



De sällsynta jordartsmetallernas geologi

Karin Högdahl
Uppsala universitet



UPPSALA
UNIVERSITET





Ytterby kvarts-fältspatgruva

Vaxholms hembygdsförening

Där det hela började – Ytterby pegmatitbrott

Pegmatit är en mycket grovkorning bergart som domineras av kvart och fältspat.

Kvarts bröjade brytas på 1600-talet i Ytterby för att användas som slaggbildare i järnbrukshyttor.

Från 1700-talet tills 1933 bröts fältspat för glas- och proslinsindustrin.

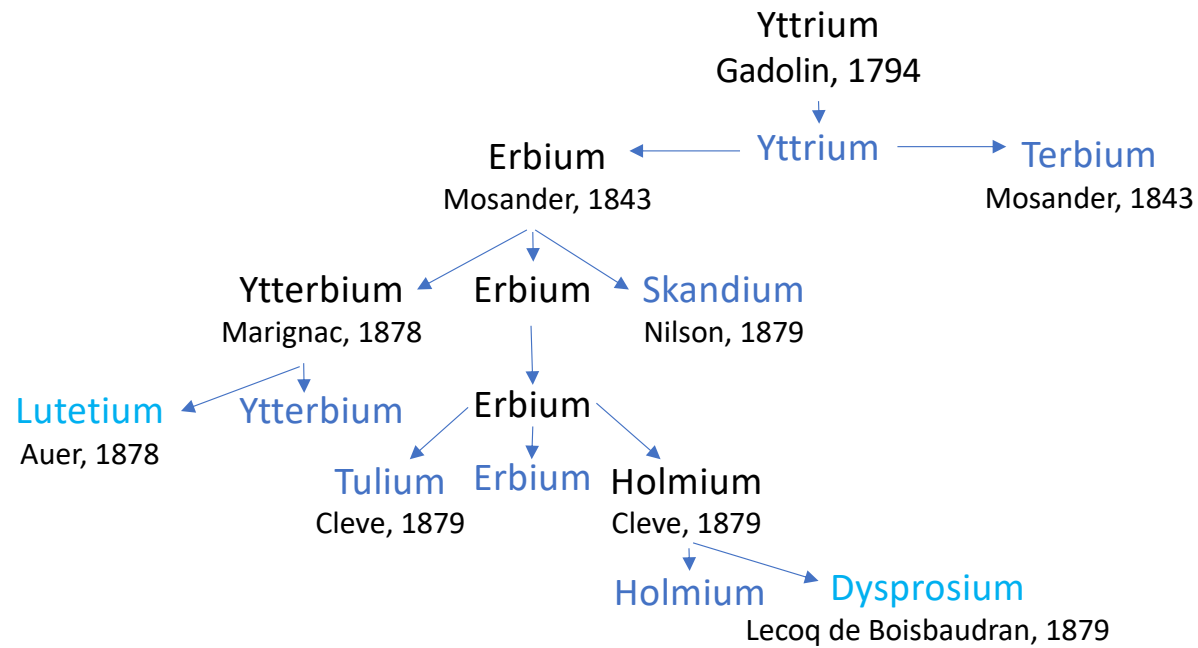
Fram till början av 2000-talet användes gruvan av statens oljelager.

Johan Gadolin då vid Uppsala universitet (senare vid Åbo universitet) undersökte ett tungt svart mineral som till 38% bestod av en ny jordartsmetall.

Den nya jordarten publicerades 1794 och kom att kallas *yttria* eller *ytterjord*, som senare visade sig innehålla fler än en sällsynt jordartsmetall.

Det tunga, svarta mineralet ($Y_2FeBe_2Si_2O_{10}$) fick namnet **gadolinit** för att hedra Gadolin.

Gadolinit



Sällsynta jordartmetaller från “ytterjordar” (gadolinit)



<https://www.mindat.org/photo-728039.html>



Ceritgruvan



Tekniska museet

Bastnäsfältet, Riddarhyttans malmtrakt

Järn- och kopparmalmer som började brytas på 1600-talet.

Kopparmalmen är ställvis också rik på Mo, Bi och Co.

I mitten av 1700-talet hittades en tungt mineral som kom att kallas Bastnäs tungsten.

Denna undersöktes av Hisinger och Berzelius i början av 1800-talet vavid Ce upptäcktes.

Mellan 1860 och 1880 bröts 200 ton cermalm i den sk. Ceritgruvan i Bastnäsfältet.

De huvudsakliga malmmineralen var cerit och allanit.

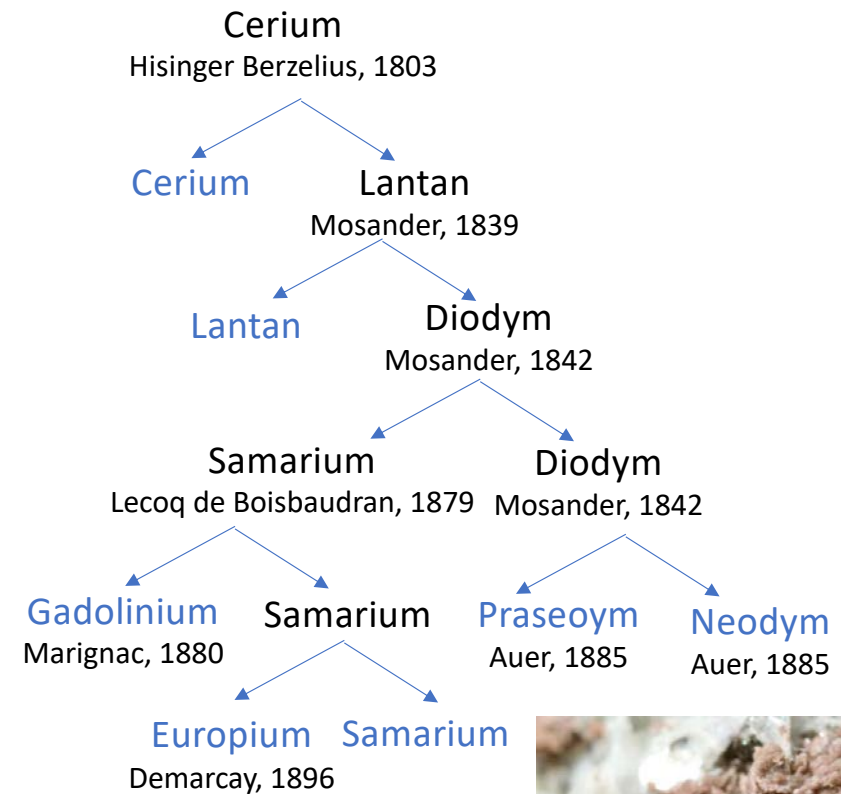
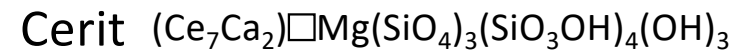
Det utvunna Ce användes bla i tänddon, gasglödljus och i glödstrumpor.

Bastnästit (CeCO_3F) är idag en av de viktigaste malmmineralet för sällsynta jordartsmetaller

Nya Bastnäsfältet i Riddarhyttans malmtrakt

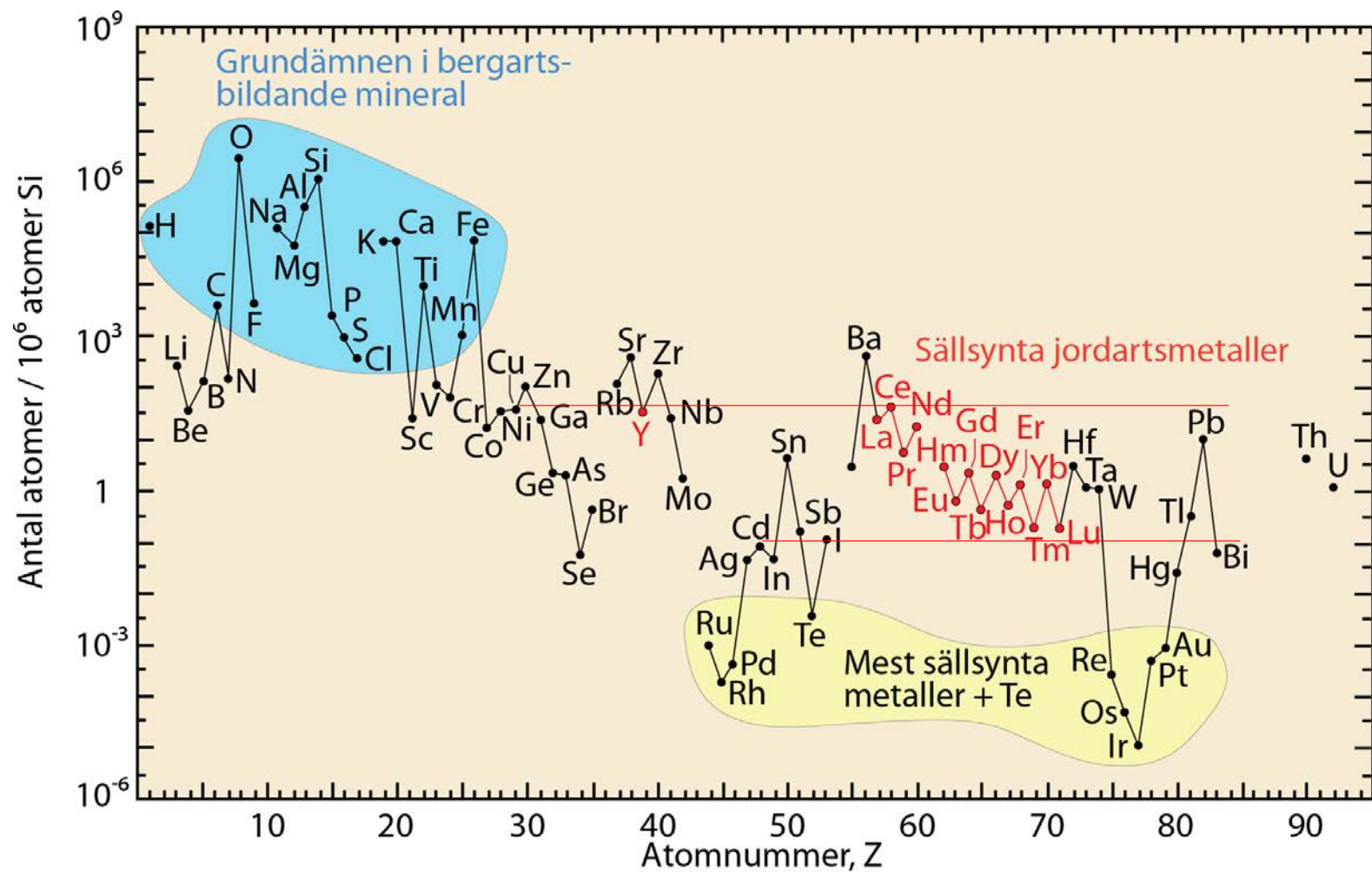


Sällsynta jordartmetaller från “cerjordar” (cerit)

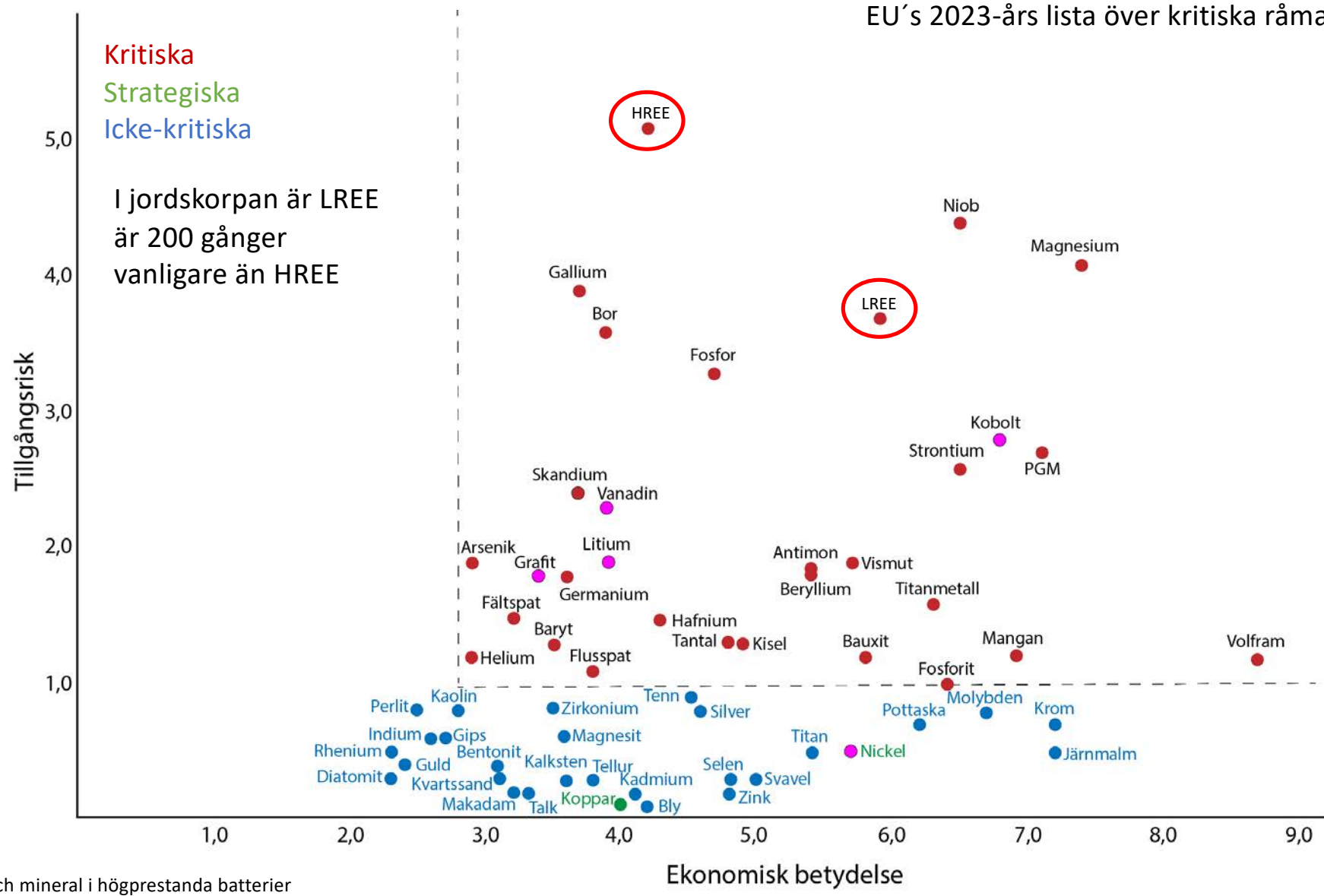


<https://www.mindat.org/photo-39230.html>

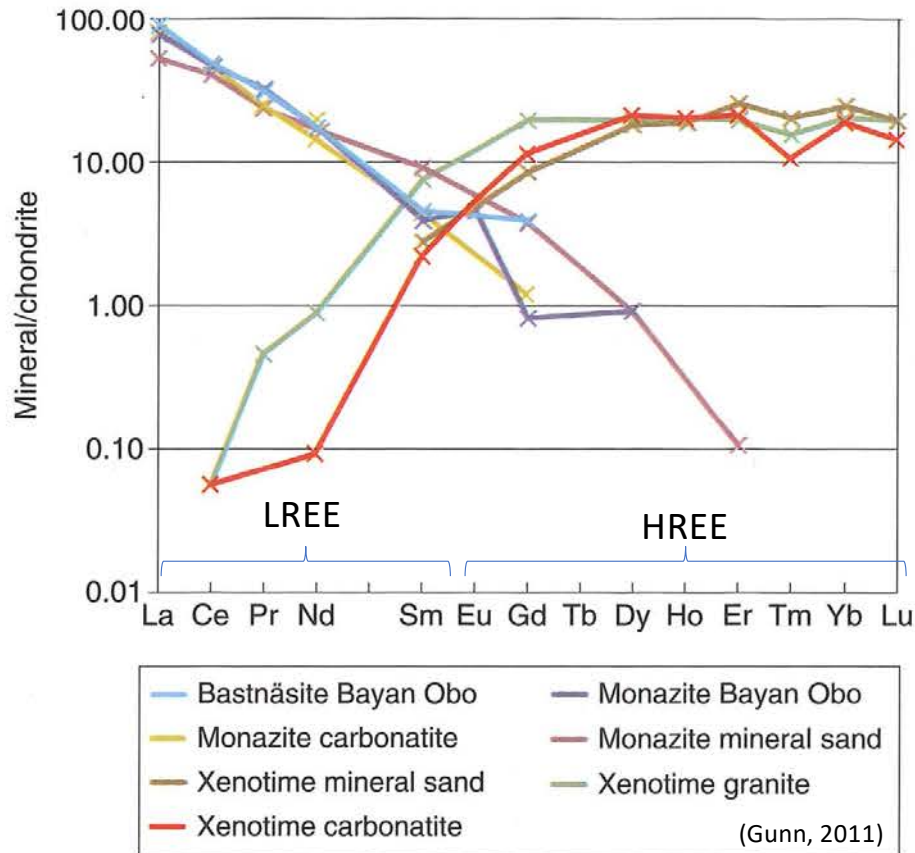
Koncentration av olika grundämnen i jordskorpan



EU's 2023-års lista över kritiska råmaterial



De viktigaste malmmineralen för sällsynta jordartsmetaller



Det finns ca 200 olika mineral med sällsynta jordartsmetaller som en essentiell komponent i sammansättningen.

I många andra mineral substituerar REE i olika grad för andra grundämnen i kristallstrukturen.

De viktigaste malmmineralen utgörs av:

Karbonater: (bastnäsit LREECO_3F , parisit, $\text{CaLREE}_2(\text{CO}_3)_3\text{F}$ och synchysit $(\text{CaLREE}(\text{CO}_3)_2\text{F})$

Fosfater: monazit (CeLREEPO_4) och xenotim (YHREEPO_4)

REE-malm Mountain Pass



Bastnäsit LREECO_3F

Parisit, $\text{CaLREE}_2(\text{CO}_3)_3\text{F}$

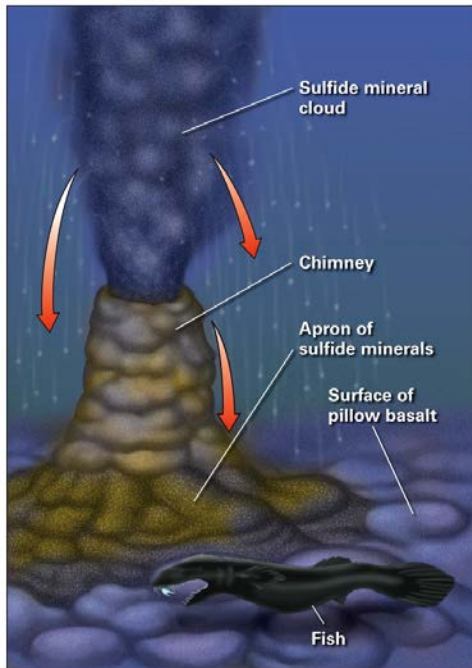
Synchysit $\text{CaLREE}(\text{CO}_3)_2\text{F}$

± Monazit LREEPO_4

Bastnäsit beskrevs av Hisinger 1838 som en "fluorrik karbonat rik på sällsynta jordartsmetaller"

Namngavs senare av Jean Jaques Nicolas Hout 1841

Principiell malmbildningsprocess



Copyright © 2015 W. W. Norton & Company, Inc.

Hydrotermal – transport och avsättning via en het vattenlösning

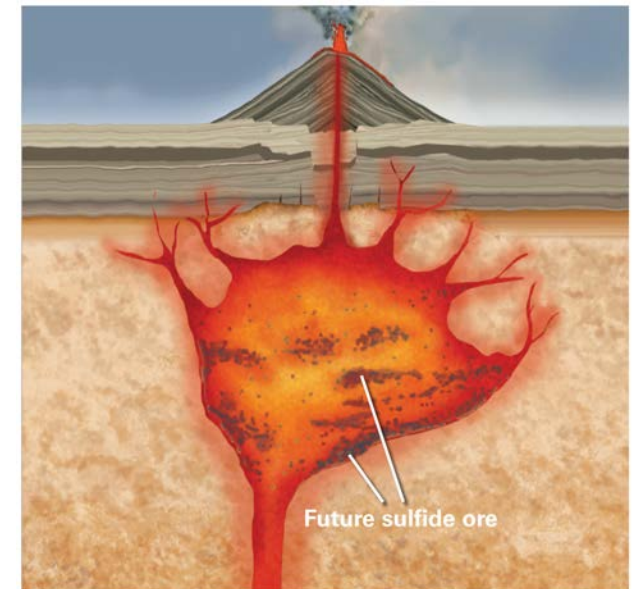
Källa för metaller



Transport och koncentration av metaller



Avsättning av metaller



Copyright © 2019 W. W. Norton & Company, Inc.

Direktmagmatisk – transport och avsättning i en magma

Tre huvudsakliga malmbildande processer

Direktmagmatiska malmer

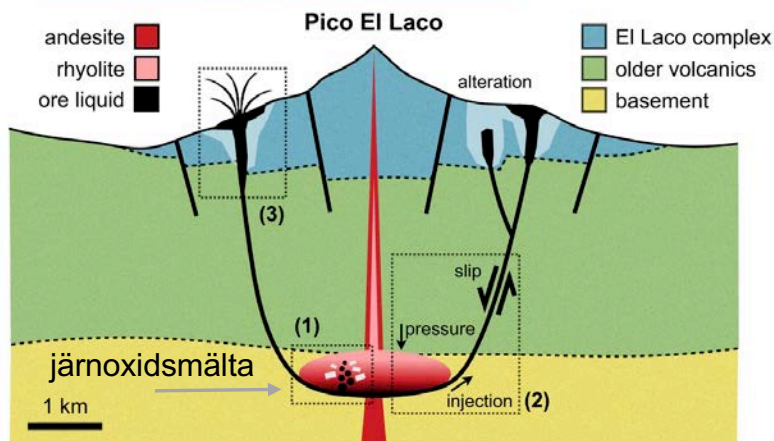
Malmer bildade direkt ur en magma genom separation (kristallisationsfraktionering) eller i magmatiska restlösningar som anrikas på vissa sk litofila grundämnen (t.ex. Li, Sn, Be i bergarten pegmatit)

Hydrotermala malmer

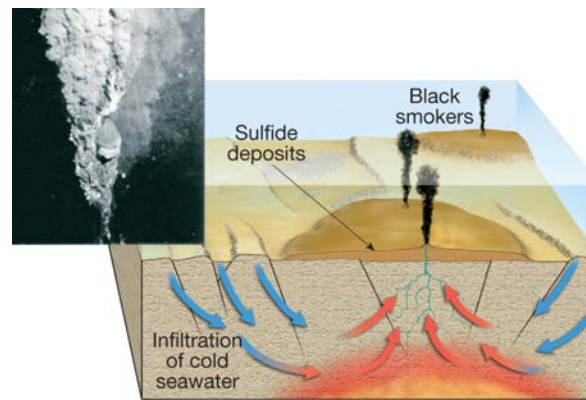
Malmer bildade ur heta vattenlösningar, ofta associerade till magmatisk aktivitet

Sedimentära och sekundärt bildade malmer

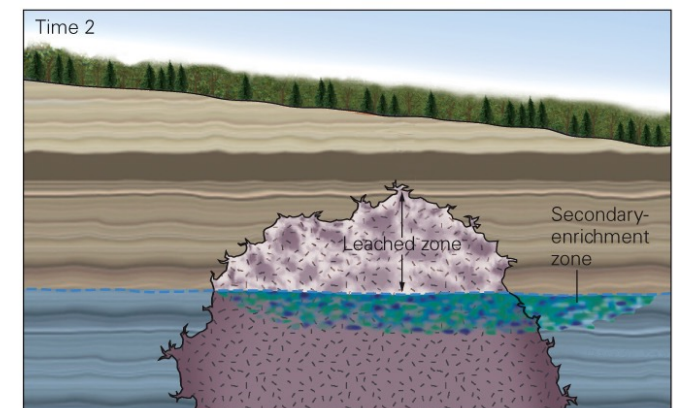
Malmer som bildats av ytnära processer (vittring, utfällning, oxidation)



(1) Fe-Si liquid separation (2) collapse-driven injection (3) vapour-driven extrusion



Copyright © 2015 W. W. Norton & Company, Inc.



Copyright © 2015 W. W. Norton & Company, Inc.

Förekomsttyper

Karbonatit

Magmatisk kalksten som bildas i kontinentala riftsystem, t.ex Mountain Pass i USA
Kräver ofta senare sekundär omvandling för att bli ekonomisk, t.ex Bayan Obo i Kina

Alkalina magmatiska bergarter

SiO₂-undermättade, K- och Na-anrikade bergarter, bildade i kontinentala riftsystem, t.ex Norra Kärr

“IOCG”-typ malmer (iron oxide-copper-gold):

Apatitjärnmalmer t.ex Kiruna, Grängesberg

Hydrotermala gångar

Varma, metallrika hydrotermala system där mineralen fälls ut i spricksystem, t.ex Olserum

Skarnjärnmalmer

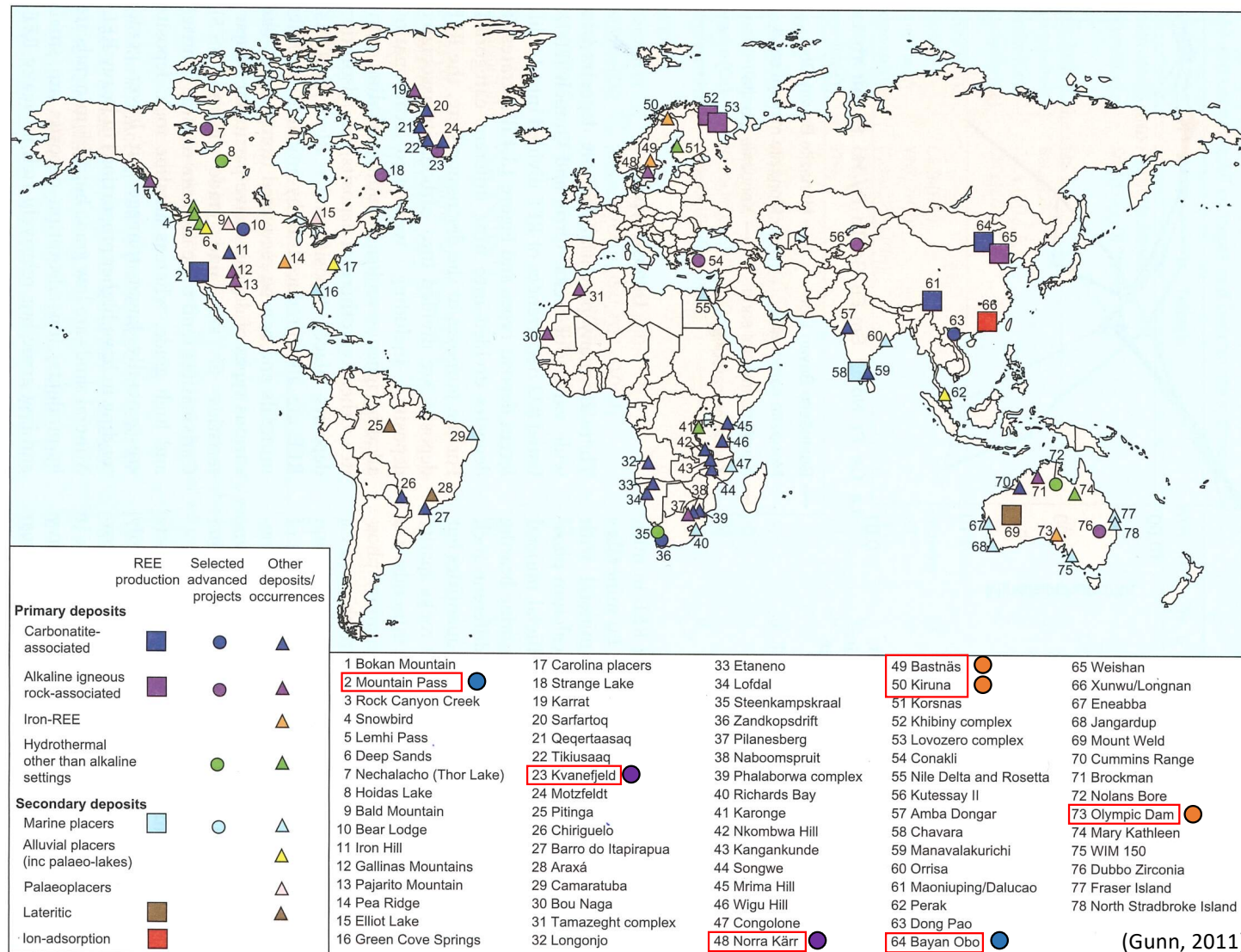
Skarn är en omvandlad bergart som i huvudsak består av Fe-Mg-Ca-silikatmineral, t.ex Bastnäsområdet

Jonadsorptionsleror

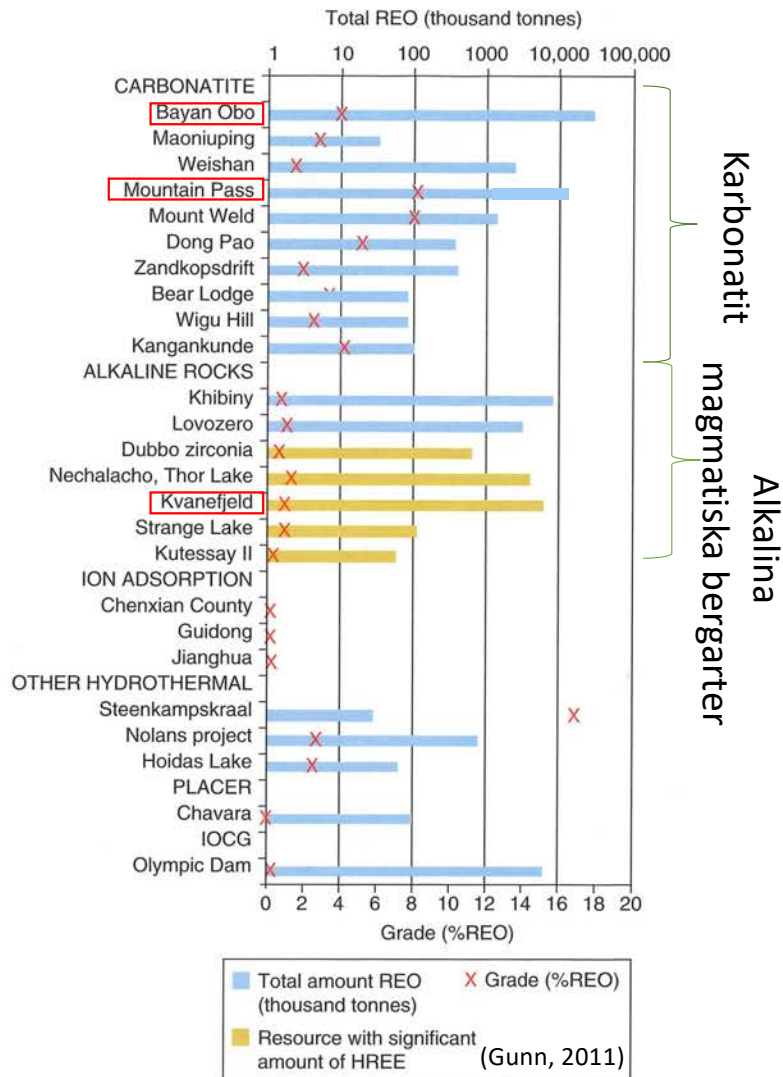
Leromvandlad företrädesvis granit där metallerna adsorberas på lerpartiklar

Vaskförekomster

Vittringsmotståndiga mineral (t.ex monazit och xenotim) som anrikas av rinnande vatten eller vågor



Storlek och malmgrad för olika förekomststyper



De största REE-förekomsterna är Bayan Obo i Mongoliet och Mountain Pass i i Kalifornien

De är hittills de enda med en känd reserv på över 10 miljoner ton
Båda förekomster utgörs av karbonatit, som också är värdbergart för många andra rika malmer

Av dessa är malmen i Mountain Pass rikare med en genomsnittlig halt av 8 vt% REO (oxid av sällsynta jordartsmetaller)

Malmen i Bayan Obo är betydligt lägre (4 vt% REO)

Övriga rika förekomster återfinns i alkalina magmatiska bergarter, bla Kvanefjeld på Grönland, som är Europas största fyndighet med sällsynta jordartsmetaller. Malmen är fattig (1 vt% REO) men förekomsten stor.

De största förekomsterna återfinns i karbonatit



This 2024 photo provided by MP Materials shows an aerial view of the company's mine in Mountain Pass, Calif.
MP MATERIALS—AP

Mountain Pass är den enda REE-gruvan i USA
Malmmineralen består av **bastnäsit** (LREECO_3F)
och **monazit** [$\text{CeLREE}(\text{PO}_4)$] som planeras att
tillvaratas

Malmen exporteras till Kina för processering

Trumpadministrationen har infört
exportrestriktioner och 125% tull på import
från Kina



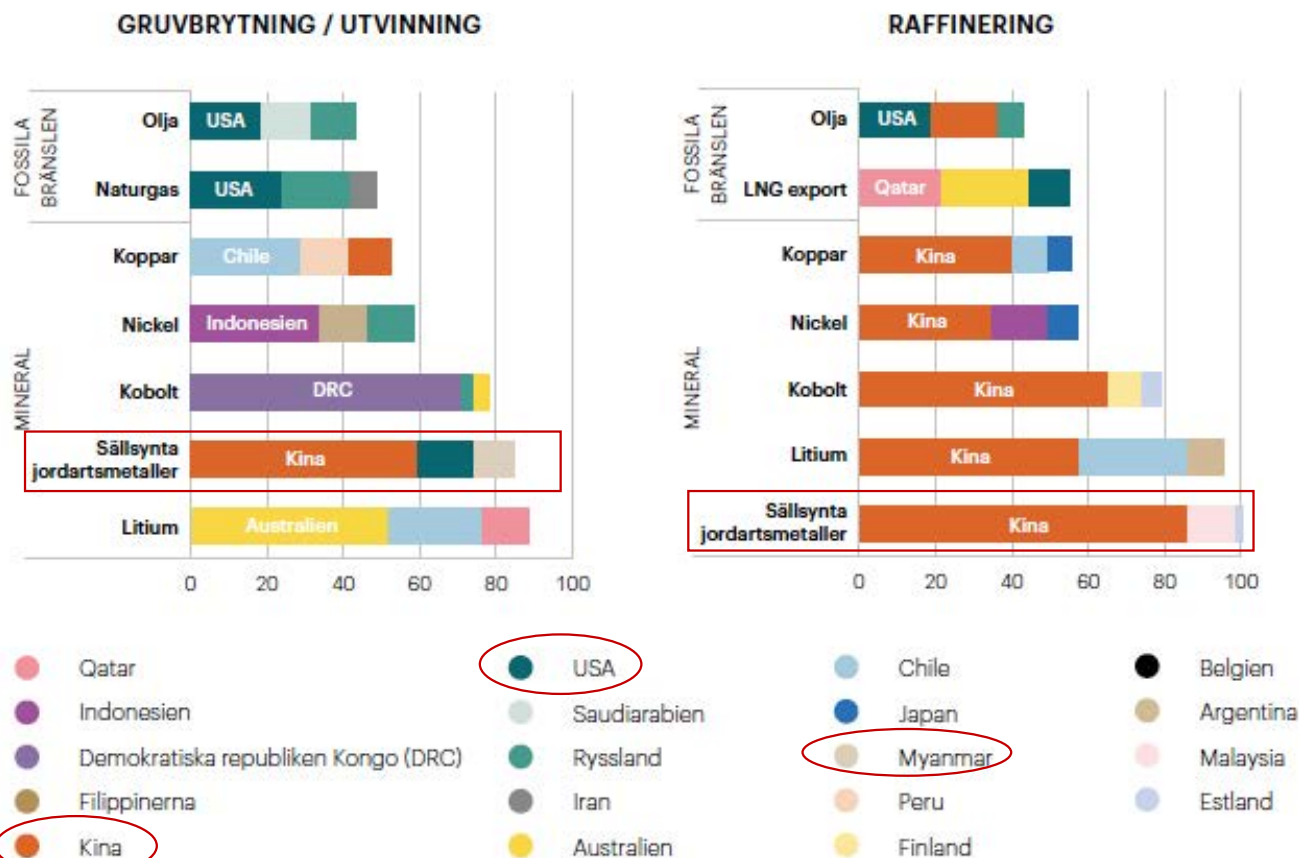
<https://www.nsenenergybusiness.com/projects/bayan-obo-rare-earth-mine/>

Bayan Obo i Mongoliet är värden största REE-gruva
Malmmineralen består av **bastnäsit** (LREECO_3F) och
monazit [$\text{CeLREE}(\text{PO}_4)$]

Gruvan ligger i ett ökenområde med mycket begränsad
tillgång på vatten

Brytningen är förknippad med stora miljöproblem, av bla
U, Th och As

Figur 8: Marknadskoncentration av metaller och mineral för energiomställningen är större än för traditionella bränslen som olja och gas. Källa: (IEA, 2022)

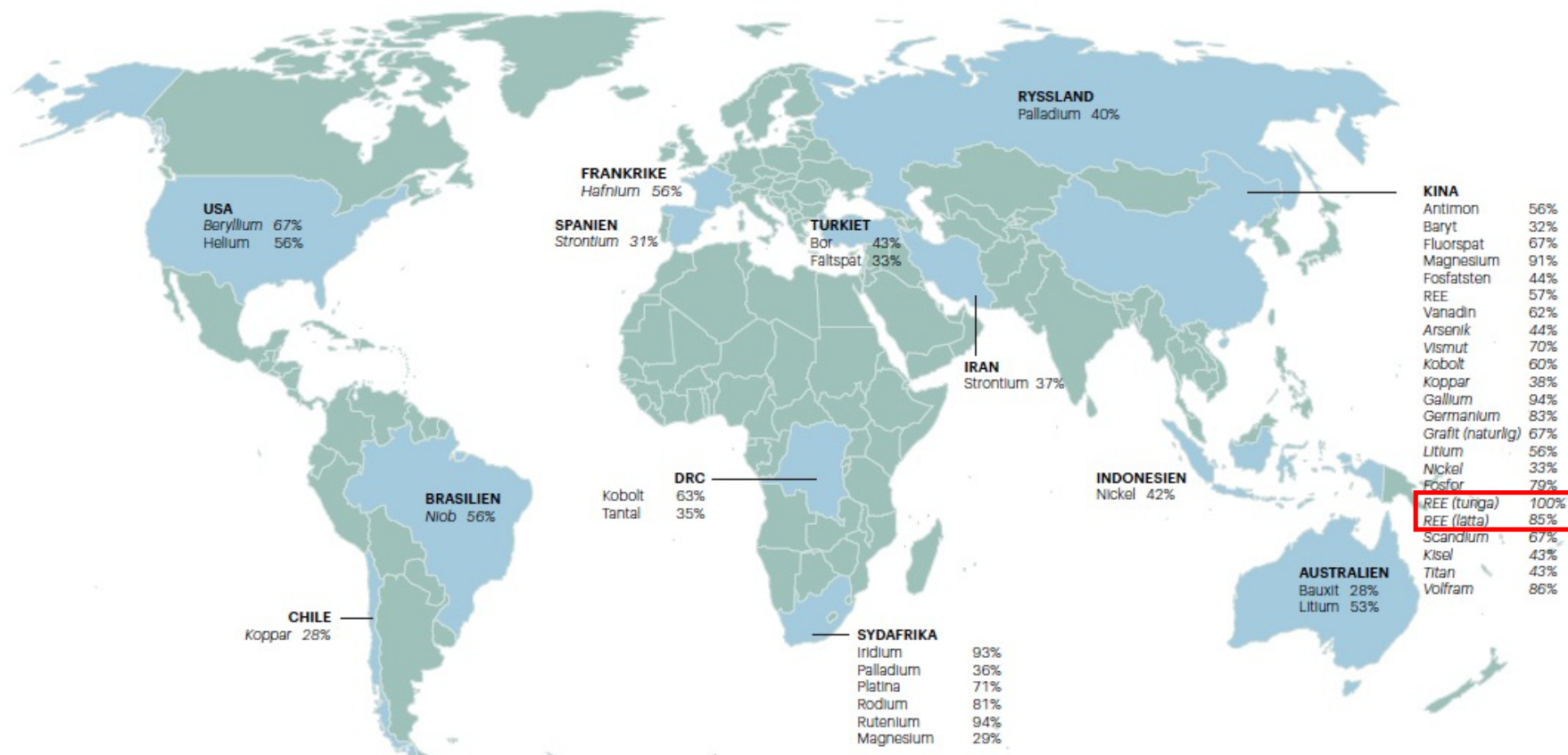


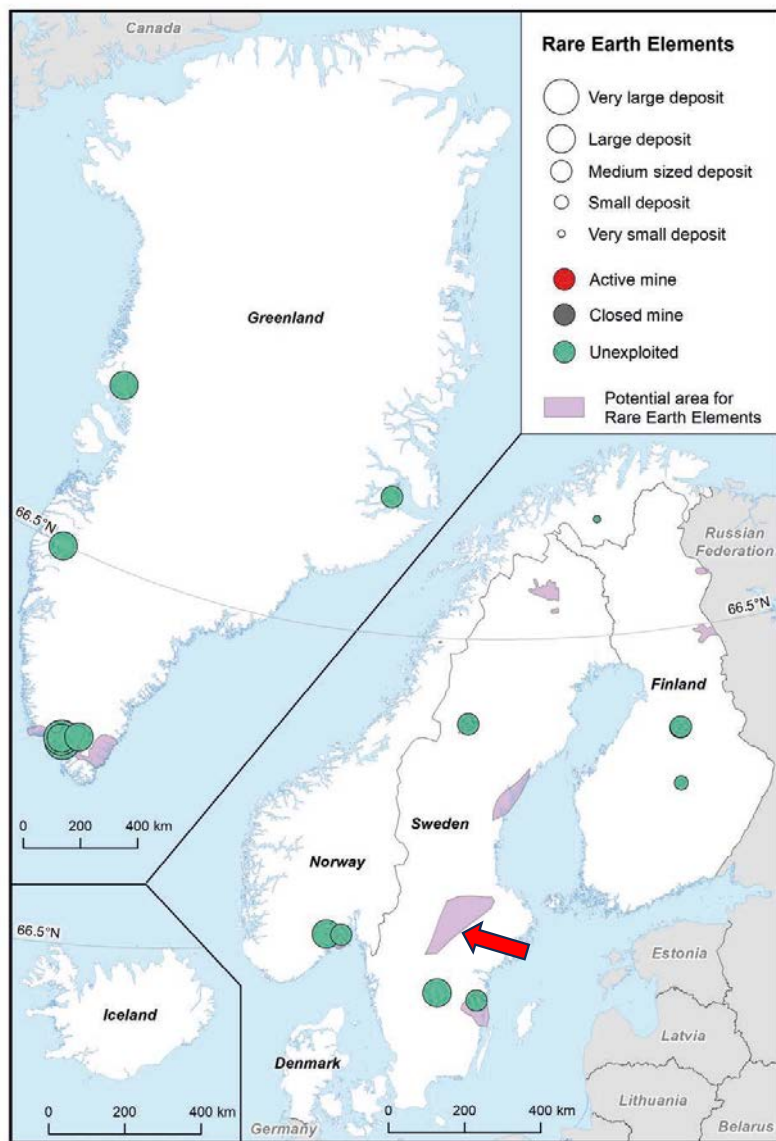
60% av den globala utvinningen av sällsynta jordartsmetaller sker i Kina
USAs andel är ca 15%

För raffinering står Kina för hela 90%
Mindre produktion sker i Malaysia och Estland

Kina dominerar även brytning och produktion av andra kritiska metaller och mineral

Huvudsakliga producentländer för kritiska metaller och mineral





(Eilu m.fl., 2021)

Sällsynta jordartsmetaller ur ett Nordiskt perspektiv

Kvanfjeld på södra Grönland största förekomsten av sällsynta jordartsmetaller i Norden

Värdbergarten är en alkalisk magmatisk bergart (nefelinsyenit)

Malmen är också rik på Th och U

Övriga rika förekomster är karbonatiten i Fen i södra Norge och nefelinsyeniten i Norra Kärr vid Vätten i Sverige

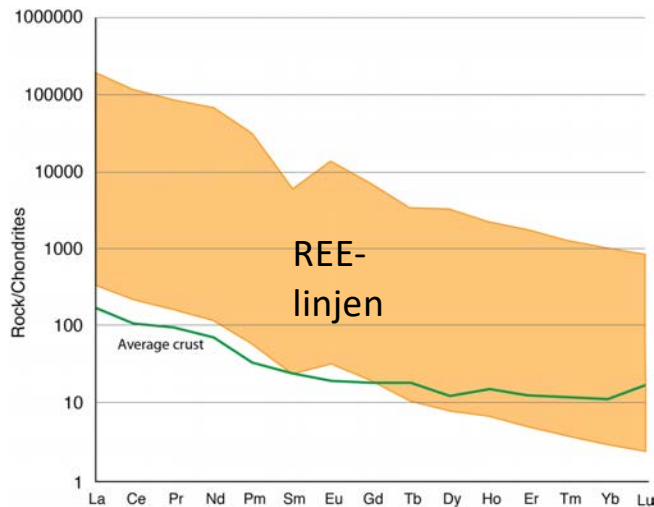
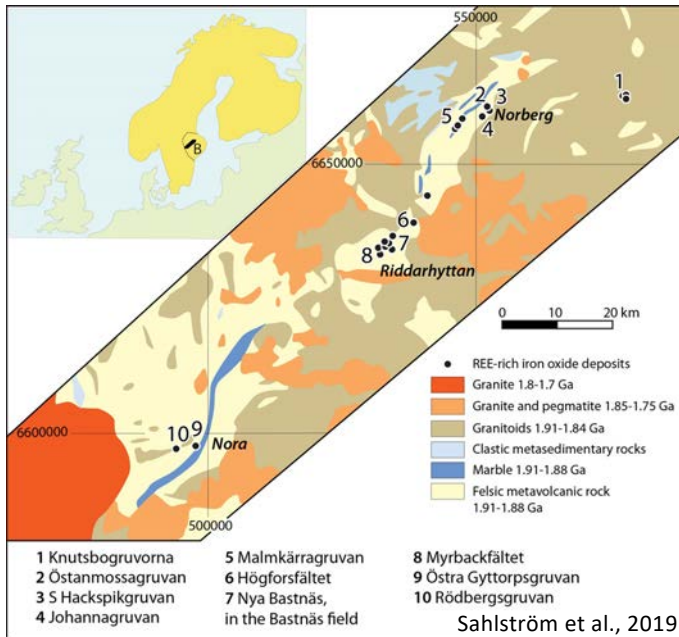
Norra Kärr är en fattig malm (0,6 vt% REO) men rik på de eftertraktade tunga sällsynta jordartsmetallerna, och saknar i stort sett U och Th

Förutom sällsynta jordartsmetaller är fyndigheten rik på Zr



Eudialyt $[\text{Na}_{15}\text{Ca}_6\text{Fe}_3\text{Zr}_3\text{Si}(\text{Si}_{25}\text{O}_{73})(\text{O},\text{OH},\text{H}_2\text{O})_3(\text{Cl},\text{OH})_2]$, Norra Kärr

Bastnäs och den sk REE-linjen



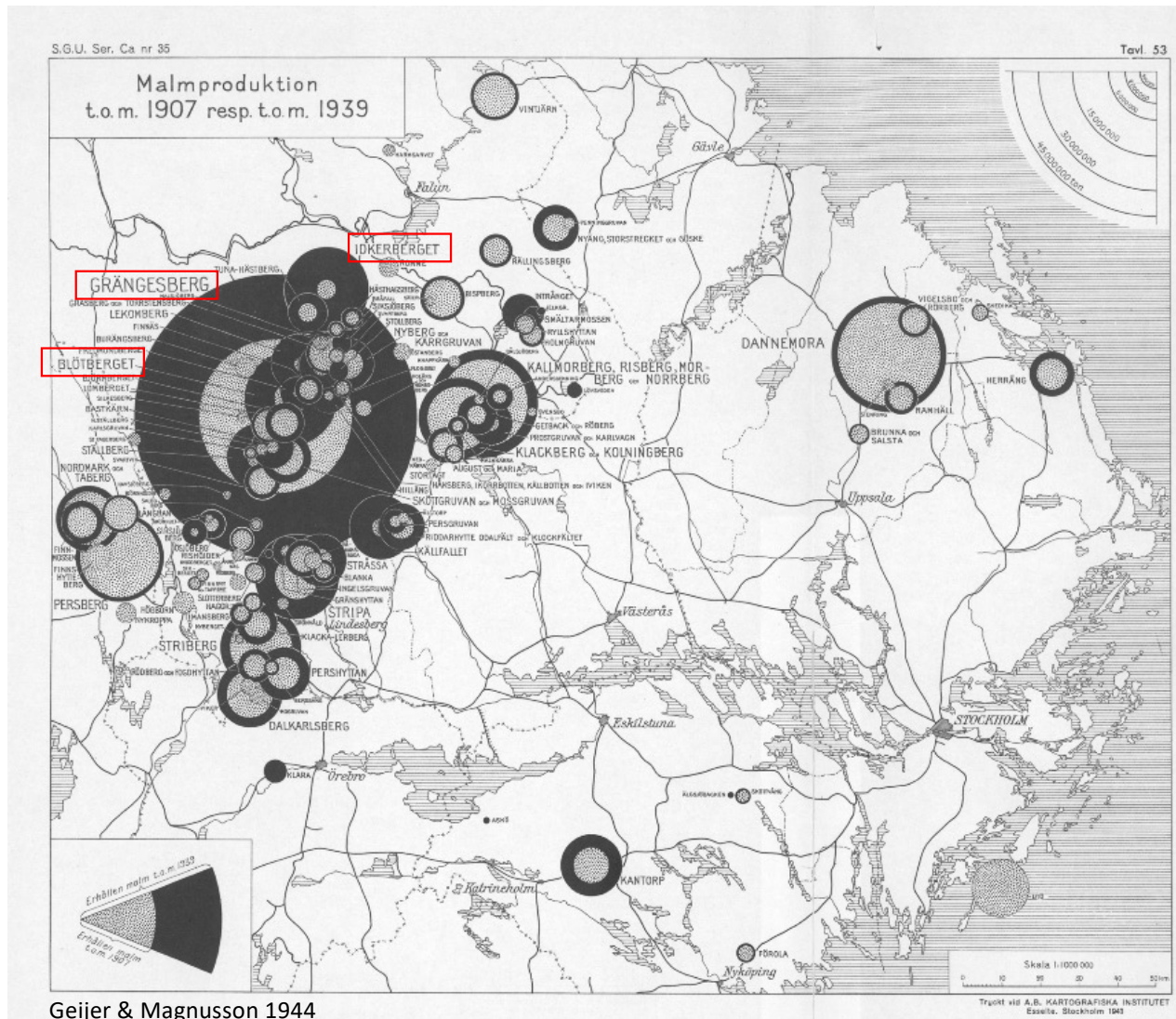
Mineral:

General formula:

Allanite-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{LREE})\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2[\text{SiO}_4][\text{Si}_2\text{O}_7]\text{O}(\text{OH})$
Bastnäsite-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})(\text{CO}_3)\text{F}$
Bastnäsite-(La)	$(\text{La}, \text{LREE})(\text{CO}_3)\text{F}$
Cerianite-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{REE})\text{O}_2$
Cerite-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE}, \text{Ca})_9(\text{Mg}, \text{Fe})[\text{SiO}_4]_6[\text{SiO}_3\text{OH}](\text{OH})_3$
Delhuyarite-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})_4\text{Mg}(\text{Fe}_2\text{W})\square[\text{Si}_2\text{O}_7]_2\text{O}_6(\text{OH})_2$
Dissakisite-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{LREE})\text{MgAl}_2[\text{SiO}_4][\text{Si}_2\text{O}_7]\text{O}(\text{OH})$
Dollaseite-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{LREE})\text{Mg}_2\text{Al}[\text{SiO}_4][\text{Si}_2\text{O}_7]\text{F}(\text{OH})$
Ferriallanite-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{LREE})\text{Fe}^{3+}\text{AlFe}^{2+}[\text{SiO}_4][\text{Si}_2\text{O}_7]\text{O}(\text{OH})$
Ferriperbøeite-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{LREE})_3(\text{Fe}^{3+}\text{Al}_2\text{Fe}^{2+})[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4]_3\text{O}(\text{OH})_2$
Fluocerite-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})\text{F}_3$
Fluocerite-(La)	$(\text{La}, \text{LREE})\text{F}_3$
Fluorbritholite-(Ce)	$\text{Ca}_2(\text{Ce}, \text{LREE})_3[\text{SiO}_4]_3\text{F}$
Fluorbritholite-(Y)	$\text{Ca}_2(\text{Y}, \text{REE})_3[\text{SiO}_4]_3\text{F}$
Gadolinite-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE}, \text{Y})_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$
Gadolinite-(Nd)	$(\text{Nd}, \text{Y}, \text{REE},)_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$
Gadolinite-(Y)	$(\text{Y}, \text{REE},)_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$
Håleniusite-(La)	$(\text{La}, \text{LREE})\text{OF}$
Hingganite-(Y)	$(\text{Y}, \text{REE},)_2\text{Be}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$
Lanthanite-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})(\text{CO}_3)_3\text{F} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Magnesianrowlandite-(Y)	$(\text{Y}, \text{REE})_4\text{MgSi}_4\text{O}_{14}\text{F}_2$
Monazite-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})(\text{PO}_4)$
Parisite-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{LREE})_2(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$
Percleveite-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})_2\text{Si}_2\text{O}_7$
Synchysite-(Ce)	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{LREE})(\text{CO}_3)_2\text{F}$
Törnebohmite-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})_2\text{Al}[\text{SiO}_4]_2(\text{OH})$
Ulfanderssonite-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})_{15}\text{CaMg}_2[\text{SiO}_4]_{10}[\text{SiO}_3\text{OH}](\text{OH}, \text{F})_5\text{Cl}_3$
Västmanlandite-(Ce)	$(\text{Ce}, \text{LREE})_3\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_2\text{Si}_5\text{O}_{19}(\text{OH})_2(\text{F}, \text{OH})$

Sahlström et al., 2019

Apatitjärnmalmer



De största järnmalmena i Sverige söder om Norrbotten är apatitjärnmalmer i västra Bergslagen

De förekommer i ett 40 km långt stråk mellan Grangesberg och Idkerberget

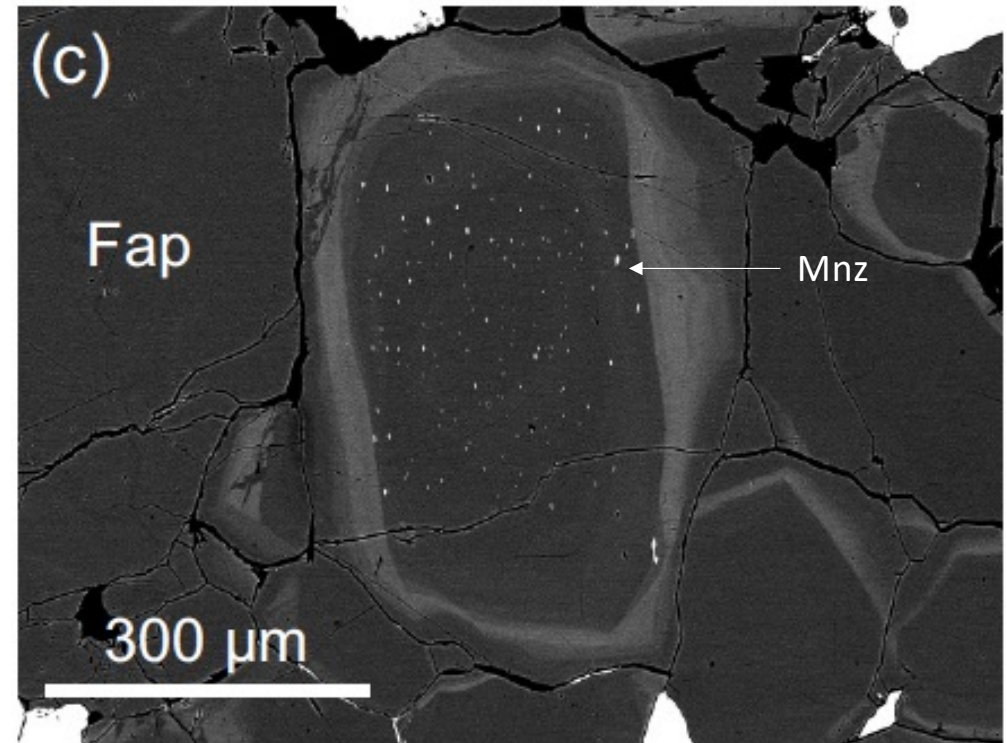
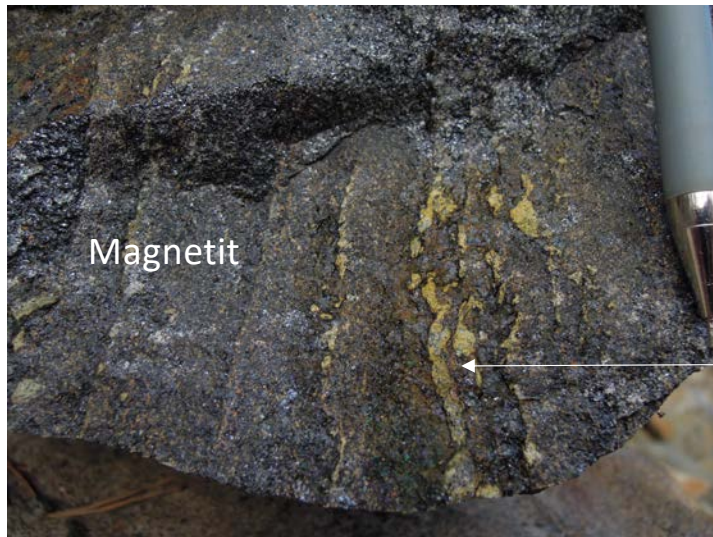
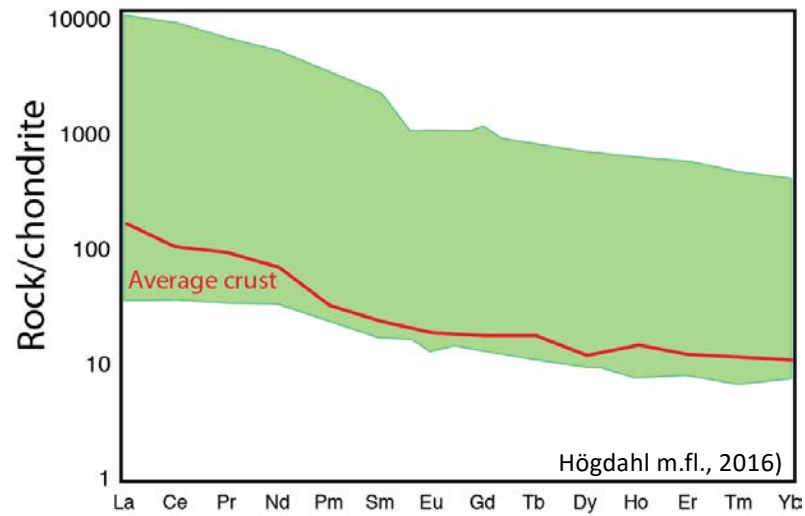
Sällsynta jordartsmetaller förekommer framför allt i fluorapatit $[\text{CaPO}_4\text{F}]$ där REE tillsammans med Si eller Na substituerar för Ca

De har i medeltal 1 v% P, men halten kan uppgå till 8 vt%

Avblandning av monazit och xenotim är vanligt

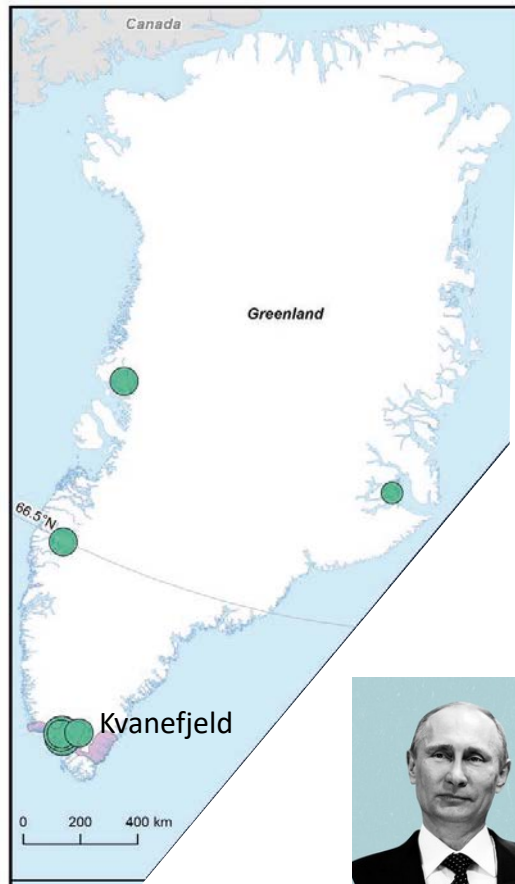
Övriga REE-mineral är allanit $[(\text{CaLREE})(\text{AlAlFe}^{2+})\text{O}[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4](\text{OH})]$ och fluorkarbonaterna (parisit och synchysit) mer blygsamt

Apatitjärnmalmer

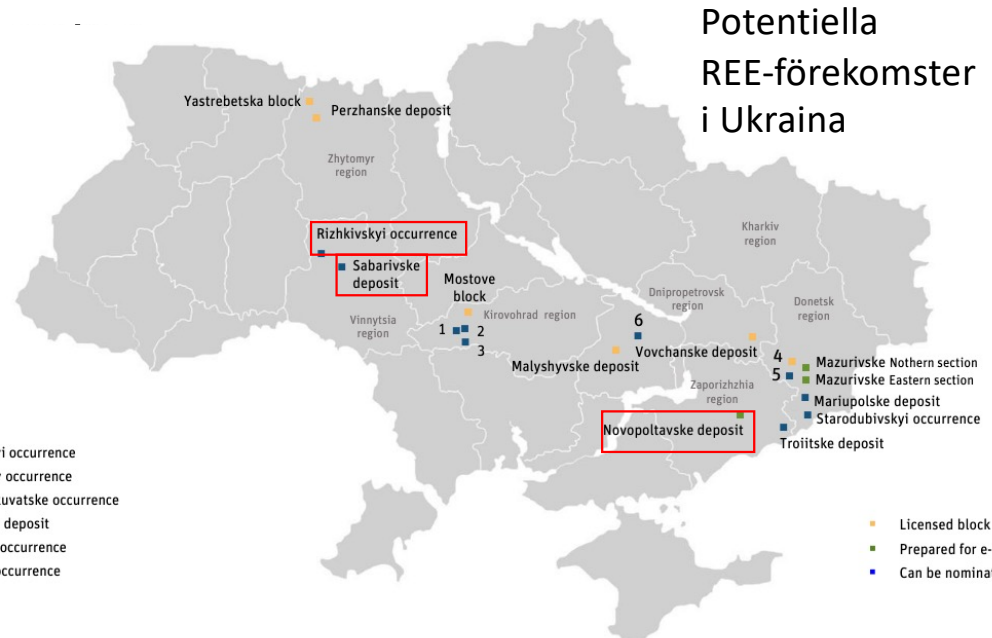


Jonsson m.fl. 2016

Sällsynta jordartsmetaller och geopolitik



(Eilu m.fl., 2021)



1. Lypnyazkyi occurrence
2. Tashlytsky occurrence
3. Novostankuvatske occurrence
4. Anadolske deposit
5. Dianivske occurrence
6. Gurivske occurrence

- Licensed block
- Prepared for e-auction
- Can be nominated for an auction

NOVOPOLTAVSKE license (mines Pivdenne, Pivniche) - apatite, rare earth ores, tantalum ores, niobium ores, strontium ores, uranium ores, fluorine, magnetite - production license - Zaporizhzhia region 938 ha - proved reserves (thousand tons): apatite B+C₁ – 859628/42310, C₂ – 95858/4268, strontium ores B+C₁ – 859627/865, C₂ – 95858/87, rare earth ores B+C₁ – 85962/1938, C₂ – 95858/274, tantalum ores, niobium ores – “for official use only” Open for nomination	SABARIVSKE license - rare earth ores - E&P license up to 20 years - Vinnitsia region - grade of Σ TR – up to 6.44% - the reserves are estimated under category C₂ Is being prepared for e-auction	RIZHKIVSKIY license - thorium ores, rare earth ores - E&P license up to 20 years - Vinnitsia region - grade of Th – up to 0.873%, Σ TR – up to 0.35% - the reserves were not estimated Is being prepared for e-auction
---	---	---

<https://www.geo.gov.ua/wp-content/uploads/presentations/en/investment-opportunities-in-exploration-production-strategic-and-critical-minerals.pdf>



Sällsynta metaller och stormaktsrivalitet

En översikt om nya strategiska resurser och risken för råvarukonflikter

Niklas H. Rossbach

FOI-R--5478--SE

Juni 2023



Rossbach 2023

Tack för uppmärksamheten



Gadolinit-(Y) från Ytterby

<https://www.mindat.org/photo-120340.html>