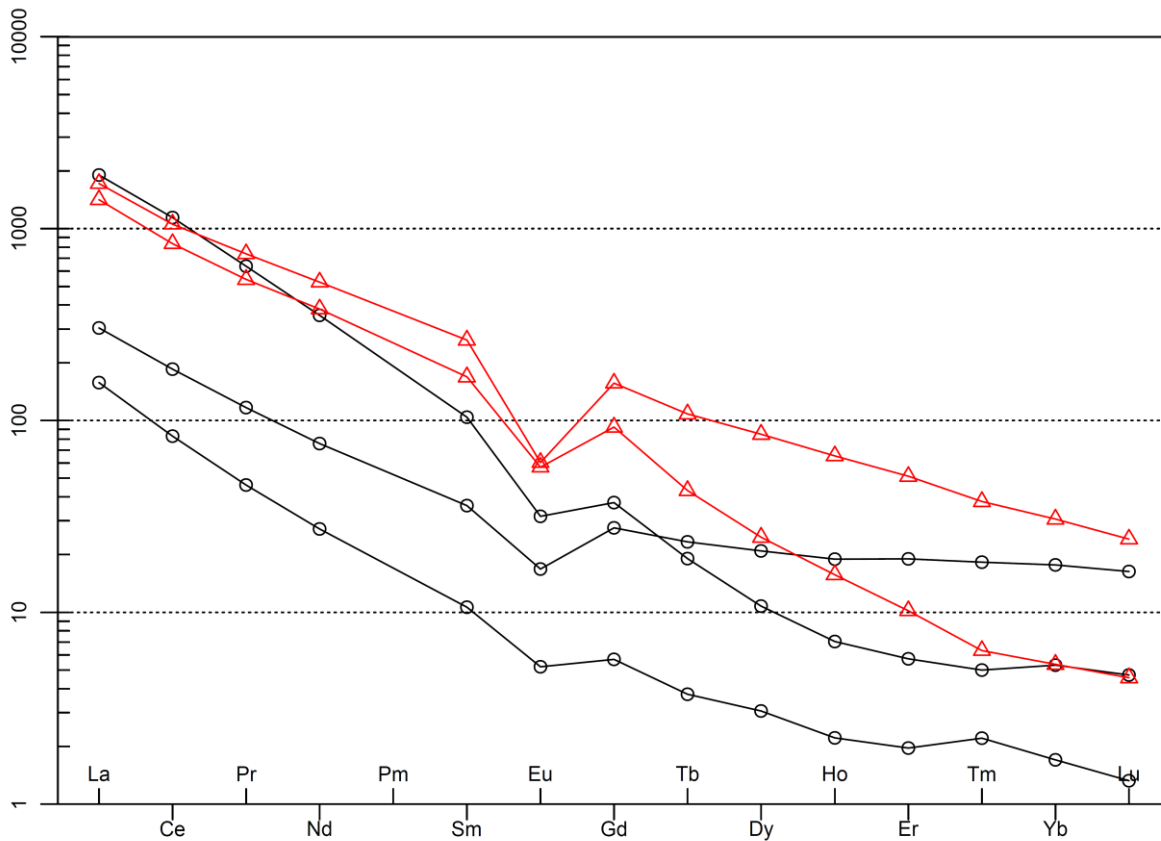
Av smågruvorna invid det större Rödbergsgruvefältet finns Klintbergsgruvan, västsydväst om Ormtjärnen, samt Kärnbergsgruvan, sydost om Fogdhyttetjärnen. Två prov från Klintbergsgruvan uppvisar markant förhöjning av REE, med 134 respektive 467 ppm REE+Y, medan två prov från Kärnbergsgruvan uppvisar 58 respektive 157 ppm REE+Y.



**Figur 15.** REE-plottar av tre prov från de östra Millsjögruvorna (röda kurvor med trianglar) tillsammans med, som referens, två varpprov från Nya Bastnäs, Riddarhyttan (svarta kurvor med ringar), alla normaliserade mot primitiv mantel efter McDonough & Sun (1995).

I grovt sett i strykningsriktningen åt sydväst från Rödbergsfältets gruvor, på andra sidan sjön Saxen, ligger ett stråk av gamla järngruvor på Millsjöåsarna; Millsjögruvorna. Provtagning av varp i den östra delen av gruvstråket gav mycket intressanta resultat med totalhalter mellan cirka 380 och nära 2 200 ppm REE+Y för prov av slirig magnetit-hematitmalm (lägsta halten) och de högre halterna i amfibolskarn och talk-amfibolskiffer. Normaliserade mot primitiv mantel och plottade tillsammans med analyser från Nya Bastnäs (fig. 15) uppvisar de två REE-rikare proven kurvor mycket lika de från Bastnäs, inklusive markerade negativa Eu-anomalier, medan den mera sparsamt REE-förande järnoxidmalmen uppvisar en något flackare kurva, med en knappt synlig positiv Eu-anomali.

Dalkarlsbergs gruvor är ett större gammalt järngruveområde med delvis omfattande varphögar. Det ligger grovt sett i den sydvästliga fortsättningen av järnmalmstråket kring Pershyttan söder om Nora. Tre varpprov från Dalkarlsberg gav 308, 780 och 3 857 ppm REE+Y, alltså uppvisande signifikant förhöjda REE-halter. Av dessa bestod provet med den högsta halten REE av en järnoxidförande glimmerbergart (skölartad), och den med näst högst halt av delvis magnetit-förande, relativt grovt amfibolskarn. Den lägsta halten noterades från ett prov bestående av något sulfidförande, delvis massiv magnetitmalm. De tre proven innehåller mätbara mängder av alla REE+Y, men domineras helt av cerium och lantan (1 910 respektive 1 235 av totalt 3 857 ppm REE+Y i det rikaste provet). Plottar av REE i de tre proven, normaliserade mot primitiv mantel (fig. 16), visar tydliga likheter med motsvarande från Bastnäs, med några undantag; mest utmärkande är det magnetitförande amfibolskarnet som uppvisar en något mera HREE-anrikad kurva, alltså högre relativa anrikningar av Gd-Lu, i jämförelse med både de två andra proven och referensdito.



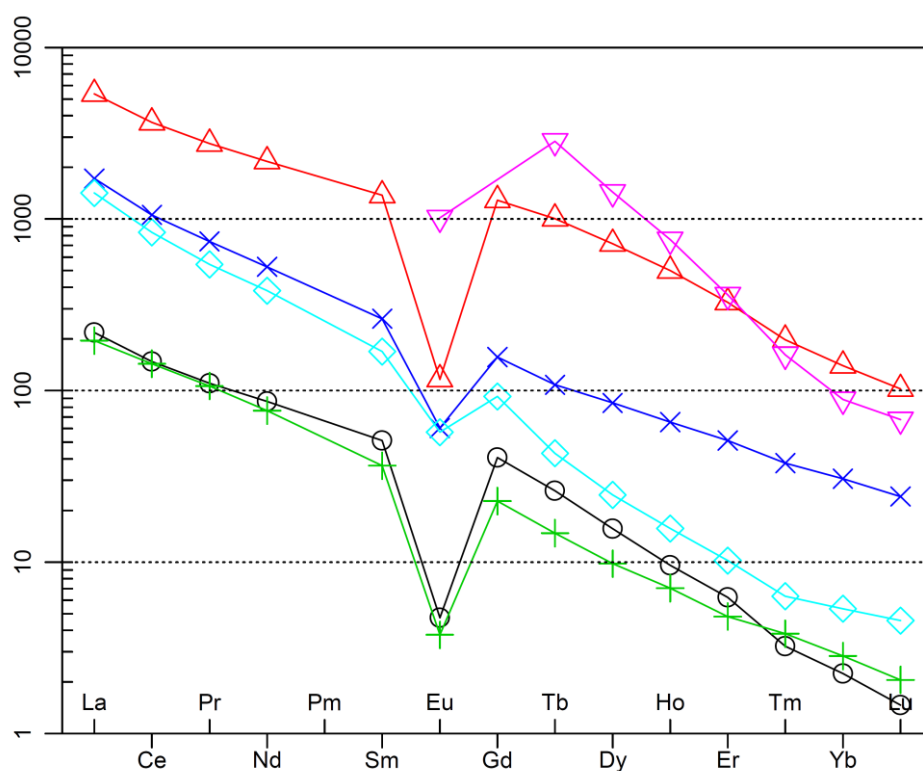
**Figur 16.** REE-plottar av tre prov från Dalkarlsbergs gruvfält (svarta kurvor med cirklar) tillsammans med, som referens, två varpprov från Nya Bastnäs, Riddarhyttan (röda kurvor med trianglar), alla normaliserade mot primitiv mantel efter McDonough & Sun (1995).

Jakob Eläs koppargruva och några andra mindre gruvor ligger norr om Grecksåsar (Grecksåsar), cirka 12 km väster om Nora. Av det provtagna materialet från Jakob Eläsgruvans varpar (fig. 17) uppvisar en sulfidförande magnetitmalm 633 ppm REE+Y, en mera massiv magnetkis-pyrit-association 569 ppm REE+Y och en svagt bandad, sulfid- och glimmerförande magnetitmalm nära 17 500 ppm REE+Y. Inte minst den sistnämnda är en mycket signifikant halt som i sig torde motivera fortsatta undersökningar i området samt av de aktuella provmaterialen. Ett gruvhål strax öster därom, öster om Jakob Eläs torp; i vad som bör vara malmskiktets strykningsriktning, med varphögar dominerade av magnetit i glimmerskiffrig värdbergart uppvisar lägre, men ändå markant förhöjda REE-halter om 304 (magnetitmalm) och 349 (skiffrig glimmerrik bergart) ppm REE+Y.

Som synes av plottarna i figur 18 uppvisar proven från Jakob Eläs gruva generellt likartade REE-mönster som Bastnäs, om än med något mera markerade och kraftiga negativa europiumanomalier.



**Figur 17.** Lätt rostvittrande varphögar invid Jakob Elas (koppar-) gruva, Greksåsar. I detta varp-material påvisades synnerligen förhöjda REE-halter. Foto: Erik Jonsson.



**Figur 18.** REE-plottar av prov från Jakob Elas gruva (svart kurva med cirklar, grön kurva med +, röd kurva med trianglar). Som referens visas även REE-rika varpprov från Nya Bastnäs, Riddarhyttan (ljusblå kurva med rutertecken, mörkblå kurva med x, samt partiell rosa kurva med upp-och-nedvända trianglar; den sistnämnda endast tyngre REE visade då de lättare passerade den övre detektionsnivån), alla normaliserade mot primitiv mantel efter McDonough & Sun (1995).

Skärhyttefältets gruvor, också kallade Blankafors eller Blanka gruvor, belägna cirka 18 km väster om Nora har tidigare rapporterats som förhöjda på REE (specifikt Y, om än med potentiella mätöverlapp med uran; Gustafsson 1990) associerat med förhöjda uran-, zirkonium-, molybden-, volfram- och toriumhalter. Provtagning genomfördes i de ganska stora och överväxta varphögarna med hjälp av scintillometer, av både anomalt radioaktivt och icke-radioaktivt, mestadels magnetitmineraliserat material (fig. 19–20). De analyserade proven gav varierande resultat, med totalhalter från cirka 50 ppm till över 2 500 ppm REE+Y. Av dessa delvis mycket signifikanta halter är andelen neodym anmärkningsvärd, med upp till knappa 1 200 ppm Nd i ett av proven. De uppvisade också varierande uranhalter, från knappa 20 till över 1 000 ppm U, medan toriumhalterna var modesta, som mest omkring 6 ppm Th. Till del kan förhöjda REE-halter kopplas till förhöjda uranhalter, men inte nödvändigtvis till de högsta. Molybden- och volframhalterna är båda över lag måttliga, från några enstaka ppm upp till som mest 23 ppm Mo. Vismut, däremot, förekommer i halter om 15 till dryga 340 ppm Bi. Intressant nog uppvisade också det mest REE-rika provet en signifikant guldhalt, cirka 0,4–0,5 ppm Au.

Yttrium förekommer i de aktuella proven från 18 till dryga 250 ppm Y, vilket är signifikant lägre halter än vad som presenterats av Gustafsson (1990; 0,3–0,5 % Y).

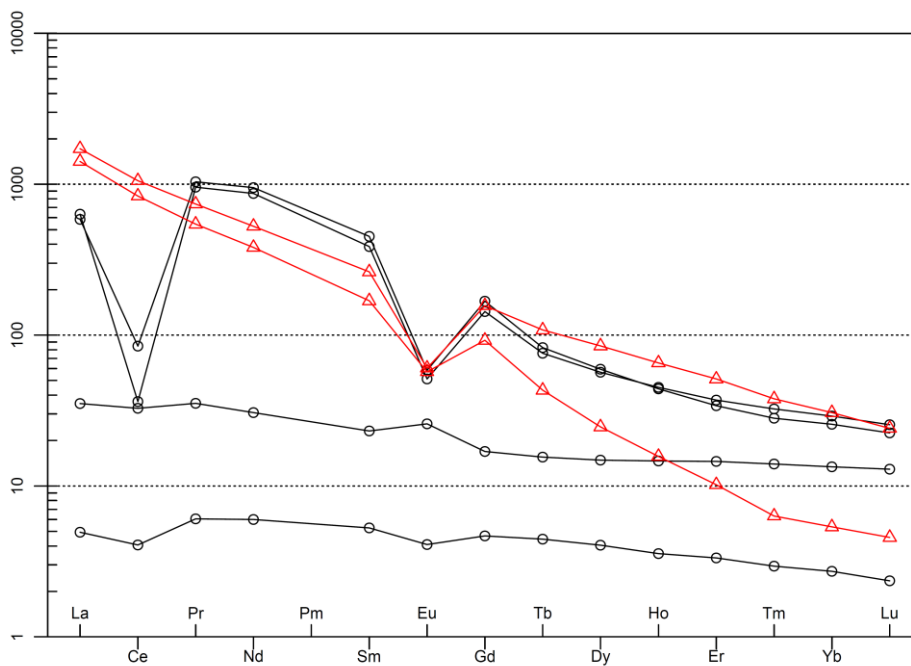
En REE-plott av de analyserade proven visar, för de mera REE-rika proven, en delvis avvikande fördelning i jämförelse med exempelvis dito från Bastnäs (fig. 21), med en mycket markerad negativ Ce-anomali, men också att lantan visar en svag minskning i förhållande till den gängse trenden för de flesta av dessa mineraliseringar. En sådan markant negativ Ce-anomali kan exempelvis förklaras genom tidigare oxidation av lösningarna, vilket lett till utfällning av  $Ce^{4+}$  medan övriga REE (i sin normala trevärda form, som  $Pr^{3+}$  eller  $La^{3+}$ ) stannat i lösning (se t.ex. Kuhn m.fl. 1998, Tostevin m.fl. 2016, samt referenser däri). De två proven med låga totala REE-halter visar mycket flacka kurvor, med svag positiv respektive negativ Eu-anomali och en av dem också en mycket modest negativ Ce-anomali.



**Figur 19.** Användning av scintillometer för provtagning av radioaktiva järnmalmer. Dessa visade sig anrikade på REE och då specifikt neodym. Skärhyttefältet/Blankafors gruvfält. Foto: Erik Jonsson.



**Figur 20.** Provtagen järnmalm som vid bulkgeokemisk analys visade förhöjningar på i synnerhet jordartsmetallen neodym (Nd > 1000 ppm). Skärhyttfältet/Blankafors gruvfält. Foto: Erik Jonsson.



**Figur 21.** REE-plottar av fyra prov från Blankafors gruvfält (svarta kurvor med cirklar) tillsammans med, som referens, två varpprov från Nya Bastnäs, Riddarhyttan (röda kurvor med trianglar), alla normaliserade mot primitiv mantel efter McDonough & Sun (1995).

## Slagger och anrikningsslags

I några fall i det aktuella området fanns möjlighet att provta och analysera också andra material än normalt ”sidoberg” och ”malm” i varp. Inte minst befanns det intressant att testa om de lokalt rikligt förekommande hyttslaggrarna kunde uppvisa generella förhöjningar av REE, då hyttorna åtminstone periodvis kan ha arbetat med mer eller mindre REE-mineraliserade malmer. I fallet med Rödbergsgruvorna, ett REE-relevant gruvfält väster om Nora, kunde också (rester av) järnmalmsanrikningsslags samlas in och analyseras.

Vid Rödbergsgruvorna (väster om Nora, se avsnitt *Noraområdet*) provtogs alltså två typer av anrikningsslags. Dels en oren magnetitdominerad anrikningssand som utgör del av stranden till sjön Saxen, väster om själva gruvområdet (fig. 22), dels ett prov av ganska fint krossad (cirka 2–5 cm) och koncentrerad magnetitmalm. Provet av det magnetitrika, sandiga materialet gav en REE-halt på nära 850 ppm, vilket är anmärkningsvärt, inte minst då de rikare magnetitmalmerna oftast inte verkar härbärgera mineral som innehåller REE i större omfattning. Det grövre anrikningsslags gav en i detta perspektiv rimligare (låg) halt om endast 14 ppm REE+Y.

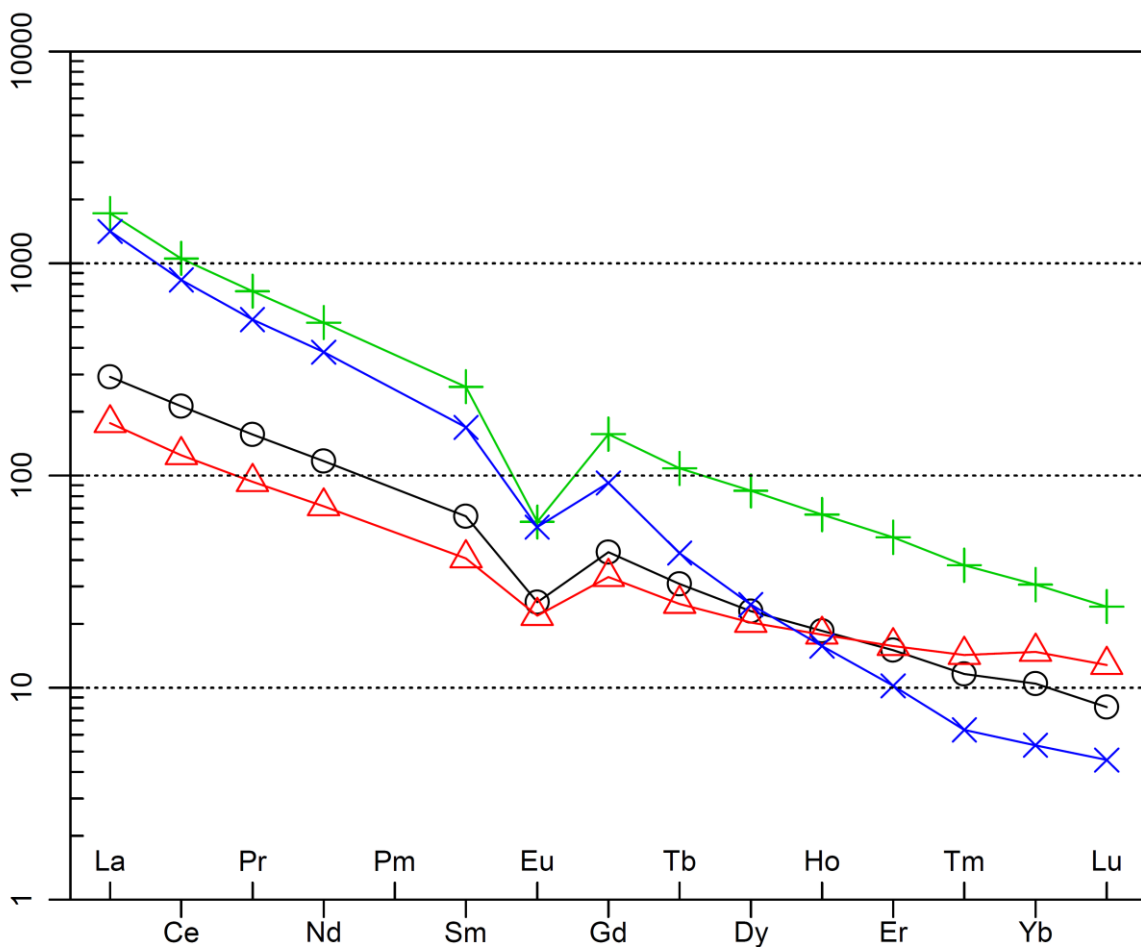


**Figur 22.** Signifikant REE-förhöjt (nära 850 ppm totalhalt REE+Y) magnetitrikt (delvis svallat) sandigt samt grövre anrikningsslags tillsammans med varp invid stranden till sjön Saxen; Rödbergsgruvefältet väster om Nora. Foto: Erik Jonsson.

Två olika blandprov av hyttslaggs togs från större slagghögar, vid Ringshyttan, nära Striberg väster om Nora, och Nedre Gammelhyttan vid Järnboås, nordväst om Nora, vilka analyserades parallellt med övriga prov. Syftet var att testa om slagger från hyttor som processat malm från ett flertal järngruvor i denna region också kunde fånga upp eventuella anrikningar av REE i området.

Slaggen uppvisade markant förhöjda REE-halter, med dryga 900 ppm REE+Y i provet från Ringshyttan, samt nära 600 ppm REE+Y i provet från Nedre Gammelhyttan.

En plott normaliserad mot primitiv mantelsammansättning (fig. 23) visar den generella likheten mellan slaggsprovets REE-innehåll och prov från Bastnäs. I dessa fall kan man möjligen också fråga sig hur mycket av den normaliserade kurvans karaktär som härstammar från ursprunglig sammansättning på REE i den sedermera förhyttade malmen och dess accessoriska mineral, och hur mycket som har sitt ursprung i själva (del-)smältningprocessen.



**Figur 23.** REE-plottar av två prov av hyttslaggs (svart cirkelförsedd och röd triangelförsedd kurva; från Ringshyttan respektive Gammelhyttan) samt, som referens, två REE-förhöjda varpprov från Nya Bastnäs, Riddarhyttan (blå kurva med x; grön kurva med +), alla normaliserade mot primitiv mantel enligt McDonough & Sun (1995).

## Förekomst av andra kritiska metaller

Analyserna som genomförts omfattar också de metaller som för närvarande är klassade som kritiska inom EU (European Commission 2017). Nedan sammanfattas resultat för sådana där markant förhöjda halter uppmätts.

### *Antimon*

Den ovanliga biproduktmetallen antimon är, som väntat, över lag inte koncentrerad i någon större utsträckning i de aktuella mineraliseringstyperna. Mycket modesta förhöjningar i vissa förekomster har observerats, som Fagerstaområdet där ett prov från Bäckgruvan uppvisade 39 ppm Sb, och Nordstjärnegruvan 18 ppm Sb.

### *Beryllium*

Den mycket lätta specialmetallen beryllium uppträder mestadels anrikad i granitiska eller granitpegmatitiska system. I skarnen av bastnästyp torde endast mindre mängder beryllium vara närvarande, och då främst i accessoriska mineral tillhörande gadolinitgruppen, som de olika gadolinitmineralerna och hingganit-(Y) (se tabell 1), men kan ändå tillhöra de karakteristiska elementen. Så uppvisar två olika prov av amfibolskarn från Nya Bastnäs halter mellan 4,5 och 168 ppm Be.

Ett prov med relativt hög REE-halt (>1 000 ppm REE+Y) från Vilhelmina-Väggruvorna norr om Fagersta uppvisade också en markant förhöjning om drygt 75 ppm Be.

Det prov från Jakob Elsas koppargruva (vid Greksåsar, väst om Nora) som uppvisade högst REE-halt (cirka 17 500 ppm REE+Y) innehöll 110 ppm Be.

Ett par av proven från Blankafors järngruvor (med delvis kraftigt förhöjda REE) visade också viss förhöjning av beryllium, som högst 19 och 31 ppm Be.

### *Gallium*

Den sällsynta specialmetallen gallium förekommer anrikad i större mängder (och då inte minst i mineral där den utgör en essentiell komponent) i endast ett fåtal huvudsakliga förekomsttyper, som Kipushi- eller Tsumebtypens komplexa sulfidmalmer liksom som substituent för aluminium i bauxitförekomster, vilka vi saknar i Sverige. Vad gäller Bergslagen finns gallium något anrikad i vissa mineraliseringar, men utan synbarlig koppling till en enkel substitution i ett mineral; specifikt just i REE-linjens skarnmalmer uppträder de högsta uppmätta halterna (Jonsson & Högdahl 2019). Det befintliga nya datasetet bekräftar i synnerhet anrikningen av gallium i bastnästypmineraliseringarna (se nedan). En mångfald förekomster uppvisade därutöver mera ordinära halter i storleksordningen 10–20 ppm Ga.

Ett prov av amfibolskarn från Nya Bastnäs gav 911 (eller 835; beroende på vald metod) ppm Ga, vilket är det högsta värdet bland de analyser som gjorts inom ramen för denna provtagning och i linje med vad som påvisats av Jonsson & Högdahl (2019).

Två prov från Östra Gyttorpsgruvan väster om Nora gav 140 respektive 397 ppm Ga, medan Rödbergsgruvornas (sydväst därom) skarn intressant nog endast uppvisade som högst 23 ppm Ga. Av de andra järngruvorna väster om Nora visade Bromsatorpsgruvorna, Stora Bastnäsgruvorna samt Åsbobergsgruvorna alla upp förhöjningar kring 50 till knappa 100 ppm Ga. Ett prov från stråket Norra Karlbergsgruvorna visade cirka 70 ppm Ga.

De lokalt granatrika skarnen i Dammsjögruvorna, västsydväst om Gyttorp, uppvisade halter mellan 2 och upp till dryga 110 ppm Ga, det senare sannolikt en effekt av substitutionen  $Ga^{3+} \rightarrow Al^{3+}$  i granat. Timansbergs gruvor och Jakob Elsas koppargruva med smågruvor visade halter upp till cirka 40–50 ppm Ga. Två REE-förhöjda prov från Södra Repabergsgruvorna väster om Nora uppvisade halter kring 60 ppm Ga.

## **Germanium**

Över lag är germanium huvudsakligen förekommande i ekonomiskt viktigare mängder som substituent i vissa typer av zinkbländemineraliseringar samt i ursprungligen organiska material som stenkol och lignit, även om denna metall också mera sällsynt kan förekomma starkt anrikad i andra typer av sulfidmalmer med mineral med essentiellt germanium som germanit och renierit (se t.ex. Melcher & Buchholz 2014).

REE-linjens förekomster verkar i jämförelse med övriga Bergslagen vara anrikade på både gallium och i mindre grad, germanium (Jonsson & Högdahl 2019). I det aktuella datasetet uppvisade ett analyserat REE-rikt amfibolskarn från Nya Bastnäs dryga 100 ppm Ge. Proven från Bäckegravan hade omkring 5–10 ppm Ge.

Prov från Östra Gyttoresgruvan väster om Nora uppvisade halter om 30–60 ppm Ge. Olika skarndominerade associationer samt ett anrikningsgods (magnetitrikt) från Rödbergsgruvorna (Nora) uppvisade halter om 43 samt 14–19 ppm Ge. Generellt uppvisade ett större antal av järngruvorna väster om Nora (exempelvis Åsbobergsgruvan) förhöjningar av germanium, ofta i storleksordningen knappa 10 till 20 ppm Ge. Ett skarnprov från gruvorna sydväst om Dammsjön (sydväst Nora) uppvisade 57 ppm Ge; övriga 12–13 ppm Ge. I fallet med järngruvorna i Fagerstaområdet visade flera av dem förhöjningar kring 5–15 ppm Ge.

## **Hafnium**

De aktuella förekomsterna håller knappast några noterbara halter av hafnium. De få och synnerligen modesta förhöjningar som kan nämnas omfattar Bastnäs- och Östra Gyttoresgruvorna, båda med omkring 4 ppm Hf, men den senare också med upp till omkring 7 ppm, Kärnabergs- och Klintbergsgruvorna nära Rödbergsgruvefältet med 3 till nära 9 ppm, Åsbobergsgruvorna med dryga 10 ppm, och Södra Repabergsgruvorna uppvisade den högsta halten inom ramen för denna provtagning med knappa 20 ppm Hf.

## **Indium**

Uppmätta indiumhalter i de aktuella proven är över lag låga, med förhöjningar noterade i materialet från Nya Bastnäs, med omkring 3 ppm, medan Bäckegravan visade 2–7 ppm In. Fagerstaområdets järnmalmer uppvisade som mest förhöjningar om 1–2 ppm, Knapptorpsgruvan vid Pershyttan liksom Dammsjögruvorna sydväst om Nora visade upp till dryga 6 ppm In. De högsta observerade halterna var i kopparsulfidförande associationer från Rödbergsgruvorna (Nora), vilka uppvisade förhöjningar om dryga 30 till 34 ppm In, medan sulfidfattiga skarn och anrikningsgods från samma gruvområde hade halter om cirka 1–5 ppm In.

## **Kobolt**

Kobolt tillhör de kritiska metaller som är karakteristiskt anrikade i Bastnäs-fältet och andra mineraliseringar i detta stråk i Riddarhytteområdet, som Myrbacks- och Hans Urbansson-fälten. Så visar analyser av skarnprov utan synlig sulfidmineralisering från varp i Nya Bastnäs-fältet 511 respektive 107 ppm Co, medan en kvartsrik, svagt bandad fattig magnetitmalm gav 70 ppm Co. Prov av järnoxidmineraliserat, sulfidförande skarn från Bäckegravans (sydväst om Bastnäs- och Myrbacks-fälten) varp gav upp till 77 ppm Co.

Över lag uppvisar ganska många av de provtagna mineraliseringarna i REE-linjen markerade förhöjningar på kobolt. En gruva söder om Åsgruvan, Fagerstaområdet gav 48 ppm Co. Knapptorpsgruvan, sydväst om Gyttoresgruvan (Noraområdet), uppvisade i ett prov dryga 110 ppm Co. I Landsvägs-torpetgruvorna, Noraområdet, gav ett prov en halt om 43 ppm Co. Skarnen i Rödbergsgruvorna (Noraområdet) uppvisade upp till 46 ppm Co. Ett rikligt sulfidförande prov från Åsbobergsgruvan (Noraområdet) höll omkring 250 ppm Co. Mera oväntat var ett prov av bandad järnmalm från Striberg markant förhöjt med 48 ppm Co.

Ett av de sulfidförande proven från Jakob Eläs koppargruva (Greksåsar), en mineralisering med oväntat (och okända) höga REE-halter, uppvisade i sammanhanget rekordhöga 750 ppm Co.

### ***Niob och tantal***

Höga niob- och tantalhalter har inte förväntats i de provtagna och analyserade systemen, men vissa ytterst modesta, förhöjningar av specifikt Nb har trots detta noterats, dock utan systematik avseende REE-anrikning.

### ***Platinagruppens metaller***

Som väntat saknas i princip antydningar till förhöjningar av PGM i dessa mineraliseringar.

### ***Skandium***

Mineraliseringar med signifikanta halter av skandium är sällsynta. Över lag anrikas skandium lättast (på grund av sin laddning och måttliga jonradie) som spårkomponent i ordinära järn-magnesiumsilikater som exempelvis (klimo-)pyroxen i magmatiska system (Williams-Jones & Vasyukova 2018), men kan också ibland bilda mineral med essentiellt Sc, som i fallet med thortveitit, ett rent skandiumsilikat som huvudsakligen återfinns i enstaka granitpegmatiter (se t.ex. Jonsson m.fl. 2019a). Det finns med andra ord inte så stor anledning att förvänta sig signifikanta Sc-förhöjningar i de aktuella systemen. Dock uppvisar många av de analyserade proven halter från enstaka upp till något tiotal ppm Sc. Enstaka är något högre, så håller bland andra ett prov av bandad järnmalm från Striberg dryga 30 ppm Sc, och de högsta halterna som uppmätts här är i prov från Östra Gyttorpsgruvan med 30–50 ppm Sc.

### ***Vanadin***

Vanadin är till sin natur inte förväntat i några högre halter i de undersökta geologiska systemen, men vissa förhöjningar har noterats. Så uppvisade prov från Knappagruvan, sydväst om Nora (norr om sjön Älvlången) en markant förhöjning om 875 ppm V, och ett Stribergsprov, alltså en bandad järnmalm, uppvisade en markant förhöjning om 199 ppm V.

### ***Vismut***

I Nya Bastnäsältet är vismut ganska rikligt förekommande i form av oftast finkornig, accessorisk vismutglans, och mera sällsynt som koppar-vismutsulfider som emplektit och wittichenit, vismut-tellurider, liksom sekundärmineral som exempelvis bismutit och tavagnascoit, och även i prov där sådana inte direkt observerats kan analyser ge markant förhöjda halter. Så har ett prov av amfibolskarn från varphögarna i Nya Bastnäs givit en halt på 2 420 ppm Bi. Andra skarnmineraliseringar av bastnästyp är inte så rika på vismut, men förhöjningar har ändå observerats i flera fall. Rödbergsgruvorna (väster om Nora) innehåller till dels REE-mineralisering av bastnästyp, och här gav analyser av sulfidförande amfibolskarn kraftigt varierande halter om 0,6, 30 och 71 ppm och ett kopparkisrikt prov 243 ppm Bi. Anrikningsgods dominerat av magnetit gav 1,6 och 11 ppm Bi. Däremot uppvisar Östra Gyttorpsgruvan endast marginella förhöjningar, upp till en dryg ppm Bi.

Prov med sulfider och magnetit från Jakob Eläs koppargruva (vid Greksåsar) gav halter om 2,6 till 8,6 ppm Bi. Prov från Knapptorpsgruvan sydväst om Gyttorp visade konsekvent förhöjda halter, mellan 10 och 23 ppm Bi. Därutöver gav ett epidotförande skarn från gruvvarp vid St. Björnbergsmossen (Landsvägstorpet; norr om Älvlången, Noraområdet) en halt på 34 ppm Bi.

Ett prov från Blankafors gruvor uppvisade nära 350 ppm Bi, medan tre andra visade 14 till 19 ppm Bi.

## Volfram

Den kritiska metallen volfram är till synes inte typisk i höga halter för många av de REE-rika förekomster som undersökts i det innevarande projektet. Dock uppvisar volfram markanta förhöjningar inom bastnäsfältets skarn och flera förekomster av generell bastnästyp innehåller också kalciumvolframtet scheelit som accessorisk fas liksom i fallet Nya Bastnäs, det unika REE-volframsilikatet delhuyarit-(Ce). Analyserade skarnprov från varphögarna vid Nya Bastnäs gav en högsta halt på 315–339 ppm W. Slutligen uppvisade ett prov från Klacka-Lerbergs järnmalmgruvor en oväntat hög halt på 977 ppm W.

## SLUTSATSER OCH DISKUSSION

Inalles har fler än 150 prov insamlats från cirka 60 fältbesökta lokaler (gruvor, mineraliseringar och hållar i mineraliserade stråk) och av de förra har 114 bulkgeokemiska analyser utförts (inklusive SGU-standarder). Av de provtagna lokalerna uppvisar 27 stycken signifikant till kraftigt förhöjda REE-halter (arbiträrt satta till omkring 500 respektive över 1 000 ppm REE+Y; tabell 2; se också Jonsson m.fl. 2019a).

**Tabell 2.** Förekomster markant anrikade på REE som påvisats/analyserats under projektet. Här ingår förekomster med halter i storleksordningen 500 ppm REE+Y, respektive kring 1 000 ppm REE+Y och högre; i de fall flera analyser gjorts visas endast den högsta uppmätta totalhalten. En mångfald andra provtagna lokaler uppvisar halter om enstaka till flera 100-tals ppm REE+Y.

Lokalnamn	Område	Koordinater	Halt (max) REE+Y (ppm)t
Gruva S Åsgruvan	Fagersta	6653623, 548586	532
Gruva SSO L:a Malmkärra	Fagersta	6655832, 547065	568
Jakobsgruvan	Fagersta	6651277, 546444	635
Mossgruvan	Fagersta	6650894, 545893	1 377
Nordstjärnegruvan	Fagersta	6651831, 547058	1 105
Vilhelmina-Väggruvorna	Fagersta	6654980, 546057	1 054
Åsgruvan	Fagersta	6653943, 548569	985
Skärhyttfältet/Blankafors	Nora	6599584, 483319	2 577
Bromsatorpsgruvan (Blomtorpsgr.)	Nora	6597944, 496664	1 877
Dalkarlsbergs gruvor	Nora	6588771, 492973	3 857
Gasthultsgruvorna	Nora	6588928, 485702	579
Gruva NV Gropatorpsgruvan	Nora	6594915, 499476	429
Gruvor S om L:a Mosjön	Nora	6593376, 489712	429
Jakob Elas koppargruva	Nora	6601788, 488814	17 486
Klintbergsgruvan	Nora	6596848, 494541	467
Nedre Gammelhyttan, slagghvarp	Nora	6612939, 492375	588
Ringshyttan, slagghvarp	Nora	6601175, 495839	906
Rödbergsgruvorna, anr.-gods	Nora	6597060, 493923	846
NV Rödbergsgruvevarparna	Nora	6597117, 493868	>23 000
Ö Rödbergsgruvevarparna	Nora	6597052, 494208	665
Stora Bastnäsgruvorna	Nora	6597912, 496274	1 141
Södra Repabergsgruvorna	Nora	6599520, 497757	>30 000
Stora Sjögruvan	Nora	6598160, 500090	345
Timansbergs gruvor	Nora	6610020, 491076	4 102
Åsbobergsgruvorna	Nora	6598954, 498084	572
Östra Gyttorpsgruvan	Nora	6597434, 497655	>40000
Östra Millsjögruvorna	Nora	6595352, 491944	2165

Åtminstone 18 av dessa förekomster representerar i sin tur sådana utan tidigare känd REE-anrikning/-mineralisering. Det är noterbart att också försöksvis provtagning och analyser av slagger och anrikningsgods visar markanta förhöjningar av REE. Därutöver har intressanta förhöjningar av ett antal andra kritiska och sällsynta metaller som gallium, kobolt och skandium uppmätts i prov från flera lokaler.

Resultaten från den aktuella studien visar inte minst på **1)** ett flertal nya REE-mineraliserade områden och förekomster; **2)** den regionala naturen av REE-anrikning i och i anslutning till REE-linjen; **3)** att konceptet ”osynliga REE” kan tillämpas i bredare bemärkelse, och **4)** att det finns mycket god potential för ytterligare upptäckter av REE-mineraliseringar i det aktuella området i Bergslagen. Fokuserade detaljundersökningar vore en naturlig fortsättning på dessa resultat.

Flertalet av de REE-mineraliserade prov som tagits och analyserats under projektet uppvisar karakteristiska fördelningar av de sällsynta jordartsmetallerna med signifikant anrikning framför allt av de lätta dito; La-Ce-Pr-Nd-Sm, och, med vissa undantag, i mindre utsträckning de tyngre, Eu-Gd-Tb-Dy-Ho-Er-Tm-Yb-Lu samt Y. Denna trend motsvarar grovt sett vad som typiskt kan observeras i den mera utvecklade, övre delen av den kontinental jordskorpan (Rudnick & Gao 2003), då de lättare jordartsmetallerna med större jonradie företrädesvis går in i en smälta; alltså leder partiell uppsmältning av en mantelprotolit till smältor anrikade på framförallt de lätta REE. Sådana magmor har över tid bildats av återkommande delsmältning av den övre manteln, vilken därmed uppvisar motsvarande systematiska utarmning av de olika jordartsmetallerna. Bergarter som bildas specifikt vid intrakontinental riftning (isärslitning) kan ofta uppvisa än mer extrem anrikning, med vissa syenitiska och karbonatitiska bergarter som bästa exempel, medan granitiska bergarter bildade i andra plattetektoniska miljöer typiskt uppvisar högre relativa halter av de tyngre jordartsmetallerna tillsammans med en negativ Eu-anomali (se t.ex. Chakmouradian & Zaitsev 2012, samt referenser däri). De magmatiska anrikningstrenderna överensstämmer grovt med befintliga data och observationer som visar att det är mest sannolikt att högtempererade magmatiskt deriverade hydrotermala lösningar synkront med aktiv vulkanisk-subvulkanisk aktivitet omkring 1,90–1,89 miljarder år sedan bildat åtminstone bastnästypens skarn-mineraliseringar (Sahlström m. fl. 2019). I fallet med den vanliga, men inte alltid förekommande negativa europiumanomalin, brukar den i magmatiska sammanhang tillskrivas tidigare kristallisation av anortithaltig plagioklas, vilken genom substitution mellan  $\text{Ca}^{2+}$  och  $\text{Eu}^{2+}$  (vilka uppvisar likartade jonradier) kan minska halten av den senare i en resterande smälta (fraktionerad kristallisation). Här kan detta sannolikt gälla den magma som fluiderna ansvariga för mineralisering avblandats från. I de färre fall som observerats med svagt positiva Eu-anomalier kan detta bero på lokala skillnader eller förändringar av redoxpotential, vilket kunnat leda till lokal fraktionering av  $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$  alternativt att fluiderna lokalt lyckats laka Eu ur tidigare bildade plagioklasrika bergarter, något som är vanligt i vissa hydrotermala system (se t.ex. Michard 1989).

Ett flertal helt okända eller tidigare dåligt kända REE-mineraliseringar har påvisats i studien. Av dessa är merparten sådana utan REE-rika mineral synliga för blotta ögat och höga halter sammanfaller oftast med skarn och andra omvandlingsbergarter, snarare än med rikare järnoxidmineralisering. Man kan alltså konstatera att området hyser förhållandevis omfattande mineralisering i form av ”osynliga REE” (i mycket lös analogi med engelskans ”invisible gold”; se t.ex. Cook & Chryssoulis 1990), i detta fall således REE huvudsakligen bundna till mikroskopiska korn av REE-rika mineral (sådana med essentiella REE i sin struktur) och/eller som substitutioner i mineral utan nominellt (essentiellt) REE-innehåll (t.ex. fluorapatit, epidot). Detta i kontrast till de tämligen välkända, makroskopiska mineralassociationerna kända från Bastnäs med flera klassiska förekomster. Också i de senare visas att signifikant REE-mineralisering förekommer i associationer utan synliga REE-mineral. I övrigt uppvisar de undersökta förekomsterna en i varierande grad tydlig systematik vad gäller skarnartade associationer liksom närvaro av andra ”karaktärsmetaller” (Bi, Co, Cu, Mo m.fl.) och omfattande hydrotermalomvandling av de

vulkaniska avsättningarna (före regionalmetamorfos av dem). Flertalet av dessa mineraliseringar uppvisar också ett REE-geokemiskt släktskap med bastnästypens klassiska skarn, vilket har demonstrerats med hjälp av REE-plottar i vilka uppmätta REE-koncentrationer normaliserats mot primitiv mantel. Det är sannolikt i alla dessa fall ytterligare tecken på att en likartad eller identisk, hydrotermal process av magmatiskt ursprung ligger bakom deras bildning.

Av sekundära/antropogena material har ett par slagger och anrikningsgods också provtagits och analyserats i rekognosceringssyfte. Anrikningsgods i form av magnetitrik sand med runt 850 ppm totalhalt REE+Y från Rödbergsgruvorna är intressant och något oväntat. Har själva den tekniska anrikningsprocessen lett till att allanitgruppsmineral koncentrerats företrädesvis med magnetiten? I fallet med slaggerna visar de tydligt att slagger kan nyttjas för att detektera både REE-halter av primärt intresse (slaggen som sekundära råvaror) och för att indikera förekomst av REE-mineralisering i det större ”upptagningsområde” som kan representera malmkällor för en större hytta.

## Förslag till uppföljning

De markanta REE-anrikningar som förekommer i prov från olika skarn och malmer med närhet till, eller innehållande, bastnästypmineralisering inväntar sin förklaring med avseende på mineralogin: vilka värdfaser är dominerande i andra miljöer och associationer än de mera väl undersökta? Likaledes bör de under denna studie upptäckta REE-mineraliseringarna som inte är av uppenbar bastnästyp men ändå uppvisar höga koncentrationer, åtminstone följas upp och verifieras med mer detaljerad undersökning av lokalerna, fler och repeterade analyser på både existerande samt nyinsamlade prov. Detaljerade mineralogiska undersökningar för att karakterisera hur de sällsynta jordartsmetallerna sitter bundna sett till värdfaser, texturer, paragenes och kornstorleksfördelning bör utföras. Där så kan göras är också geokronologiska undersökningar kritiska för att kunna förstå bildning av mineralisering som primära processer eller fall av remobilisering. I linje med vad som gjorts av karakterisering medelst lätta stabila isotoper i Bastnäs med flera lokaler, bör liknande metodik också användas på de nyupptäckta mineraliseringarna.

I större skala kan resultaten också kunna leda till genetiska studier samt förnyad provtagning baserat på denna nya information. Då flera sådana nya förekomster också ligger något utanför den förenklade ”förväntade” sträckningen av REE-linjens sydvästra del, vore det också rimligt att ytterligare bredda eftersökning av REE-mineraliseringar i denna delen av stråket. En möjlig fortsättning av REE-linjen bortanför Knutsboområdet (i nordost), liksom området mellan Knutsbo och Norberg vore också rimlig att försöka belägga. Strukturgeologisk undersökning och konstruktion av möjliga modeller borde genomföras i de REE-mineraliserade stråken i den centrala till nordöstra delen av REE-linjen, och då specifikt i området Bastnäs-Lerklockan vid Riddarhyttan till Norberg med omnejd, samt i Noraområdet. I synnerhet i det sistnämnda, där vi inte minst med föreliggande nya observationer har fått en mera komplex och svårtolkad bild av fördelningen av REE-förhöjda mineraliseringar, skulle sådan modellering kunna ge mycket viktig information både för att förstå befintlig fördelning av REE-mineralisering och för att upptäcka ytterligare sådana. Påvisade och mera markanta förhöjningar av flera andra kritiska eller nära-kritiska metaller (t.ex. gallium, kobolt, vismut, eventuellt skandium) kan också i flera fall föranleda en mera fokuserad undersökning.

Slutligen kan konstateras att en utökad och systematisk provtagning av hyttslagger (där dessa representerar större volymer processad malm) bör vara av intresse, både för deras egna potentiella innehåll av olika metaller inklusive REE. Dessutom kan de visa på existerande anomalier av olika element, beroende på deras grad av lito-, sidero- respektive kalkofili, i malmer från ett visst ”upptagningsområde”.

## REFERENSER

- Alonso, E., Sherman, A. M., Wallington, T. J., Everson, M. P., Field, F. R., Roth, R. & Kirchain, R. E. 2012: Evaluating rare earth element availability: a case with revolutionary demand from clean technologies. *Environmental Science & Technology* 46, 3 406–3 414.
- Andersson, U. B. (ed.) 2004: The Bastnäs-type REE mineralisations in north-western Bergslagen, Sweden. *Rapporter and Meddelanden 119*, Sveriges geologiska undersökning, 34 s.
- Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A. & Buchert, M. 2013: Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production* 51, 1–22.
- Carlborg, H. 1923: Riddarhytte malmfält i Skinnskattebergs socken, Västmanlands län. Teknisk-ekonomisk beskrivning. *Beskrivningar över mineralfyndigheter 1*, Kungliga Kommerskollegium och Sveriges Geologiska Undersökning, 139–343.
- Chakmouradian, A. R. & Zaitsev, A. N. 2012: Rare earth mineralisation in igneous rocks: sources and processes. *Elements* 8, 347–353.
- Cook, N. J. & Chryssoulis, S. L. 1990: Concentrations of “invisible gold” in the common sulphides. *Canadian Mineralogist* 28, 1–16.
- European Commission, 2017: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the 2017 list of Critical Raw Materials for the EU, 8 s.
- Gadolin, J. 1794: Undersökning af en svart tung stenart från Ytterby stenbrott i Roslagen. *Kongliga Vetenskaps Akademiens Nya Handlingar* 15, 137–155.
- Geijer, P. 1921: The cerium minerals of Bastnäs at Riddarhyttan. *Sveriges Geologiska Undersökning C 304*, 24 s.
- Geijer, P. 1923: Riddarhytte malmfält i Skinnskattebergs socken, Västmanlands län. Geologisk beskrivning. *Beskrivningar över mineralfyndigheter 1*, Kungliga Kommerskollegium och Sveriges Geologiska Undersökning, 138 s.
- Geijer, P. 1927: Some mineral associations from the Norberg district. *Sveriges Geologiska Undersökning C 343*, 32 s.
- Geijer, P. 1936: Norbergs berggrund och malmfyndigheter. *Sveriges Geologiska Undersökning Ca 24*, 162 s.
- Geijer, P. 1961: The geological significance of the cerium mineral occurrences of the Bastnäs type in central Sweden. *Arkiv för Mineralogi och Geologi* 3, 99–105.
- Geijer, P. & Magnusson, N. H., 1944: De mellansvenska järnmalmernas geologi. *Sveriges Geologiska Undersökning Ca 35*, 654 s.
- Goodenough, K. M., Schilling, J., Jonsson, E., Kalvig, P., Charles, N., Tuduri, J., Deady, E. A., Sadeghi, M., Schiellerup, H., Müller, A., Bertrand, G., Arvanitidis, N., Eliopolous, D. G., Shaw, R. A., Thrane, K. & Keulen, N. 2016: Europe’s rare earth element resource potential: an overview of metallogenic provinces and their geodynamic setting. *Ore Geology Reviews* 72, 838–856.
- Gustafsson, B. 1990: Sällsynta jordartsmetaller i Sverige. Sveriges Geologiska AB, Division Prospektering, (opublicerad) Prospekteringsrapport PRAP 90024, 29 s.
- Hammergren, P. 1989: Fältbesöksprotokoll, Mineraljakten 1989. 3 poäng. Kbl 10E NO. Bergslagens Mineraljakt, Stråssa, opublicerat protokoll T100/89, 1 s.
- Haxel, G., Hedrick, J. & Orris, G. 2002: Rare earth elements – critical resources for high technology. *USGS Fact Sheet 087-02*, 1–4.
- Hisinger, W. 1838: Analyser av några svenska mineralier. 2. Basiskt fluor-cerium från Bastnäs. *Kungliga Vetenskaps Akademiens Handlingar*, 1–9.
- Hisinger, W. & Berzelius, J. 1804: *Cerium, en ny metall, funnen i Bastnäs Tungsten, från Riddarhyttan i Westmanland*. Henrik A. Nordström förlag, Stockholm, 1–24.

- Holtstam, D., Andersson, U. B., 2007: The REE minerals of the Bastnäs-type deposits, south-central Sweden. *Canadian Mineralogist* 45, 1 073–1 114.
- Högdahl, K., Jonsson, E., Kritikos, A. & Sahlström, F. 2015: Turning yesterday's waste into tomorrow's treasure: searching for base and critical metals in central Sweden's ancient mine dumps. I: A.-S. André-Meyer et al. (red.) *Mineral Resources in a Sustainable World*, 757–760.
- Jonsson, E. & Högdahl, K., 2013: New evidence for the timing of formation of Bastnäs-type REE mineralisation in Bergslagen, Sweden. I: E. Jonsson et al. (red.) *Mineral Deposit Research for a High-tech World*, 1 724–1 727.
- Jonsson, E. & Högdahl, K. 2019: On the occurrence of gallium and germanium in the Bergslagen ore province, Sweden. *GFF* 141, 48–53.
- Jonsson, E., Sadeghi, M., Högdahl, K., Nysten, P., Bergman, T., Söderhielm, J. & Arvanitidis, N. 2017: REE mineralisation in Sweden: old, new and future prospects. ERES 2017, 2<sup>nd</sup> European Rare Earth Resources Conference, Proceedings, 83–84.
- Jonsson, E., Nysten, P., Bergman, T., Sadeghi, M., Söderhielm, J. & Claeson, D. 2019a: REE mineralisations in Sweden. I: Sadeghi, M. (red.), Rare earth elements distribution, mineralisation and exploration potential in Sweden. *Rapporter & Meddelanden 146*, Sveriges geologiska undersökning, 20–111.
- Jonsson, E., Nysten, P., Bergman, T., Sadeghi, M., Högdahl, K., Sahlström, F. & Majka, J. 2019b: Contrasting types of REE mineralisation in the Palaeoproterozoic Bergslagen ore province, Sweden: from syn-volcanic to late-orogenic. *Life with Ore Deposits on Earth*, SGA 15<sup>th</sup> Biennial Meeting Proceedings, Glasgow University, 1 736–1 739.
- Kuhn, T., Bau, M., Blum, N. & Halbach, P. 1998: Origin of negative Ce anomalies in mixed hydrothermal-hydrogenetic Fe-Mn crusts from the Central Indian Ridge. *Earth and Planetary Science Letters* 163, 207–220.
- Ladenberger, A., Arvanitidis, N., Jonsson, E., Arvidsson, R., Casanovas, S. & Lauri, L. 2018: Identification and quantification of secondary CRM resources in Europe. SCRREEN Project report Deliverable D3.2, 127 s.
- Magnusson, N. H. 1973: *Malm i sverige 1. Mellersta och södra Sverige*. Almqvist & Wiksell, Stockholm. 320 s.
- McDonough, W. F. & Sun, S.-s. 1995: The composition of the Earth. *Chemical Geology* 120, 223–253.
- Melcher, F. & Buchholz, P. 2014: Germanium. I: G. Gunn (red.), *Critical metals handbook*, John Wiley & Sons, Ltd, 177–203.
- Michard, A. 1989: Rare earth element systematics in hydrothermal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53, 745–750.
- Nordenström, G. 1890: Fynd av allanit (cerin) vid Gyttorp i Nora Bergslag. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 12, 540–544.
- Rudnick, R. L. & Gao, S. 2003: Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry* 3, 1–64.
- Sahlström, F., Jonsson, E., Högdahl, K., Troll, V. R., Harris, C., Jolis, E. M. & Weis, F. 2019: Interaction between high-temperature magmatic fluids and limestone explains 'Bastnäs-type' REE deposits in central Sweden. *Scientific Reports* 9, 15203 (2019), 1–9, doi: 10.1038/s41598-019-49321-8.
- Tegengren, F. R. 1924: Sveriges ädlare malmer och bergverk. *Sveriges Geologiska Undersökning Ca* 17, 654 s.
- Tostevin, R., Shields, G. A., Tarbuck, G. M., He, T., Clarkson, M. O. & Wood, R. A. 2016: Effective use of cerium anomalies as a redox proxy in carbonate-dominated marine settings. *Chemical Geology* 438, 146–162.
- Wall, F. 2014: Rare earth elements. I: A. G. Gunn (red.), *Critical Metals Handbook*, John Wiley & Sons, 312–339.
- Williams-Jones, A. E. & Vasyukova, O. V. 2018: The economic geology of scandium, the runt of the rare earth litter. *Economic Geology* 113, 973–988.