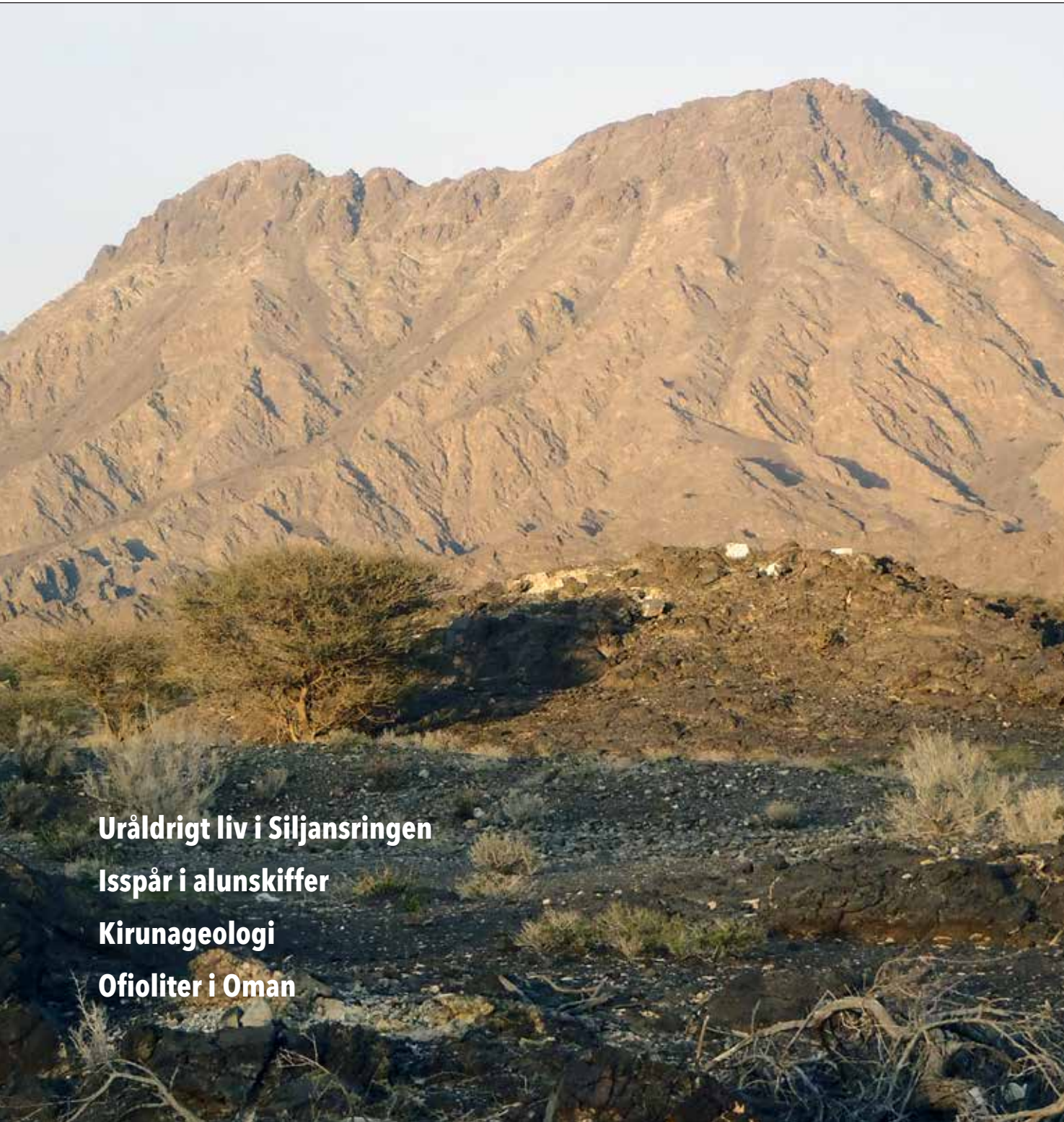


GEOLOGISKT FORUM

Nr 105 ♦ 2020



Uråldrigt liv i Siljansringen

Isspår i alunskiffer

Kirunageologi

Ofioliter i Oman

GEOLOGISKT FORUM

Nr 105 ♦ 2020

ISSN 1104-4721

Ansvarig utgivare: Pär Weihed

Redaktör:

Jeanette Bergman Weihed
tel. 070-3724828
e-post: jeanette@tellurit.se
För text, layout och bilder svarar redaktören där inget annat anges.

Redaktionens adress:

Geologiska Föreningen
c/o Tellurit AB,
Storgatan 11,
972 38 Luleå
e-post: info@geologiskaforeningen.se

Omslagsbild: Mohorovičić-diskontinuiteten nära toppen av det berg i Oman som av geologer kallas "5 o'clock Moho". Läs mer om Semail-ofioliten och Moho på sidan 18. Foto: Erik Sturkell.

Upplaga: 500 ex.

Tryckeri: Elanders Sverige.

Ordinarie lösnummerpris: 75 kr.

För annonser, distribution, prenumerationsärenden, adressändring, köp av tidigare nummer samt reklamationer: kontakta redaktionen.

För dig som är medlem i Geologiska Föreningen ingår tidningen i det ordinarie medlemskapet. Som medlem har du också tillgång till tidningen som pdf samt ett digitalt arkiv. Man kan också lösa en årsprenumeration av tidningen. Läs mer på vår webbplats.

Ange namn, adress och e-postadress vid betalning till vårt Plusgiro 2108-9 eller Bankgiro 749-6359. Du kan också betala direkt med kort på vår webbplats www.geologiskaforeningen.se

Tidningen publicerar sedan starten år 1994 populärvetenskapliga artiklar inom geovetenskapens alla områden.

Välkommen att kontakta redaktören om du vill medverka i Geologiskt forum. Författarna svarar själva för innehållet i sina artiklar. Nästa nummer av Geologiskt forum kommer i juni 2020.



I DETTA NUMMER

- 3 Meteoriter, kristallkulor och jubileumsförberedelser
- 3 Gigantisk asteroidsmäll gav ökad biologisk mångfald på jorden
- 3 Låga halter av miljögifter i grundvattnet
- 4 En titt in i alunskefferns "kristallkulor" – ser vi spår av is i ett tropiskt hav?
- 8 Fältarbete förr
- 9 Andrea Håkansson ny styrelseledamot
- 10 Rockfossil och fossilrock
- 12 Kiirunavaara – världens största apatitjärnmalm
- 18 Manteln tur och retur
- 24 Strandförskjutning i trapphus B, Geovetarcentrum, Göteborg
- 26 Spår av uråldrigt mikrobiellt liv djupt ner i Siljansringen
- 33 Minnesord: Sven Stridsberg
- 34 Assar Haddings pris till Stefan Bengtson
- 34 Nytt borrhole ska undersöka postglaciala förkastningar
- 35 På gång
- 35 Ny rapport om innovationskritiska metaller och mineral i Bergslagen
- 35 Självkörande drönare navigerar i bergrum



Meteoriter, kristallkulor och jubileumsförberedelser

Geologiska Föreningen har påbörjat planeringen för sitt 150-årsjubileum som infaller nästa år. Preliminärt kommer vi att hålla en konferens i Uppsala i mitten eller slutet av augusti 2021 som vi hoppas ska locka lika många deltagare som kom till mötet som hölls då föreningen firade 125 år.

Kanske finns det intresse av ytterligare aktiviteter under jubileumsåret? Eller skulle du vilja hjälpa till med arrangemanget av konferensen? Tveka i sådana fall inte att höra av dig till någon i styrelsen eller till mig.

Det här numret av Geologiskt forum bjuder på

många olika nedslag i den geovetenskapliga världen. Föreningens pristagare från förra året, Lars Holmer, berättar om fynd av pseudomorfer av ikait, som ställer nya frågor kring tidigare klimatmodeller för ordovicium.

Ulf B. Andersson och Henrikki Ruutanen presenterar den spännande geologin i Kirunagruvan, världens största järnmalmgruva under jord.

Erik Sturkell berättar om de mantelbergarter man kan studera i Semail-ofioliten i Oman och vad den skulle kunna ha för betydelse för lagring av koldioxid.

Vi får också följa med ner i berget under Siljansringen. Henrik Drake berättar om sin forskning som visar att där bildats metangas av mikroorganismer under minst 80 miljoner år.

Serien anekdoter skrivna av Jan Lundqvist fortsätter med en inblick i hur fältarbete tidigare kunde gå till. Det är bra att man infört ett högre säkerhetstänkande vid fältarbete idag!

Föreningens årsmöte kommer att hållas den 17 maj i Uppsala, se notis på sidan 35. Kallelse kommer att skickas ut till samtliga medlemmar några veckor innan mötet.

Förhoppningsvis har coronavirusepidemin lagt sig till dess så att vi faktiskt kan hålla mötet. Jag fick nyligen veta att världsgelogikkongressen, som skulle ha hållits i Indien nu i mars, har skjutits upp till i november.

Jeanette Bergman Weihed, redaktör



Gigantisk asteroidsmäll gav ökad biologisk mångfald på jorden

En internationell studie ledd av forskare vid Lunds universitet har nyligen visat att en kollision i asteroidbältet för 470 miljoner år sedan radikalt förändrade livet på jorden. Solsystemet fylldes med enorma mängder rymddamm då en 150 km stor asteroid krossades mellan Mars och Jupiter.

Eftersom solens strålar genom detta fick svårare att tränga fram till jorden uppstod en istid. Från att jorden tidigare varit jämnvarm, där samma djurarter kunde leva överallt, utvecklades flera olika klimatzoner, från arktiska förhållanden vid polerna till tropiska vid ekvatorn. Som en anpassning till istiden ökade också den biologiska mångfalden avsevärt bland jordens ryggradslösa djur.

Ledtrådar fick man genom att mäta bland annat förekomsten av utomjordisk heliumgas i sedimentära bergarter från Kinnekulle. Läs hela artikeln i Science Advances genom att följa qr-koden.

Källa: Lunds universitet



Låga halter av miljögifter i grundvattnet

Sveriges grundvatten innehåller generellt många olika miljögifter, men halterna är överlag låga och under gränsvärdena. Det visar en ny screening av miljögifter som SGU, på uppdrag av Naturvårdsverket, genomfört tillsammans med 17 av landets länsstyrelser och på 188 olika platser i landet. Totalt undersöktes 220 prover.

Fokus har varit att öka kunskapen om spridningen av miljögifter i grundvatten utanför städer och tätorter och resultatet ska bilda ett underlag för hur miljögiftsövervakningen i grundvatten ska utvecklas framöver.

I nästan varje undersökt brunn påträffades något miljögift men totalt sett påträffades få halter som låg över rapporteringsgränsen. Halterna av miljögifter bedöms överlag vara låga. De vanligast förekommande miljögifterna var PFAS, bekämpningsmedel, halogenerade alifater och BTEX. Läkemedel påträffades däremot i mindre utsträckning jämfört med den screening som gjorts tidigare i stadsnära miljöer. Ftalater, 1,4-dioxan och övriga ämnen förekom på väldigt få platser, främst vid provpunkter i anslutning till deponier.

Undersökningen omfattade fler än 200 organiska miljögifter, basparametrar som pH, konduktivitet och närsalter, samt ett stort antal metaller.

Källa: SGU.



FOTO: LARS HOLMER.

En titt in i alunskifferns "kristallkolor" – ser vi spår av is i ett tropiskt hav?

När den tidigordoviciska alunskiffern bildades för ungefär 480 miljoner år sedan tyder tidigare forskningsresultat på att vi ska ha haft ett mycket varmt växthusklimat i Sverige och Baltikum, med vattentemperaturer kring 47–49 °C. Dessa resultat står nu i skarp kontrast till våra baltiska fynd av mineralet glendonit i tidigordoviciska "kristallkolor", något som indikerar att temperaturen på havsbotten låg nära fryspunkten.

TEXT: LARS HOLMER

LEONID POPOV OCH JAG har forskat på de extremt brachiopodrika kambro-ordoviciska gränslagren i Baltikum och Sverige sedan 1980-talet. I Estland innehåller dessa gränslager så stora mängder av fosfat-skaliga brachiopoder att man sedan länge brutit dem kommersiellt för att utvinna fosfat. Denna väldigt miljö-förstörande brytning – I Estland kallas de våldsamma protesterna under

1980-talet mot denna brytning för fosforitkriget – avslutades i samband med att Sovjetunionen löstes upp och Estland återfick sin självständighet.

Det finns nu långt gångna planer på att återuppta brytningen, dock förhoppningsvis med mer miljömässigt hållbara metoder. Under sommaren 2017 kunde vi, tillsammans med resten av vår väldigt internationella grupp, genomföra fältarbete i den

intressanta glendonitförande alunskiffern i de väl exponerade mäktiga profilerna längs den 1200 km långa baltiska klinten – en skarp eroderad klippa som följer kusten (se kartan på nästa sida).

Alunskiffern med glendonitförande orstenar ligger där direkt ovanpå de fosforitförande lagren, och alunskiffern växellagrar med sandiga sediment som innehåller stora



Till vänster: Baltiska klinten. Den Baltiska klinten är en dramatisk erosionsbrant som bildar ett sammanhängande system av branta klippor, bl.a. i Estland och Ryssland, här vid Pakriudden, nära den gamla sovjetiska basen vid Paldiski, väster om Tallinn. Den svarta alunskiffern som innehåller glendoniten kan ses i botten av skärningen.

Ovan: Kartan visar den Baltiska klinten och de glendonitförande lokalerna längs denna.

mängder omlagrade fragmentariska fosfatskal från de äldre lagren.

Alunskiffer

Den svenska och baltiska alunskiffern har stor utbredning och är kanske en av vår regions mest dagsaktuella och kontroversiella mineralrika naturresurser. Det är förekomsten av vana-din och andra mineraliseringar, t.ex. av uran, och den ökande efterfrågan på dessa metaller som gör skiffern intressant. Motståndet mot prospektering och eventuell brytning har dock varit starkt i Sverige.

Uran från alunskiffer har brutits en kort period i det västgötska Ranstad i Sverige, och tidvis har uran också brutits från alunskiffer i Estland. I den helt stängda staden Sillamäe fanns dessutom en hemlig anrik-ningsanläggning under sovjettiden. Enligt vissa uppgifter ska anrik-

ningen i samband med de första sovjetiska atombombsproven ha skett vid denna anläggning, men dessa uppgifter är givetvis svåra att kontrollera.

Alunskifferns bildningsmiljö har diskuterats sedan början av 1900-talet, men det är relativt klart att dessa organiskt rika oljeskiffrar måste ha bildats i en syrefattig miljö som tidvis var grund. De växellagrade skiffrarna och sandiga sedimenten innehåller nämligen välbevarade böljeslagsmärken och korsskiktning.

För oss paleontologer är dessa lager speciellt viktiga eftersom de kambroordoviciska alunskiffrarna i Sverige även innehåller unikt välbevarade fossil med mjukdelar och den så kallade orstensfaunan är en viktig "Lagerstätte" (från tyskans ord för lagerplats, dvs. en exceptionellt välbevarad geologisk avlagring) som ger en av de viktigaste insikterna i hur det tidigaste djurlivet såg ut. De nya rönen ger nu en helt ny bild av hur dessa egendomliga och ekonomiskt och paleontologiskt viktiga avlagringar en gång bildades.

Ikait–glendonit

Den tidigordoviciska alunskiffern i Ryssland och Estland innehåller stora mängder kristallkolor i form av stängliga orstenar som ursprungligen bestått av ikait – ett vatteninnehållande kalciumkarbonatmineral ($\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) som bildas i vatten nära fryspunkten. Ikait har fått sitt namn efter förekomsten i den kalla Ikafjorden på Grönland (se artikel i Geologiskt forum nr 100) men är instabilt. Det ersätts vanligen av kalcit, och kallas då glendonit, som är en så kallad pseudomorf av ikait.

Geologiska glendonitförekomster har tidigare beskrivits från proterozoikum, och dyker sedan upp igen först under perm – de nya baltiska tidigordoviciska förekomsterna är de första från denna mystiska tidslucka som innefattar större delen av paleozoikum. Våra kol- och syreisotopanalyser överensstämmer med isotopdata härrörande från andra glendoniter.

Tidigordovicisk glendonitiska kristallkolor – stänglig orsten

Den stängliga glendonitiska orstenen ligger som svarta kalklinser, inbäddade i de tidigordoviciska alunskiffrarna i Baltikum. Dessa så kallade antrakoniter (på engelska anthraconites, efter den kolsvarta färgen), har varit kända i mer än 150 år, och vi kan nu dokumentera dessa från totalt 24 lokaler i de tidigordoviciska alunskiffrarna (Türisalu och Koporiyeformationerna, samt Orasojaledet i Kallave reformationen) som är blottade längs 600 km av den baltiska klinten.

OM PROJEKTET

Forskningen inom detta internationella projekt inkluderar ett stort antal forskare från Sverige, Spanien, Tyskland, Estland, Iran och Kina. Vårt arbete stöds av flera nationella forskningsråd inklusive stöd till författaren från Vetenskapsrådet. I fältarbetet under 2017 i Estland, som denna artikel handlar om, deltog Leonid Popov (National Museum of Wales, Cardiff), Heikki Bauert (Estlands geologiska undersökning), Zhifei Zhang och Zhiliang Zhang (Northwest University, Xi'an, Kina) samt Mansoureh Ghobadi Pour (Gorgan University, Kina).



1 cm



Dessa avlagringar avsattes i ett sedimentationsbäcken på kontinentplattan Baltica. Bäcknet utgjorde ett grunt epikontinentalhav vari svartskeffern avsattes mycket långsamt, med kanske så lite som 10 mm per 1000 år. Den extremt låga avsättningshastigheten gjorde att organiska material och spårmetaller blev kraftigt koncentrerade.

Våg- och storminducerade processer gjorde att avsättningen episodiskt avstannade, och i grundare miljöer avsattes omlagrad, korsskiktad kvartssand. Denna innehöll höga koncentrationer av fosfatrikt skalgrus av brachiopoder, som kontinuerligt omarbetades längs strandlinjerna.

Glendoniten är vanligast som enkla stjärnformade kalkitkristaller som är upp till 20 cm i diameter. Den kan även bilda rosetter och mer oregelbundet sammanväxta kristaller.

Ett mycket karaktäristiskt 15 cm tjockt glendonitlager, inbäddat i alunskiffer (Koporiyeformationen),

kan följas längs en över 3,5 km lång sträcka vid Syasfloden i Ryssland. Utfällningen av ikait kan här ha skett i gränssnittet mellan sediment och vatten, vilket markerade toppen av en kondenserad bädd.

Deformationen av skifferlagren runt glendonitkristallerna visar att dessa bildades och litifierades under tidig diagenes. Emellertid bidrog skillnaden i hårdhet mellan glendonit och omgivande skiffer till sprickbildning.

Är tidigordovicium en växthusperiod?

Beräkningar av så kallade paleotemperaturer i forntida marina miljöer baseras vanligen på isotopanalyser av marina fossila organismer med mineraliserade inre hårddelar eller yttre skal. När organismerna bildar hårddelar och skal, anrikas mer eller mindre syreisotoper, beroende av temperaturen av det omgivande havsvattnet. Därmed kan man analysera

Överst: Kristallkuler av glendonit (ursprungligen ikait) från alunskiffern i Estland.

Ovan till vänster: Den brytvärda fosforitmalm från lagren under de glendonitförande lagren består helt av fosfatiska brachiopoder. Ny brytning planeras.

Ovan till höger: Tydliga böljeslagsmärken i block av det tidigordoviciska alunskifferlagret vid Pakriudden, Estland.

mängden av syreisotopen i hårddelar och skal och sluta sig till den ungefärliga paleotemperaturen.

I vår studie gjorde vi syreisotopanalyser av hårddelar av biogen fosfat från tre konodontprover från glendonitbärande lager nära estniska Kunda. Resultaten från analyserna ger vid handen att paleotemperaturen i havet var 47–49 °C.

Dessa resultat samstämmer med liknande analyser från likåldriga lager världen över, och sammantaget hävdar



Ovan till vänster: Lars Holmer pekar på tydlig korsskiktning i de sandiga forsforitförande lagren under alunskifferlagret med glendonit (direkt ovanför huvudet), Orasoja, Estland.

Överst till höger: Ögonblick från vårt fältarbete i Estland. Här korsar Leonid Popov ett estniskt vattendrag med hjälp av Heikki Bauert. Zhiliang Zhang i bakgrunden. Foto: Lars Holmer.

Ovan till höger: Alunskifferradio. Alunskiffern är mycket användbar! Här har man byggt en radio på en estnisk strand. Radion spelar tyvärr dock bara rockmusik. Foto: Lars Holmer.

de flesta forskare att den ordoviciska perioden utmärktes av ett extremt växthusklimat, kanske med så mycket som tio gånger mer koldioxid i atmosfären, vilket resulterade i ett mycket varmare havsvatten än i dag.

Därmed innehåller de tidigordoviciska sedimenten i Baltikum uppenbarligen indikationer på ett extremt växthusklimat, samtidigt som glen-

KONODONTER

Konodonter är tandformade fosfatiska mikrofossil som kommer från en nu utdöd typ av fiskliknande djur.

doniterna tyder på botten temperaturer nära fryspunkten.

Det är ännu osäkert exakt hur vi ska tolka denna paradox. Möjligen pekar det på att det fanns andra primära kontrollmekanismer för utfällningen av ikait i dessa organiskt rika sediment. Möjligen invercade alkalinitet, pH och magnesiumcalciumförhållanden, vilket nyligen även har visats i vissa laboratorieexperiment.

Det är också möjligt att det fanns skarpa termiska stratifieringsmönster i det speciella baltiska sedimentationsbäckenet, och att sötvatteninflöde från flodsystem i de grunda miljöerna kan ha påverkat syreisotopvärdena.

Mer forskning kring dessa intressanta och ekonomiskt viktiga avlagringar krävs. Och i samband med prospektering inför den eventuella brytningen av fosforitlagren som koordineras av Heikki Bauert på den nystartade estniska geologiska undersökningen avser vi fortsätta vårt projekt! ♦

Läs mer

Popov, L.E. m.fl. 2019. Glendonite occurrences in the Tremadocian of Baltica: first Early Palaeozoic evidence of massive ikaite precipitation in temperate latitudes. Nature Scientific Reports, DOI 10.1038/s41598-019-43707-4.



Lars Holmer är professor i paleontologi vid Uppsala universitet.
lars.holmer@pal.uu.se



I denna håll ser man bitar av en basisk bergart i en massa som består av delvis granit, delvis syenit.
Foto: JL 1951.

Fältarbete förr

Då jag 1941 började arbeta för SGU var det vanligt att geologen vid fältarbetet medförde en hantlangare som bar utrustningen, grävde provgropar m.m. Självt fick jag ett sådant jobb vid karteringen på kartbladet Avesta.

TEXT OCH BILD: JAN LUNDQVIST

I REGEL VAR DET dock ynglingar från bygden som kunde tjäna en slant på det sättet, genom att arbeta som hantlangare. Senare satte byråkratiska och fackliga hinder stopp för detta och ungdomarna gick miste om en liten inkomstkälla.

Därefter blev det vanligt att geologen arbetade ensam eller, som i Norrland, två och två men gick ensamma och träffades på kvällen för gemensamt tältläger eller hemfärd.

Detta arbetssätt medförde onekliga vissa risker, men trots det känner jag bara till en enda dödsolycka – med undantag av flygolyckor och andra olyckor med fordon. Den olyckan, då en man drunknade, skedde trots att han inte var ensam utan berodde på att han försökte simma över en strid och kall älv trots att närvarande kamrater försökte hindra honom.

Riskerna med ensamarbete var dock uppenbara. Jag har själv vid

ett halvdussin tillfällen varit mycket nära att förolyckas. Ett exempel kan illustrera detta.

Under fältarbete kring Kiruna 1951 gjorde jag helt ensam en veckolång tur kring Rautasälvens nedre lopp. På återvägen därifrån måste jag passera en myr, vilken på grund av pågående snösmältning var helt översvämmad. Redan genomblöt av regnandet brydde jag mig inte om att vattnet snart nådde mig till brösthöjd.

Men plötsligt slog det igen över huvudet. En av vattnet dold liten men djup bäck rann genom myren. Jag drogs ner av den tunga packningen som bl.a. innehöll 16 stuffer (ungefär 10 kilo sten).

Som framgår av berggrundskartan är berggrunden i området omväxlande (innehåller bl.a. supra-krustalbergarter från Vakköjärviszonen) och det var önskvärt att ta många prover.

FOTO: LENA LUNDQVIST



Jan Lundqvist, professor vid Stockholms universitet 1980–1993.
jan.lundqvist@geo.su.se

Nåväl, med hjälp av de annars så förhatliga videsnår som omgav bäcken kunde jag dra mig upp och undgå att förvandlas till en modern Bockstensman.

Efter att ha tagit mig i land lyckades jag göra upp ett jättebål av sur ved och nödortfikt torka utrustningen innan jag vandrade vidare de ca 8 km till den lilla byn Käyrävuopio. De vänliga människorna där eldade upp en torr bastu där allt kunde torkas, samt bjöd på trevligt nattkvarter innan jag gick vidare och från Krokviks station tog tåget hem till Kiruna.

Så här får numera inte fältarbete gå till! ♦

Andrea Håkansson ny styrelseledamot



Som för många andra var det den storskaliga geologin som fick mig att fastna för ämnet. Min morfar bodde på Island och Heimaey i början av 60-talet när Surtsey kom upp ur

havet, och hans berättelser om spektaklet när det skedde och hur de åkte ut med flygplan och tittade på fenomenet har funnits med mig sedan jag var liten. Jag har studerat arkeologi och det var under de studierna jag hittade ämnet geologi och insåg att det var geolog jag skulle bli.

Jag är uppvuxen i Karlshamn i Blekinge, men har sedan 2011 bott i Göteborg. Jag har således min kandidat- och masterexamen från Göteborgs universitet, där mitt mastersarbete fokuserade på användandet av georadar på isländska glaciärer för att kartlägga asklager, tunnlar och andra fenomen inuti glaciärerna.

Sedan ett år tillbaka arbetar jag på COWI AB i gruppen Hydrogeologi och Förorenad mark. Jag arbetar framför allt med projekt inom

berg och geofysik, och har bland annat varit inblandad i projekt som Västlänken och den nya halvön vid Masthuggskajen.

Det ska bli väldigt roligt att vara en del av styrelsearbetet i Geologiska föreningen och hoppas där kunna bidra med mina tankar och idéer. ♦

FAKTA

Ålder: 27 år

Bor: Askim, Göteborg

Familj: Sambon Niclas

Arbete: Geolog och geofysiker på COWI AB, avdelning Vatten och Miljö, Väst

Fritid: Textilt hantverk, historiskt återskapande och (så klart) att vara i naturen.

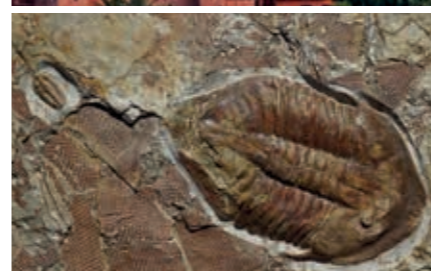
Opplev Marokkos geologi med professor Hans Arne Nakrem



Bli med på en reise som inkluderer en rekke spennende geologiske opplevelser:

- Elveavsetninger fra krittperioden med dinosaurfossiler
- Samle selv blekksprutfossiler i svart kalkstein fra silur- og devonperiodene
- Lokal produksjon av bruksgjenstander laget av dekorativ kalkstein
- Geologisk museum i Erfoud hvor vi kan se hvordan de preparerer fram spektakulære trilobitter
- En unik forekomst hvor vi kan spasere mellom prekambriske stromatolitter
- Møte en av Marokkos mest kjente meteorittsamlere
- Reiseleder: Thor Arne Hauer

15–22. OKTOBER 2020
PRIS NOK 15 980 / FLY FRA OSLO



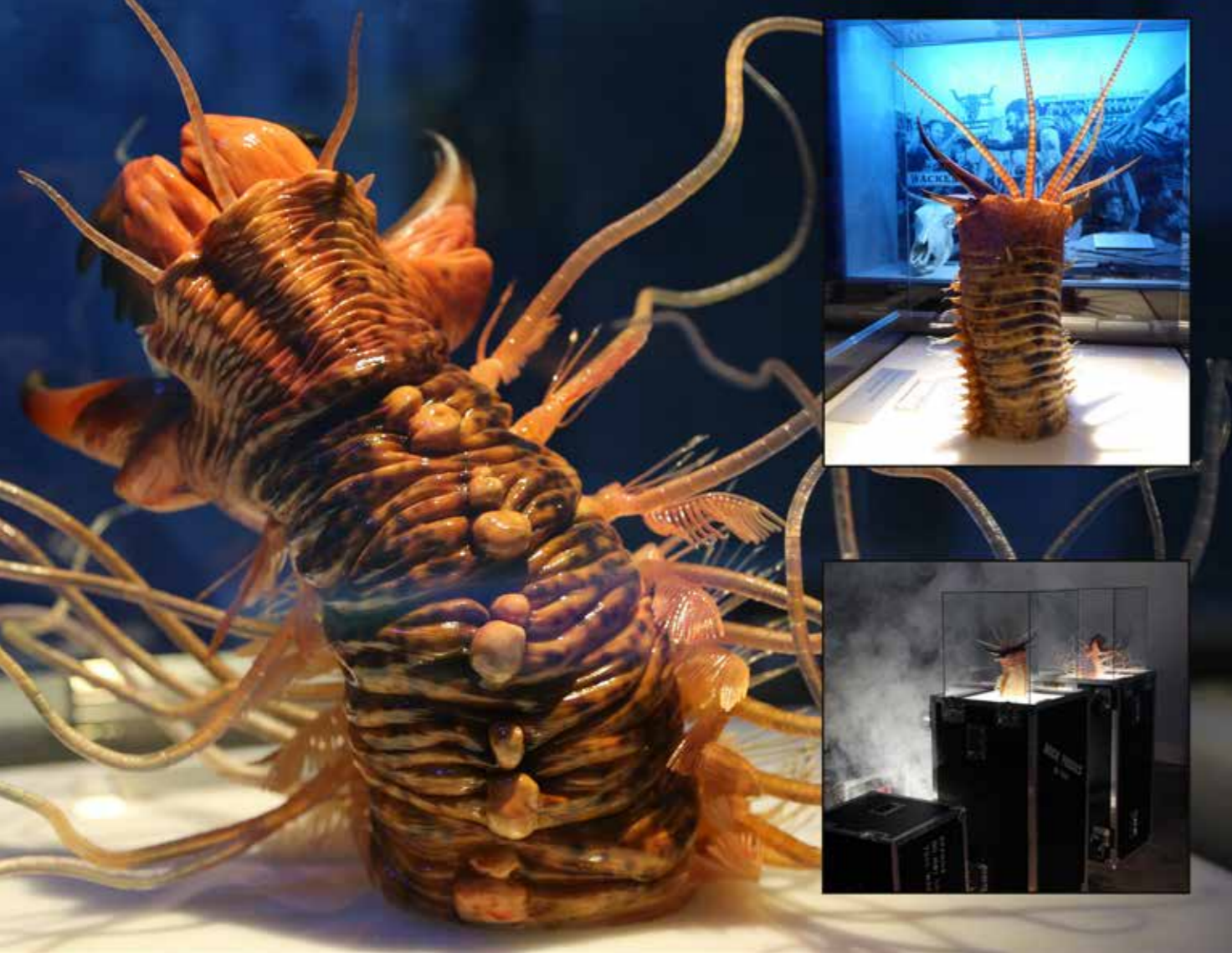


FOTO: PAUL BOSSENMAIER, MATS E. ERIKSSON OCH ESSEN HORN.

Rockfossil och fossilrock

När min före detta handledare, numera kollega och därtill gode vän, professor Mats E. Eriksson, frågade om jag kunde hjälpa till med layouten av hans nya bok så behövdes ingen längre betänketid.

LÄSTIPS

Inte för att jag saknade arbetsuppgifter eller önskade mer tid framför datorn, men efter att ha läst hans tidigare alster var det verkligen lockande att se vad Eriksson hade i görningen denna gång. På köpet fick jag dessutom läsa verket ifråga före alla andra!

Givetvis tackade jag ja till uppgiften. Lång (och lycklig) historia kort: Efter åtskilliga timmars slit med layoutdetaljer kunde vi slutligen skicka

en drygt 460 sidor tjock slutprodukt till tryckeriet och resultatet finns nu att köpa för hugade spekulanter.

Boken, som är populärvetenskapligt skriven på engelska, fick titeln *Another Primordial Day: The Paleo Metal Diaries*. Liksom flera andra alster av författaren behandlar boken den skenbart udda, men ack så naturliga, kombinationen av paleontologi och rockmusik (främst hård och något skrånig sådan) samt geologi och konstformer i allmänhet.

Bokens inbundna omslag pryds av ett fantastiskt fossilinspirerat verk av konstnären Joe Petagno, känd inom musikvärlden för att ligga bakom skivomslag till bland andra Motörhead och Pink Floyd. Hela verket genomsyras av rockig estetik, språk och symbolik.

Läsare som har någorlunda koll på musikgenren och dess subgenrer kommer snabbt att känna igen sig och hitta många mer eller mindre tydliga referenser till album, låtar, artis-

Till vänster:

Några av de många fantastiska modeller av fossil som fått namn efter rockstjärnor och som ingår i utställningen Rock Fossils.

Till höger: En trilobit i bärnsten! I boken får man reda på historien bakom detta märkliga "fossil".



FOTO: ESSEN HORN.

ter m.m. Man måste dock verkligen inte vara någon inbiten "rockskalle" för att kunna njuta av boken.

Här finns en mängd intressanta och roande texter om folk, fossil, musik och alla möjliga och omöjliga kopplingar däremellan. Därtill är den till brädden fylld med bildmaterial, genomgående i färgtryck och ofta framtaget speciellt för boken. Eriksson skriver engagerande och hans passion för ämnena som avhandlas är verkligen tydlig. Entusiasmen smittar av sig på läsaren!

Jag imponerades upprepade gånger över vidden av de kunskaper som Eriksson besitter, både inom och utom ramarna för hans forskargärning liksom gällande musik och världen i både stort och smått.

Totalt spänner huvudinnehållet i *Another Primordial Day* över arton mer eller mindre fristående kapitel, fördelade på två bokdelar.

Den första delen (*Act One: Dead stuff and deep time*) behandlar de mer vetenskapliga aspekterna av bokens teman. Läsaren får på ett hyfsat lättläst sätt en inblick i det fossila arkivet och forskningen däromkring, och får dessutom ta del av en rad nyttiga och emellanåt dråpliga historier. Även vi som tycker oss ha rimlig koll på det här med naturvetenskap får svar på ett flertal frågor vi inte ens visste att vi hade!

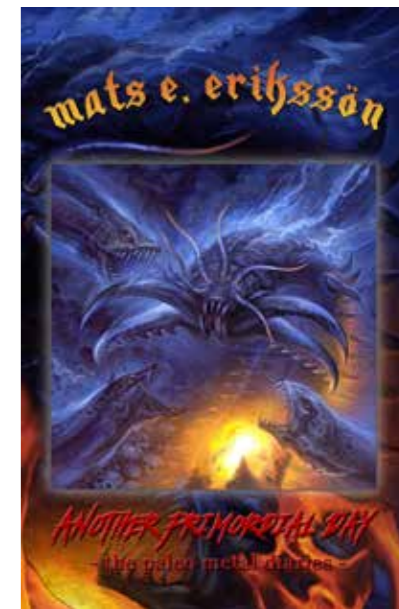
Andra delen av boken (*Act Two: Clash of worlds*) handlar om just överlappet mellan fossil och musik – rockfossil och fossilrock! Läsaren får lära känna ett flertal musikrelaterade fossil och erbjuds en inblick i hur forskare och konstnärer "väcker liv" i dessa (och andra) organismer genom vetenskapliga tolkningar, fysiska rekonstruktioner, illustrationer, musikaliska verk, etc.

Eriksson är djupt involverad i den turnerande utställningen *Rock Fossils*, som fokuserar på just fossil (vissa med Eriksson som namngivare) som fått namn efter rockmusiker och rockband. Utställningen innehåller fantastiskt fina modeller av urtida djur och flera av dessa är avbildade i *Another Primordial Day*.

Boken ger insyn "bakom scenen" under arbetet med fossilinspirerad musik och musikinspirerade fossil, och stort utrymme ges åt de människor som får magin att hända i gränslandet mellan paleontologi och olika konstformer.

Jag rekommenderar varje person med något som helst intresse för geologi eller rockmusik (eller kanske båda) att införskaffa *Another Primordial Day: The Paleo Metal Diaries*.

Boken kan beställas på webben (se qr-kod till höger), men den som vill ha ett dedikerat eller signerat



ANOTHER PRIMORDIAL DAY: THE PALEO METAL DIARIES

Författare: Mats E. Eriksson
mats.eriksson@geol.lu.se
Bokförlag: PMET Publishing House, Malmö
Utgivningsår: 2019
ISBN: 978-91-519-0456-6
Antal sidor: 462
Bandtyp: Inbunden
Beställning: <http://www.indiestry.se/sv/bocker/564-another-primordial-day.html>



exemplar är välkommen att höra av sig direkt till författaren. Boken är endast tryckt i begränsad upplaga, så skynda och köp!

P.S. Med tanke på min inblandning under produktionen av boken kan det av vissa kanske hävdas att mina åsikter är något partiska, men se på det så här: Det finns förmodligen ingen (författaren undantagen) som så ingående har läst och nagelfarit *Another Primordial Day: The Paleo Metal Diaries* som jag gjort under layoutarbetet, och jag tvekar inte en sekund att rekommendera den. D.S.



Anders Lindskog, postdoktorforskare vid Geologiska institutionen, Lunds universitet
anders.lindskog@geol.lu.se

Kiirunavaara - världens största apatitjärnmalm

Järnmalmen i berget Kiirunavaara i norra Lappland var känd redan under 1600-talet, men det var inte förrän i slutet av 1800-talet, när geologer började undersöka den närmare, som man insåg malmens fulla potential.

TEXT OCH BILD: ULF B. ANDERSSON & HENRIKKI RUTANEN

När järnvägen fått finansiering och bygget av den kommit fram till sjön Luossajärvis strand kunde utvinningen av malmen i Kiirunavaara börja kommersiellt. Själva staden Kiruna grundas av LKAB:s förste disponent, geologen Hjalmar Lundbohm, år 1900. Ett par år senare, när järnvägen nådde fjorden vid Narvik, kunde järnmalmsexporten ta fart och sedan dess har gruvan i detta berg utgjort en tung faktor i svensk industri.

Största underjordsjärnmalmgruvan

Förutom det faktum att malmen i Kiruna är världens största kända malmkropp av denna typ av malm, så hyser den nu också världens största underjordsgruva i järnmalm. Man har hittills brutit närmare 1,5 miljarder ton malm ur en malmkropp som ursprungligen innehöll åtminstone 2 miljarder ton, troligen mer.

Gruvan sträcker sig just nu ner till nivå 1570 (meter under Kiirunavaaras topp), vilket motsvarar ca 830 m under havsytan, och den har ett vägnät som omfattar minst 50 mil farbara ortar och ramper.

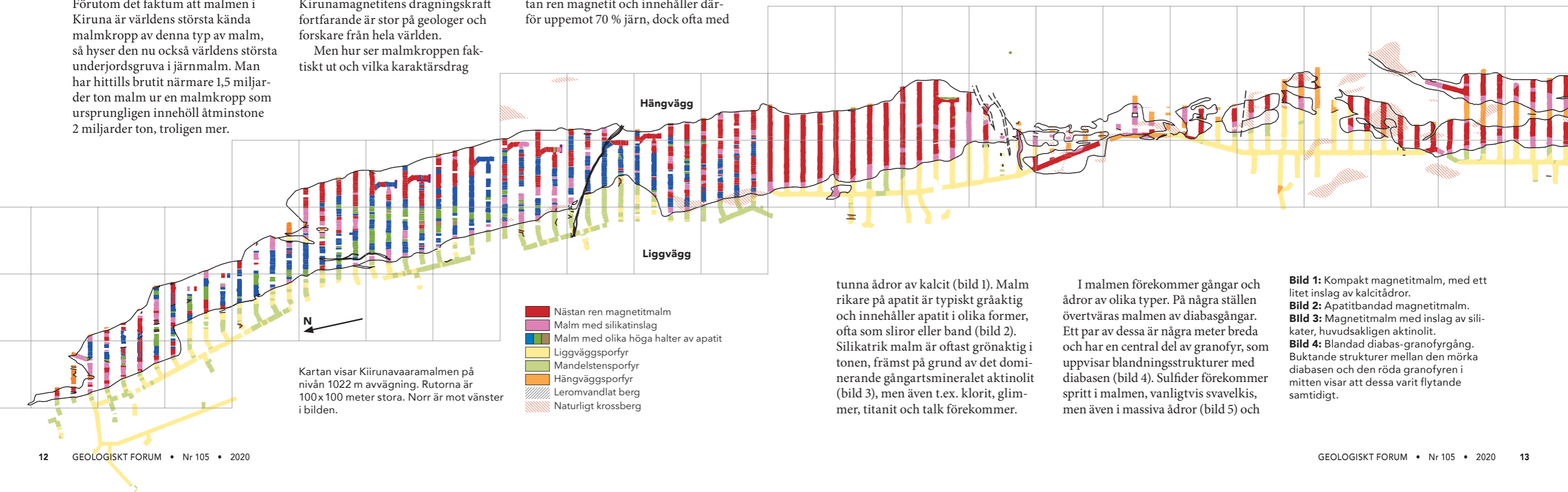
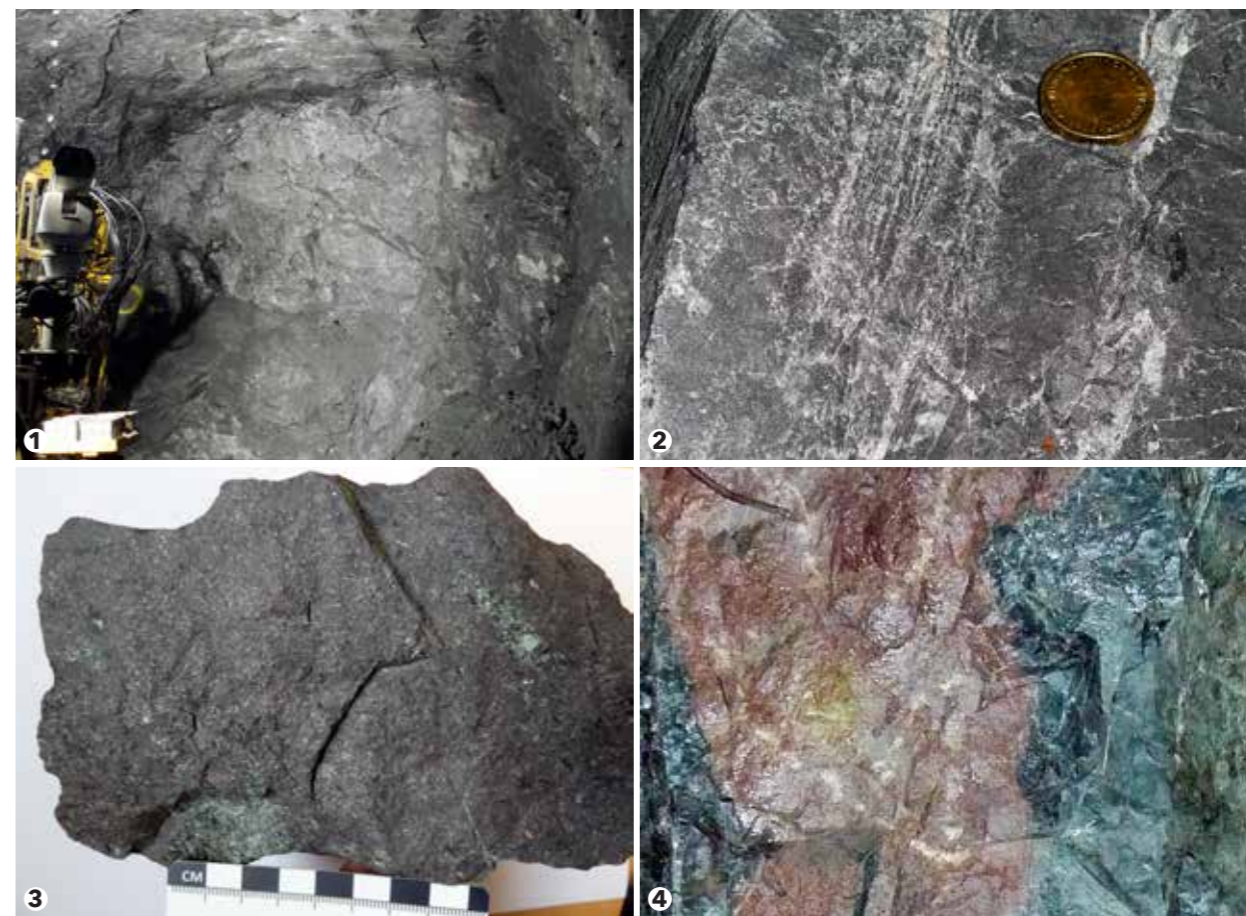
Gruvan är också världsberömd bland geologer, och förekommer i alla läroböcker i malmgeologi som typlokal för apatit-järnmalm, som också kallas Kirunatypens järnmalm. Detta beror framför allt på Per Geijers tidiga och banbrytande arbeten om dessa malmer. Att bildningen av denna järnmalmstyp fortfarande är vetenskapligt kontroversiell gör att Kirunamagnetitens dragningskraft fortfarande är stor på geologer och forskare från hela världen.

Men hur ser malmkroppen faktiskt ut och vilka karaktärsdrag

kan noteras i malmen och dess omgivningar? I de flesta beskrivningar brukar anges att malmen utgör en drygt 4 km lång skiva som är i genomsnitt 80 m bred och som stupar ungefär 60° in under Kiruna stad. Detta är en sanning med modifikation. I verkligheten är malmkroppen mycket oregelbunden och dess mäktighet varierar från 0 m till omkring 200 m.

Olika malmtyper

Själva malmen delas in i olika typer baserat på renhet, samt halter föröreningar av apatit och silikater. Den renaste, svarta malmen består av nästan ren magnetit och innehåller därför uppemot 70 % järn, dock ofta med



tunna ådror av kalcit (bild 1). Malm rikare på apatit är typiskt gråaktig och innehåller apatit i olika former, ofta som sliror eller band (bild 2). Silikatrik malm är oftast grönaktig i tonen, främst på grund av det dominerande gångartsmineralet aktinolit (bild 3), men även t.ex. klorit, glimmer, titanit och talk förekommer.

I malmen förekommer gångar och ådror av olika typer. På några ställen övertärs malmen av diabasgångar. Ett par av dessa är några meter breda och har en central del av granofyr, som uppvisar blandningsstrukturer med diabasen (bild 4). Sulfider förekommer spritt i malmen, vanligtvis svavelkis, men även i massiva ådror (bild 5) och

Bild 1: Kompakt magnetitmalm, med ett litet inslag av kalcitådror.
Bild 2: Apatitbandad magnetitmalm.
Bild 3: Magnetitmalm med inslag av silikater, huvudsakligen aktinolit.
Bild 4: Blandad diabas-granofyrgång. Buktande strukturer mellan den mörka diabasen och den röda granofyren i mitten visar att dessa varit flytande samtidigt.



Bild 5: Ådror av svavelkis i malm.
Bild 6: Karbonat-kvarts-sulfidådra i malm.
Bild 7: Anhydritdominerad ådra i liggväggsporfyr. Vit lera på sprickyta.

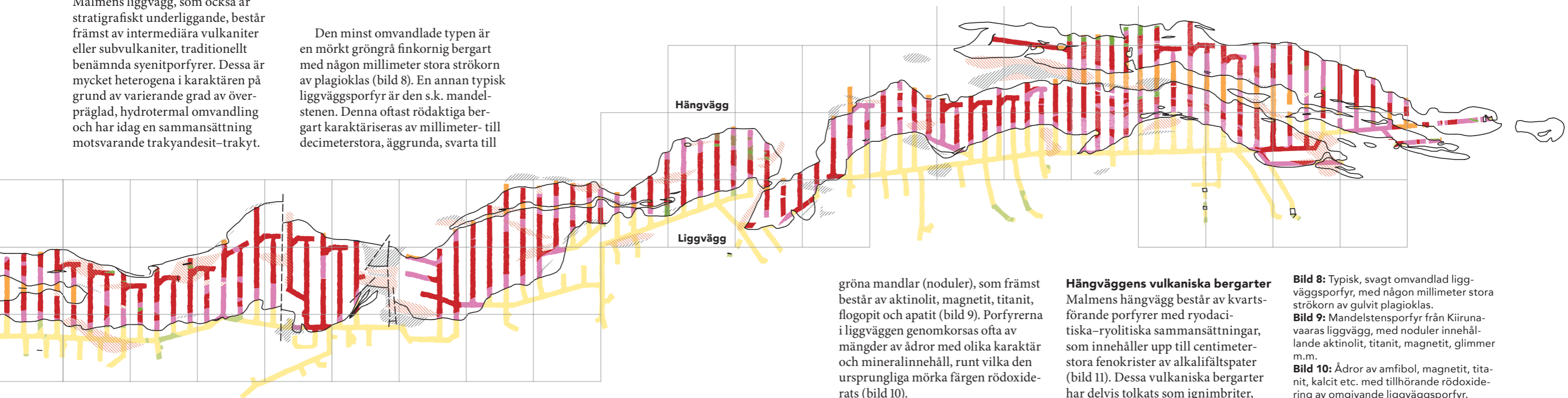
då vanligtvis tillsammans med lite kopparkis. En annan vanlig typ av ådra är kombinerade kalcit-kvarts-sulfidådror (bild 6), men även sulfater (mest anhydrit, men också lite gips) är vanliga, ofta tillsammans med kalcit och sulfider även de (bild 7).

Liggväggens bergarter

Malmens liggvägg, som också är stratigrafiskt underliggande, består främst av intermediära vulkaniter eller subvulkaniter, traditionellt benämnda syenitporfyryr. Dessa är mycket heterogena i karaktären på grund av varierande grad av överpräglad, hydrotermal omvandling och har idag en sammansättning motsvarande trakyanandesit-trakyt.



Den minst omvandlade typen är en mörkt gröngrå finkornig bergart med någon millimeter stora ströckorn av plagioklas (bild 8). En annan typisk liggväggsporfyr är den s.k. mandelstenen. Denna oftast rödaktiga bergart karaktäriseras av millimeter- till decimeterstora, äggrunda, svarta till



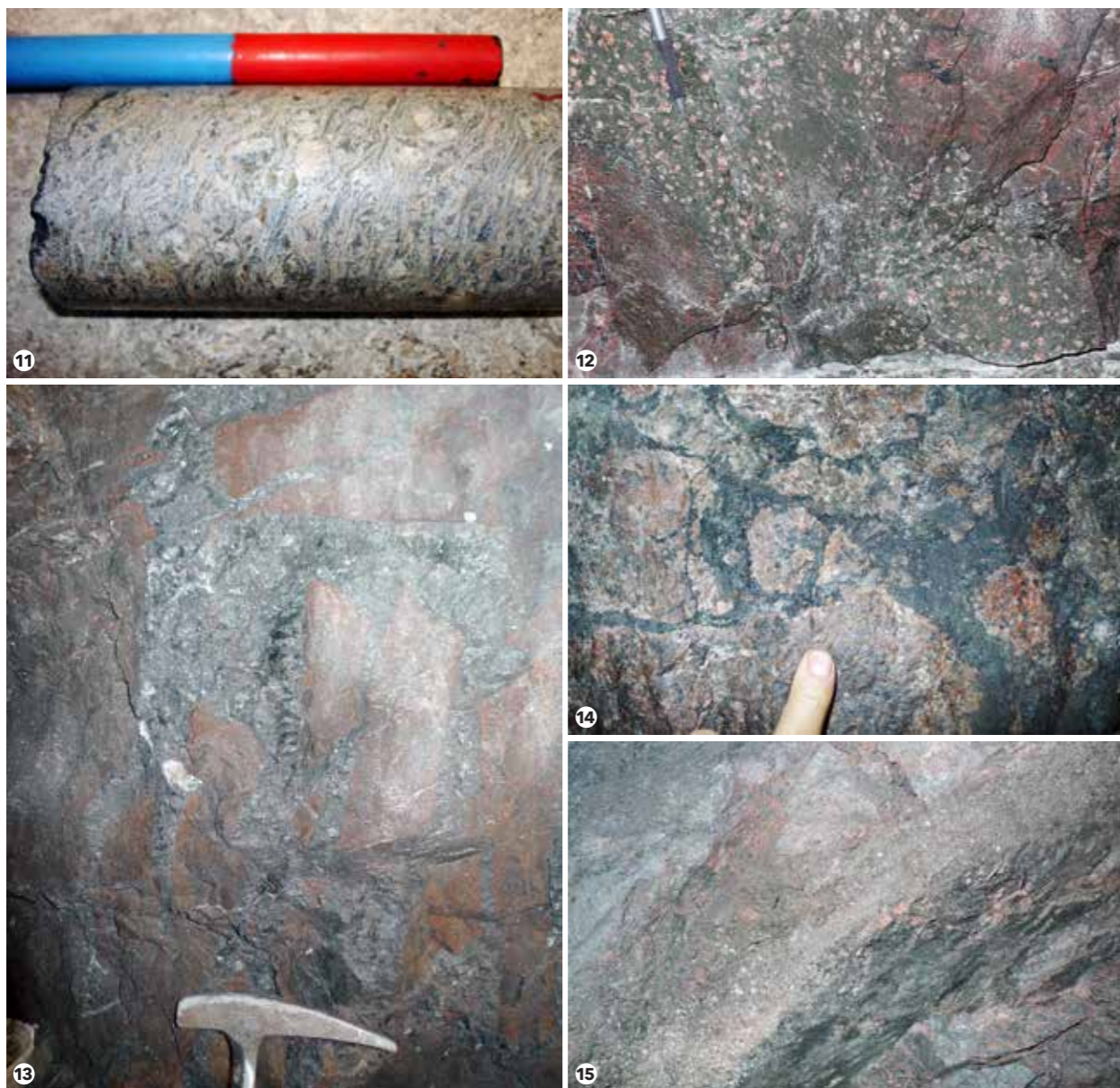
gröna mandlar (noduler), som främst består av aktinolit, magnetit, titanit, flogopit och apatit (bild 9). Porfyryerna i liggväggen genomkorsas ofta av mängder av ådror med olika karaktär och mineralinnehåll, runt vilka den ursprungliga mörka färgen rödoxiderats (bild 10).

Hängväggens vulkaniska bergarter
Malmens hängvägg består av kvartsförande porfyryr med ryodacitiska-ryolitiska sammansättningar, som innehåller upp till centimeterstora fenokristar av alkalifältspater (bild 11). Dessa vulkaniska bergarter har delvis tolkats som ignimbriter,

Bild 8: Typisk, svagt omvandlad liggväggsporfyr, med någon millimeter stora ströckorn av gulfvit plagioklas.

Bild 9: Mandelstensporfyr från Kiiruna-vaaras liggvägg, med noduler innehållande aktinolit, titanit, magnetit, glimmer m.m.

Bild 10: Ådror av amfibol, magnetit, titanit, kalcit etc. med tillhörande rödoxidering av omgivande liggväggsporfyr.



dvs. att de har avsatts från pyroklastiska flöden.

Även dessa bergarter har påverkats av omvandling efter avsättningen, om än i något mindre omfattning än i liggväggen. Liggväggen och malmen genomkorsas av ett stort antal s.k. gångporfyryr (bild 12), bergarter som textuellt är mycket lika hängväggens vulkaniter.

Malmens gränser

Gränsen mellan malmen och berget på ömse sidor om malmen varierar. Kontaktzonen är ibland skarp, ibland komplicerad och liggvägg-

skontakten är ofta mer komplex. På båda sidor uppträder brecciering och rikligt med malmådror i sidoberget (bild 13–14), men ådrorna har ofta en otydlig åldersrelation till omgivningen. Kraftig omvandling och viss skjuvning förekommer också längs kontakten mellan malm och omgivande bergarter, t.ex. porösa, sulfidrika zoner och kraftig leromvandling (bild 15).

Dessutom, är i vissa områden hela bergmassan leromvandlad i volymer om flera tiotals meter (bild 16). Detta har drabbat både malmen och sidoberget ner till djup av mer än

Bild 11: Kvartsförande hängväggsporfyryr, med vulkaniska strukturer.

Bild 12: Gångporfyryr, som vindlar igenom omvandlad liggväggsporfyryr.

Bild 13: Magnetitådror i liggväggsporfyryr nära malmkontakten.

Bild 14: Magnetitådror i hängväggsporfyryr.

Bild 15: Lerig, sulfidrik kontaktzon mellan malm och liggvägg.

1000 m. Öppna, naturliga hålrum i berget som är flera tiotals meter stora har också påträffats i gruvan på 1000 m djup (bild 17). Dessa kan vara



Bild 16: Totalt leromvandlat berg, som fallit ut i ort (nivå 1165 meters avvägning). Bergmassan är här helt omvandlad över tiotals meter till svällande leror (smektit).

Bild 17: Större naturligt hålrum på 1022 m avvägning.

Bild 18: Ametistklätt hålrum i malm.

Bild 19: Blankslag med hämatit och kalcit i magnetitmalm. Förkastningsyta med horisontella rörelsestrieringar.

Bild 20: Kilutfall, definierat av två ortsparallella förkastningsytor (blankslag).

klädda med kristaller av t.ex. pyrit, aktinolit, apatit, och ibland ametist (bild 18).

Mer spröd än plastisk deformation

Plastisk, högtempererad deformation uppträder mycket sparsamt i Kiirunavaara, och har observerats endast i anslutning till malmens kontakter på vissa ställen.

Spröd deformation, i form av ett enormt nätverk av sprickor och förkastningar, påträffas däremot överallt i gruvan. Många sprickor är fyllda med t.ex. kalcit, sulfider, anhydrit och gips och kopplade till utsträckta hålrum, medan andra har glatta ytor (blankslag) med

strieringar, som skvallrar om att de utgör förkastningar som rört sig (bild 19).

Uppemot 100 000 sprickor och förkastningar finns dokumenterade i vår databas, men det finns naturligtvis många fler. Dessa är mycket viktiga att hålla reda på då de tillsammans med det höga trycket i berget på de djup där brytningen nu pågår kan orsaka betydande kilutfall när de samverkar (bild 20). Här är geologin mycket viktig för säkerhetsaspekterna!

Mer komplex

Sammantaget är geologin i och omkring Kiirunavaaras gigantiska magnetitkropp mer komplex än man kanske först föreställer sig och teorierna om det geologiska händelseförloppet kring dess bildande ännu inte färdiga. Till dessa teorier får vi kanske tillfälle att återkomma i ett framtida nummer.

I vårt dagliga arbete har vi dock att arbeta med de geologiska förhållanden som vi visat exempel på här och hoppas på att undersökningar visar att malmen fortsätter vidare mot än större djup.

Läs mer

Andersson, U.B. & Rutanen, H. 2016. Geological features in and around the Kiirunavaara ore body, northernmost Sweden, and some implications. International Geological Congress, Kapstaden, 2016-08-27—09-04, Paper Nr. 2989.

Geijer, P. 1910. Igneous rocks and iron ores of Kiirunavaara, Luossavaara and Tuollavaara. Scientific and Practical Researches in Lapland arranged by the Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag, Geology of the Kiruna district 2, Stockholm, 278 s.

Geijer, P. 1960. The Kiruna iron ores. I Sulphide and iron ores of Västerbotten and Lappland, northern Sweden. International Geological Congress XXI session, Guide to excursions A 27 and C 22, s. 24–38.

Ulf B. Andersson (t.h.) är docent i geologi och specialist, Henrikki Rutanen (t.v.) är gruvgeolog, båda hos LKAB i Kiruna.
ulf.b.andersson@lkab.com



FOTO: VIOLA FRIBERG.



Manteln tur och retur

Som geolog vill man ofta veta vad som finns under jordens yta och då är storskalig tektonik en process som kan göra att de djupa nivåerna av jorden exponeras. I Oman har en till största delen odeformerad sektion av oceanskorpan och översta delen av manteln skjutits upp på land och bildat Semail-ofioliten. Oman har allt som en geolog kan önska sig: spektakulära blottningar, bra infrastruktur, en trevlig befolkning och öl. Det är inte bara öken.

TEXT OCH BILD: ERIK STURKELL

SKULLE MANTELBERGARTER kunna vara lösningen för lagring av koldioxid? Jo, det finns en stor potential, då geologin och kemin är under kontroll. Bara i Oman finns det kapacitet för att lagra 4 miljarder ton koldioxid, vilket motsvarar 10 procent av dagens mänskliga årsproduktion av koldioxid.

Peter Kelemen har varit aktiv inom forskning som handlar om koldioxid-

lagring i mera än tio år, och han har lagt mer än trettio års forskning på Semail-ofioliten i Oman. I samband med att det internationella kontinentborrningsprojektet ICDP (International Continental Drilling Project) i början av mars 2019 förlade sitt årliga möte för expertgruppen till Muscat i Oman, hade vi Peter Kelemen som guide på en exkursion i ofioliten. Han

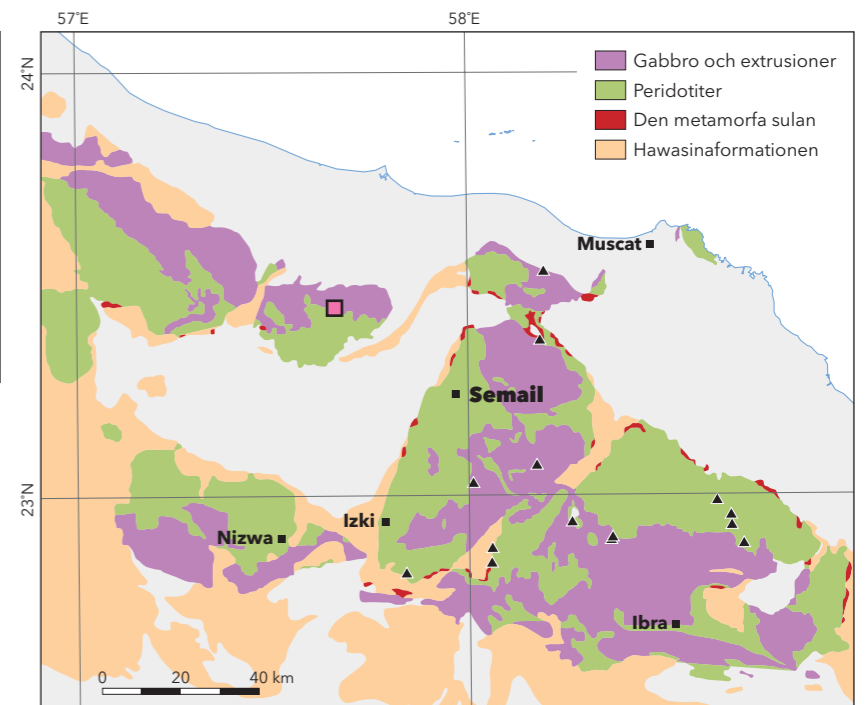
visade sig vara en av de bästa geologiska guider man kan få tag på som kan förklara vad som sker vid serpentinisation av peridotit och bildning av karbonater i dessa.

Peter Kelemen är verksam vid Lamont-Doherty Earth Observatory på Columbiauniversitetet i New York, och mycket av informationen till den här texten är hämtad från en



Till vänster: Berget i bilden kallas av geologer "5 o'clock Moho" då man kan se Mohorovičićgränsen (Moho) nära bergets topp.

Till höger och ovan: Karta visar den södra delen av Semail-ofioliten, med de besökta lokalerna markerade med svarta trianglar. Den rosa fyrkanten visar platsen för Mohorovičićdiskontinuiteten i wadin Al Abyad. Kartan bygger på en förlaga av Nicolas m.fl. (2000).



fältguide skriven av honom. Information om Omans geologi kommer från guideboken *Field Guide to the Geology of Northeastern Oman* av Hoffmann m.fl. Men först något om den fantastiska geologin som finns att se i Oman, här endast inriktad på mantelbergarter.

En halvmil borrhål

Peter var en del av gruppen som genomförde de djupborrningar i Oman som stöttats av ICDP. I det borrhoprojektet, som avslutades 2017, borrades nio hål med ett totalt djup av 5,4 km, varav 3,2 km var borrhärnor.

Själva exkursionen fokuserade på den södra delen av Semail-ofioliten och dess bergarter. Särskilt intresse lades på vad cirkulerande fluider kan göra med peridotiten, både de fluider som cirkulerade under den tid då ofioliten sköts upp på kontinentkanten och de lågtemperaturfluider som serpentiniserar peridotiten idag. De senare bildar alkalina källor och det vatten som kommer ut reagerar med atmosfären så att avlagringar av travertin bildas.

I Al Hajarbergen i Oman finns troligen den bäst exponerade oceanskorpan i världen. Bergskedjan sak-

nar till största delen växlighet och är en öken, förutom nere i dalarna där alkaliskt källvatten sipprar fram. I dalarna finns också uttorkade flodbäddar som under monsunregnen blir vattenfyllda.

Semail-ofioliten är den största sammanhängande kroppen av oceanskorpa och bergarter från övre manteln. Den spänner över en sträcka av 500 km och är 50–100 km bred. Ofioliten representerar ett 15–20 km tjockt snitt genom skorpan och manteln med Mohorovičić-diskontinuiteten (Moho) inkluderad.

Ofiolitens bergarter

En ofiolit definieras som en del av oceanisk litosfär som har skjutits upp på land. Den består av många olika bergarter som oftast uppträder i en bestämd ordning. Längst ner i sekvensen finns vanligtvis peridotit, som ursprungligen utgjort en del av den övre manteln. Peridotiten har genom absorption av vatten till olika grad omvandlats till serpentinit.

Därefter följer Mohorovičić-diskontinuiteten som separerar manteln från skorpan. Ovanför Moho tar de lagrade gabborna vid och dessa har en tjocklek av 3–6 km. Överst i kom-

EXPERTGRUPPEN INOM ICDP

Organisationen för det internationella kontinentalborrningsprojektet (ICDP) har en expertgrupp (Scientific Advisory Group, SAG) som ska bedöma och ranka ansökningar. Gruppen går igenom fullständiga borrhansökningar, mötesansökningar (workshops) och preliminära projektsökningar.

Mandatperioden för att sitta med i expertgruppen är fyra år. Expertgruppen delar inte ut pengar utan rekommenderar vilka ansökningar som bör få stöd. Besluten fattas sedan av ICDP-kommittén under deras möte i början av juni.

Ansökningar för borrhoprojekt får vanligtvis endast en del av den totala kostnaden beviljad, medan de mötesansökningar som tillstyrks får den sökta summan.

Varje år delas omkring fyra miljoner dollar ut. Hittills har två svenska djupborrningsprojekt fått stöd från ICDP. Det som kommit längst är Åre-Järpenprojektet Collisional Orogeny in the Scandinavian Caledonides (COSC) där det första hålet är borrarat. Se Geologiskt forum 94, 2017.

Nyligen har en föreslagen borrhoring på postglaciala förkastningar i nordligaste Norrland fått stöd från ICDP. Borrhoringen inom projektet Drilling Active Faults in Northern Europe (DAFNE) har dock ännu inte kommit igång.



plexet av lagrad gabbro kan fickor av surare material, plagiograniter, finnas. Dessa kan ha bildats genom differentiering i långa, horisontella gabbrogångar där spetsen av gången kan bestå av bergarter med en högre kiselhalt.

Peridotiten i manteln består till största delen av lherzolit. Om trycket minskar sker en deluppsmältning av lherzoliten och vid denna process bildas basalt då diopsid (en klinopyroxen) i lherzoliten smälter. Detta ändrar sammansättningen av peridotiten och lherzolit övergår i harzburgit som till största delen består av olivin och enstatit (en ortopyroxen). Lherzolit, dunit, harzburgit och wehrilit är alltså olika typer av peridotit. Se också triangeldiagrammet här intill.

Uppbrott under perm och kollision under krita

Bergarterna som bygger upp Semail-ofioliten bildades under senare hälften av krita, då ny litosfär uppstod genom spridning i mitten av oceanen Neotethys. Denna ocean började bildas då kontinenten Gondwana bröts upp under den senare delen av perm.



Ovan till vänster: Vår excellente guide Peter Kelemen vid exkursionens första lokal. Här finns ett flertal aktiva källor med alkalint vatten. Han står just ovanför källorna. Där blottas peridotiten vilken har genomströmts av magnesitgångar.

Ovan till höger: Wadi Dhuli ligger inne i peridotiten där dadelpalmer ofta växer nere vid flodbäddar. Vattnet kommer under den torra perioden från källor som har ett pH över 11.

Till vänster: Triangeldiagram som används för att illustrera mantelbergarter. Den nedre delen innehåller två olika pyroxensammansättningar, ortopyroxen och klinopyroxen. Toppen av diagrammet representeras av olivin. En peridotit ska innehålla mer än 40 procent olivin. Det grå fältet representerar sammansättningar som är typiska för övre manteln.

I samband med uppsprickningen av Gondwana avsattes också olika typer av sediment, från djuphavs-sediment i mitten av den nya oceanen till turbiditer och andra grundhavs-sediment närmare kusterna. Denna sedimentation pågick från perm till senare delen av krita och oceanbassängen kallas Hawasinabassängen. De sedimentära bergarterna som avsattes har fått namnet Hawasina-formationen efter Wadi Hawasina som ligger norr om Al Hajarbergen, där typlokalen finns.

Under mitten av krita började oceanen Neotethys sluta sig igen och den arabisk-afrikanska plattan kolliderade med den eurasiska plattan. En subduktionszon uppstod längs kanten av den arabisk-afrikanska plattan för ungefär 100 miljoner år sedan.

Överskjutningen av själva ofioliten inleddes för omkring 95 miljoner år sedan och skollorna nådde kontinentkanten för ungefär 80 miljoner år sedan. I samband med detta sköts Semail-ofioliten upp över den passiva kanten av kontinenten och

Ovan: De röda bergen av listwanit längs Wadi Mansah bildar den undre kontakten av ofioliten.

delar av den sedimentära Hawasina-formationen följde med och utgör idag ofiolitens bas. Uppskjutningen av ofioliten var avslutad vid slutet av krita. Idag finns en smal remsa av oceanskorpa från Neotethys kvar längs kusten vid Omanbukten.

I Semail-ofioliten finns en plagiogranit som visat sig vara möjlig att åldersbestämma. Den yngsta ålder som har presenterats är $95,3 \pm 0,2$ miljoner år och denna ålder representerar bland de sista magmatiska händelserna innan ofioliten upphörde att vara magmatiskt aktiv.

Omvandlingar av olika slag

I Semail-ofioliten finns ”normalt” omvandlad periodotit. Denna är endast delvis serpentiniserad och genomströmt av karbonatgångar. Men

där finns också en totalt karbonatiserad, före detta peridotit som nu är en listawanit. Listwanit är en bergart där magnesiumsilikaterna i peridotiten har omvandlats till magnesiumkarbonater och kvarts. Dock kan det finnas rester kvar av kromspinel och fuchsit (en kromglimmer).

I den metamorfa sulan eller överskjutningskontakten, där ofioliten har glidit över Hawasinaformationen, finns en upp till 500 m tjock omvandlingszon som består av listwanit. Faktum är att alla beskrivna listwaniter i Oman finns i dessa understa 500 m i ofioliten.

Karbonaten i den ”normalt” omvandlade peridotiten bildas i ett system med cirkulerande grundvatten med låg temperatur (30–60 °C). Denna omvandling pågår fortfarande.

I motsats bildades listwaniten i ett system där fluiderna hade temperaturer på omkring 200 °C. Det geotermiska system som totalt omdanat

periodotiten var verksamt i samband med själva överskjutningen.

Man tror att de koldioxidrika fluiderna uppstod genom dehydrering under den pågående metamorfosen av underliggande sediment i Hawasinaformationen och dessa fluider penetrerade in i periodotiten som blev fullständigt karbonatiserad. Listwanitens röda färg beror på närvaron av järn, som har sitt ursprung i olivin eftersom denna består både av fayalit och forsterit.

Alkalina källor och travertin

Peridotit består normalt av mer än 40 % olivin, men ifall den har utsatts för deluppsmältning så har olivin och ortopyroxen anrikats. Peridotitens sammansättning har då rört sig in i harzburgitfältet och innehåller magnesiumrika mineral såsom ortopyroxen och olivin. Tillsammans med dunit innehåller peridotiten mer än 95 % olivin, och det är magnesiumrik olivin (forsterit) som dominerar helt.

Med varierande fördelning av vatten och koldioxid som cirkulerar i peridotiten uppstår det i första hand en serpentinisering. Beroende på fördelningen mellan vatten och koldioxid kan talk bildas. Om endast koldioxid är inblandat kan kvarts bli resultatet.

Allt av det urlakade magnesiumet behövs inte för att bilda serpentinit och talk utan det blir magnesium över. Alla dessa reaktioner ger magnesit (magnesiumkarbonat) som slutprodukt. Om endast vatten finns i systemet så bildas en magnesiumhydroxid (brucit) som ett mellansteg mot slutprodukten magnesit.

I dessa omvandlingar är inte bara vatten och koldioxid aktiva utan betydligt fler ämnen, men tas inte upp nu. På land bidrar också det regn, och senare grundvatten, som passerar igenom peridotiten till serpentiniseringen. Det vatten som cirkulerar

blir mättat av magnesiumhydroxid och har ett pH som ligger över 11. När detta vatten kommer ut från berggrunden får man alkalina källor. Vatten med så högt pH löser upp tidigare utfälld travertin. Men ju längre från källan desto mer koldioxid från atmosfären tar vattnet upp och magnesit faller ut.

Ofiolit för industriell koldioxidlagring

Ett sätt att reducera koldioxid i atmosfären är att lagra koldioxiden i berggrunden. Den bästa vägen är då att binda koldioxiden i stabila mineralfaser, vilket är en mycket säkrare metod än att pumpa ner koldioxid i gamla oljereservoarer.

För detta ändamål är mafisk till ultramafisk berggrund den som fungerar bäst, eftersom den innehåller rikligt av positiva joner av kalcium, magnesium och järn.

För drygt tio år sedan inleddes på Island koldioxidlageringsprojektet CarbFix. I projektet pumpas kol-

dioxid löst i vatten ner till en nivå där temperatur och pH är gynnsam för att koldioxiden ska reagera med den basalt som utgör berggrunden. Positiva joner frigörs och fasta karbonatfaser bildas.

Detta har fungerat mycket bra och fasta karbonatfaser har bildats bara efter några få år! Det är framför allt kalcit och siderit som har fällt ut. I laboratorieförsök har man visat att det är svårare att fälla ut magnesiumkarbonater, ty här kommer vattenmolekylerna in och stör bildningen. En mer utförlig presentation av CarbFix-projektet på Island planeras till en framtida artikel.

I Semail-ofioliten har man däremot kunnat konstatera att den naturliga karbonatiseringen går snabbt. Atmosfärisk koldioxid reagerar med magnesiumhydroxiden brucit och detta "suger ut" koldioxid varvid magnesiumkarbonatet magnesit bildas. Denna naturliga process binder mellan 10 000 och 100 000 ton koldioxid bara i Semail-ofioliten.



Ovan till vänster: Alkalisk källa (diameter cirka 30 cm) där vattnet har höga halter av magnesiumhydroxid, $Mg(OH)_2$, med ett pH omkring 11,5. Detta löser upp den tidigare utfällda travertinen.

Ovan till höger: Små dammar med alkalivatten som har ett "täck" av karbonater som ligger på ytan tack vare ytspänningen.

Genom att höja temperaturen och öka det partiella koldioxidtrycket i den naturliga processen skulle man kunna höja karbonatiseringshastigheten avsevärt, kanske med mer än en miljon gånger. Man har funnit att hastigheten är som högst vid 180–200 °C. Samtidigt genereras värme vid de reaktioner som sker och detta hjälper till att öka reaktionshastigheten. Processen är till viss del självgenererande då den har kommit igång.

Om man skulle dra igång en industriell koldioxidlagering i Semail-ofioliten skulle den kunna ta emot fyra miljarder ton koldioxid per

år vilket motsvarar 10 % av dagens mänskliga produktion av koldioxid.

Projektet med koldioxidlagering i Oman har passerat grundforskningssteget och nu är utmaningen att få fram investerare för en testanläggning. Dock är projektet för närvarande satt i viloläge då den omanska regeringen diskuterar fortsättningen. Men koldioxidlagering i Oman finns fortfarande på kartan. Borrningarna som gjordes var framför allt inriktade på forskning och har därför inte varit avgörande för att attrahera investerare i projektet.

Närkontakt av tredje graden med Moho

Om man endast har begränsad tid och bara måste se Mohorovičić-diskontinuiteten, är troligen lokalen som finns i wadi Al Abyad (N 23°26'47" Ö 57°39'35") det bästa valet. Den betraktas som en av de bästa Moho-blottningsarna i världen och den ligger endast en timmes bilresa från Muscats stadsgräns.

Här kan man se en tydlig gräns mellan mantelperidotit och den lagrade gabbro i skorpan. Vid denna lokal kan man med lätthet lägga handen på Moho. Här finns också kumulat, kromitgångar, en blandning av peridotit och gabbro och wehrlitgångar. ♦

Läs mer

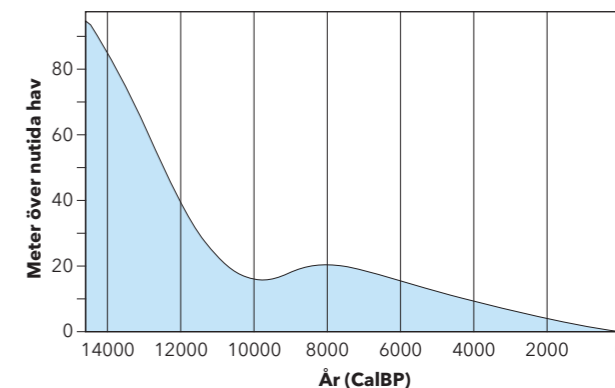
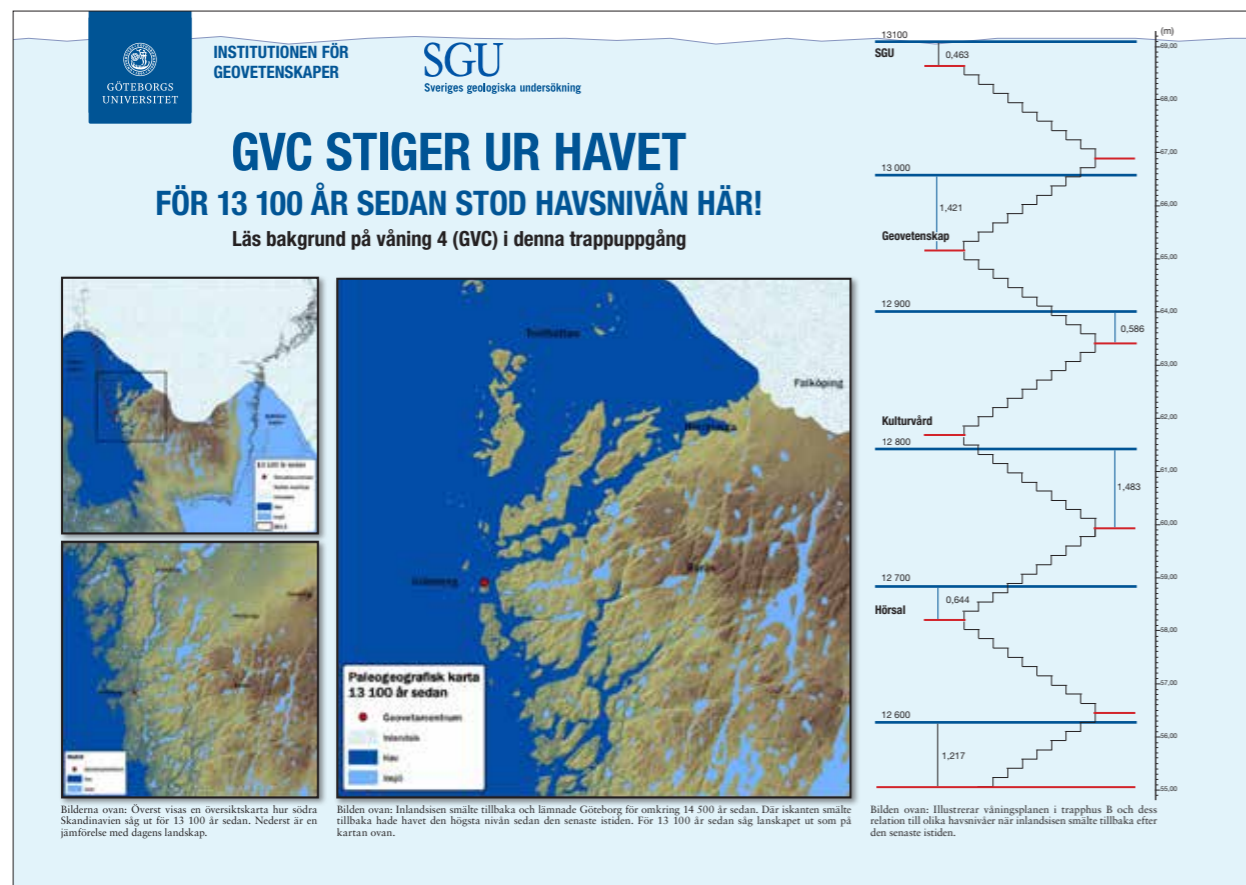
Hoffmann, G., Meschede, M., Zacke, A., & Al Kindi, M., 2016. *Field Guide to the Geology of Northeastern Oman*, Borntraeger Science Publisher, 283 s.
Kelemen, P.B. & Matter, J. 2008. In situ carbonation of peridotite for CO₂ storage, PNAS 105(45), 17295–17300.



Erik Sturkell är professor vid Göteborgs universitet.
e-post: erik.sturkell@gvc.gu.se

Peridotitmassiv nära Muskats gamla stadskärna. De mörkbruna delarna är harzburgit och de ljusbruna delarna är dunit.





Motstående sida: Ett exempel på en av de informationstavlor som visar hur landet såg ut vid olika tidpunkter och som sitter i trapphus B på Geovetarcentrum.

Till vänster: Erik Sturkell (bilden) och Martin Persson var de som kom på idén att i trapphuset visa hur havsnivån varierat. Här står Erik vid havsnivån för 13 000 år sedan. Lite längre upp ser man strecket där havet var för 13 100 år sedan.

Ovan: Strandförskjutningskurva från Göteborgsområdet modifierad från SGU:s kartgenerator. Den visar hur havsnivån har varierat till följd av variationen mellan vattenmängden i havet och landhöjningen.

Strandförskjutning i trapphus B, Geovetarcentrum, Göteborg

Ett lysande försök att åskådliggöra strandförskjutning och hur havets nivå har förändrats sedan senaste istiden har gjorts på Geovetarcentrum i Göteborg. I trapphuset kan man nu ta på var havsnivån låg den första tiden efter att isen lämnat området. Passa på att kolla om du besöker Göteborg!

TEXT: MARK JOHNSON

Efter att inlandsisen dragit sig tillbaka var stora delar av Sverige täckt av vatten. Våra kända varviga leror längs Östersjökusten och den känsliga marina kvickleran vid Kattegatt på västkusten är direkta bevis för att en stor del av Sverige låg under högsta kustlinjen (HK) direkt efter istiden.

Högsta kustlinjen representerar den högsta nivå på land i dag som täckts av hav (eller en sjö i Östersjöbassängen) efter glaciationen. Allt land nedanför HK låg under vatten direkt efter att isen smält bort.

Det kan tyckas lite märkligt att strandlinjen var mycket högre efter istiden eftersom vi vet att mycket vatten var bun-

det i isen och att havsnivån faktiskt var 120 m lägre. Men det beror på isostatisk sänkning av landytan på grund av den stora ismassans tyngd som gjorde att landytan trycktes ned.

Under deglaciationen var alltså havsnivån lägre än idag, men jordskorpans nivå var ännu lägre. I slutet av istiden steg vattennivån igen, men det gjorde också jordskorpan. Det kan ibland vara svårt för en student att begripa att samtidigt som havsnivån steg så sjönk den relativa strandlinjen tack vare att landhöjningen var snabbare.

På Geovetarcentrum i Göteborg har man försökt åskådliggöra strandförskjutningen i ett av husets trapphallar.

Upphovsmännen är Erik Sturkell och Martin Persson på Institutionen för geovetenskaper. De har tillsammans med Christian Öhrling och Tore Pässe på Sveriges geologiska undersökning räknat ut på vilken höjd i trapphus B som havsnivån hade för olika år efter isavsmältningen.

Sveriges geologiska undersöknings kontor på femte våningen skulle ha höjts ur havet för 13 100 år sedan. Då låg iskanten ungefär vid Skara och Linköping. Men det dröjde ytterligare 500 år tills hela hörsalen på entréplanet hade stigit upp ur havet.

På varje våning finns en informationstavla som visar havets nivå, hur landet såg ut just vid denna tidpunkt (dvs. paleogeografen) och var inlandsisens kant låg.

Men högsta kustlinjen ligger helt och hållet ovanför Geovetarcentrum. Erik har därför föreslagit att vi ska övertala ägaren av grannhuset, som är lite högre, att måla en blå linje på utsidan av huset för att markera på vilken nivå högsta kustlinjen låg. Om vi lyckas med detta kommer vi att rapportera om det här i tidningen.

Nivån för HK varierar över Sverige på grund av att isens tjocklek, och därigenom tyngden, varierade. Landet trycktes därigenom ned olika mycket på olika platser och har också följaktligen lyfts upp olika mycket. Landhöjningen idag är som störst runt Örnsköldsvik och som lägst i sydligaste Sverige.

Men HK varierar också på grund av att havsnivån stigit med olika hastighet och att nivåerna på isdämda sjöar

i Östersjöbassängen varierat. Dessutom har läget av HK påverkats av den exakta tiden då ett område avtäcktes av isen. Det här är en underbart komplex historia som kvar-tärgeologer och naturgeografer ägnat sig åt under mer än ett sekel.

Runt Göteborg sjönk den relativa strandnivån ganska snabbt direkt efter deglaciationen, men steg sedan under en period varefter den sedan fortsatte att sjunka fram till idag. Landhöjningen och havsnivåökningen tävlade alltså med varandra. Det var bara under den så kallades tapes-transgressionen (för mellan 9500 och 8000 år sedan) som havet steg snabbare än landet.

Med de klimatförändringar som sker idag kan man räkna med att havsnivåns höjning, som idag ligger på strax under 1 mm per år, kommer att matchas på ett ungefär av landhöjningen, som ligger på ungefär 1 mm per år, i Göteborgstrakten.

Så när ni nästa gång besöker Geovetarcentrum i Göteborg, undvik då hissen och ta trappan i hus B och upplev strandförskjutningen! ♦



Mark Johnson är universitetslektor vid Institutionen för geovetenskaper på Göteborgs universitet.
mark@gvc.gu.se



FOTO OCH ILLUSTRATION: HENRIK DRAKE.

Spår av uråldrigt mikrobiellt liv djupt ner i Siljansringen

En ny studie visar att metangas har bildats av mikroorganismer djupt ner i den mäktiga meteoritkratern vid Siljan i Dalarna under minst 80 miljoner år. Studien visar också att den uppspruckna berggrunden i meteoritkratrar är en optimal miljö för kolonisering av mikroorganismer.

TEXT OCH BILD: HENRIK DRAKE

DEN MÄKTIGA SILJANSRINGEN i Dalarna är Europas största kända meteoritnedslagsplats. Många minns säkert de storslagna men slutligen fiaskoartade försöken att leta djupgas här under 1980- och 1990-talen. I skrivande stund pågår prospek-

tering efter gas återigen i området. Samtidigt pågår statliga utredningar om att förbjuda utvinning av olja och gas helt och hållet i Sverige, men det är en annan historia.

Att gas pyser ut ur den gamla nedslagsstrukturen har varit känt länge,

t.ex. finns förhöjda gaskoncentrationer i privata dricksvattenbrunnar i området. Frågor som fortfarande är obesvarade är om det finns större ackumulationer av naturgas i Siljankratern, vilket ursprung gasen har, och hur länge gas bildats eller ansamlats här.

— Spröd till plastisk deformationszon, symboler i det sänkta blocket
— Spröd till plastisk deformationszon, ospecificerad rörelse

Yngre sedimentära bergarter

- Silurisk kalksten, lerskiffer, sandsten
- Ordovicisk kalksten, lerskiffer
- Kambrisk alunskeffer och kalksten

Postsvekokarelska bergarter

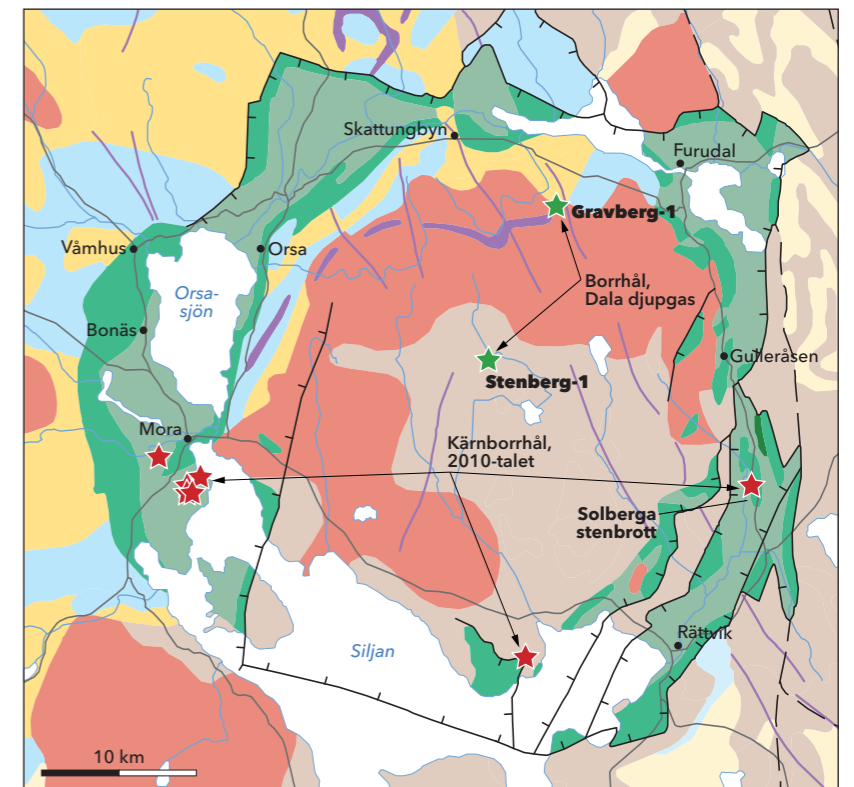
- Diabas (1,3–0,9 miljarder år)
- Sur intrusivbergart (1,7 miljarder år)
- Sedimentär bergart (1,7–1,3 miljarder år)
- Vulkanisk bergart (1,7 miljarder år)

Svekokarelska bergarter

- Intrusivbergart (ca 1,91–1,75 miljarder år)
- Sedimentär bergart, metamorf (ca 1,91–1,87 miljarder år)
- Vulkanisk bergart, metamorf (ca 1,9–1,8 miljarder år)

Till vänster: Illustration av meteoritnedslaget i Siljan.

Till höger: Förenklad karta över Siljansringen baserad på SGU:s kartdatabas i 1:1 miljon. De djupa borrhålen från Dala djupgas är utmärkt med gröna stjärnor och de nyare prospekteringsborrhålen, som nu har undersökts, med röda stjärnor.



Naturgas är en blandning av gaser, främst lätta kolväten, som domineras av metan. Själva ordet gas kan delvis vara missvisande när det handlar om kolväten på stort djup i jordskorpan eftersom förhållandena på dessa djup gör att kolvätena uppträder löst i grundvattnet och inte som fri gas.

Hur Siljansringen bildades

Själva meteoritnedslaget har med den radiometrisk $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -metoden åldersbestämts till $380,9 \pm 4,6$ miljoner år. Man har uppskattat meteoritens storlek till fem kilometer i diameter, och själva nedslagskratern till ungefär 50–60 kilometer i diameter.

En sådan kollision frigör enorma mängder energi. En tryckvåg spreds ned i berggrunden, som spräcktes upp till stort djup. I Siljansringen har den inre delen av kratern rest sig som en kupol med exponerade proterozoiska kristallina bergarter (främst granit och porfyr tillhörande det Transskandinaviska magmatiska bältet) och kring denna ligger nedfördämlade paleozoiska sedimentära bergarter i den sänka som utgör själva ringen (se kartan ovan).

Även om erosion gjort att övre delarna av kraterstrukturen är borta sedan länge kan man fortfarande se ringformationen tydligt i landskapet i form av sjöarna Siljan, Orsasjön, Skattung och Oresjön, och som bördig åkermark och rik kulturbygd i de delar som inte utgörs av sjöar. Otaliga kalkstensbrott, både nedlagda och aktiva, finns i ringformationen.

Möjliga typer av gasursprung

Under slutet av 1970-talet och 1980-talet lade astrofysikern Thomas Gold (1920–2004) fram kontroversiella teorier om djupgas av icke-organiskt, eller med ett annat ord, abiotiskt ursprung. Enligt denna teori har enorma mängder metan bildats av geologiska processer i jordens inre.

Den typ av gas som dominerar de stora gas- och olja-gasfält där kommersiell utvinning sker världen över har bildats genom nedbrytning av organiskt material vid höga temperaturer och kallas termogen gas.

Gold menade att enorma gasdepåer finns djupt ner i jordskorpan. Siljanstrukturen skulle då vara en perfekt plats att komma åt dessa

depåer då Gold menade att sprickorna som bildats i berggrunden vid meteoritnedslaget kan ha fått gasen att leta sig avsevärt närmare ytan. Detta skulle göra det möjligt att utvinna den.

Gold menade också att dessa kolväten på sin väg upp mot ytan hade fastnat under en naturlig barriär av kalcit, som skulle ha läkt sprickorna i berget. Om man bara borrade igenom den övre berggrunden och de kalcitläkta sprickorna så skulle gasen ligga och vänta därunder.

Borrningen efter gas vid Siljan

Statliga Vattenfall nappade på djupgasteorin och Dala Djupgas AB bildades där Vattenfall var delägare tillsammans med ett stort antal privatpersoner.

1986 började man borra mitt i Siljankratern. Men efter två sex kilometer djupa borrhål var fiaskot ett faktum. Där fanns ingen utvinningsbar metan i hålen.

De små mängder gas som påträffades på stort djup kan mycket väl vara av abiotiskt ursprung. Abiotisk metan är nämligen inte ovanlig på

Pincetten nyper runt en fin-kornig euhedral kristall av kalcit i en öppen spricka från 537 m djup, >100 m ned i kristallin berggrund under sedimentbergarterna. Pincetten visas som skala.



lite större djup, där den kan bildas vid t.ex. metamorfos genom serpentinisering av ultramafiska bergarter. Men fynden av gas skulle också kunna vara rester från själva borrhningen. Gasen skulle enligt vissa forskare ha kunnat bildas genom reaktion mellan smörjmedel och borrhkronan vid höga temperaturer.

Inga större fält med abiotisk gas

Globala sammanställningar visar dessutom att signifikanta utvinningsbara abiotiska gasfält i stort sett kan uteslutas. Studier på senare tid har visat att metan djupt nere i urbergets sprickor ofta har ett komplext ursprung som inkluderar mikrobiell, termogen och abiotisk bildning. Vid abiotisk bildning har gasen ofta uppstått just i samband med serpentinisering och upphettning av grafitrika bergarter. Men inga sådana bergarter har påträffats i Siljanområdet.

En djupgas från jordens inre har lanserats som i stort sett outsinlig eftersom den konstant skulle fyllas på nerifrån. Att det finns någon större förekomst av abiotisk gas återstår dock att bevisa.

Förnyade borrhningar

I början av 2000-talet återupptogs arbetet med att söka efter gas av ett annat företag (Igrene) som satsar på att borra i kraterns ringzon i stället för i mittkupolen. Prospekteringen är inriktad mot potentiella ansamlingar av gas under de 200–600 m tjocka packarna av kalksten och skiffer som avsattes under tidsperioderna ordo-

vicium och silur, och som nu finns i ringzonens topografiska sänkor.

Nya 400–700 m djupa kärnborrhål har tagit sig igenom sedimenten och ner i den uppspruckna kristallina berggrunden. En metandominerad gas har upptäckts under borrhningen, både i de sedimentära bergarterna och nere i graniten, men proverna som tagits representerar ganska långa sektioner i borrhålen.

Stora gastryck har främst påträffats i urbergets sprickor enligt bolaget och därmed har man framlagt att de sedimentära bergarterna har agerat som ett lock varunder gas från jordens inre har kunnat ansamlas. Någon detaljerad redogörelse av hur stort gasfält det rör sig om i volym är däremot inte offentliggjord.

Redan Linné beskrev olja

Förekomsten av olja i Siljankraterns sedimentära bergarter är känd sedan lång tid tillbaka, t.ex. vid Osmundsberg i Boda. Redan Carl von Linné beskrev olja och bergbeck som sipprade ur berget från sin resa i Dalarna 1734.

Nyare mätningar visar att den olja och bergbeck (även kallat bitumen) som idag finns utspridd i kalkstenen har ett ursprung i de organiskt rika skiffrar som finns i stratigrafin. Främst knyts dessa kolväteförekomster till Fjäcksaskiffen, från övre ordovicium. Den termiska mognaden av skiffrarna har nämligen nått initiala nivåer för oljegenerering.

Trots att den allmänna uppfattningen är att olja och metan bildas

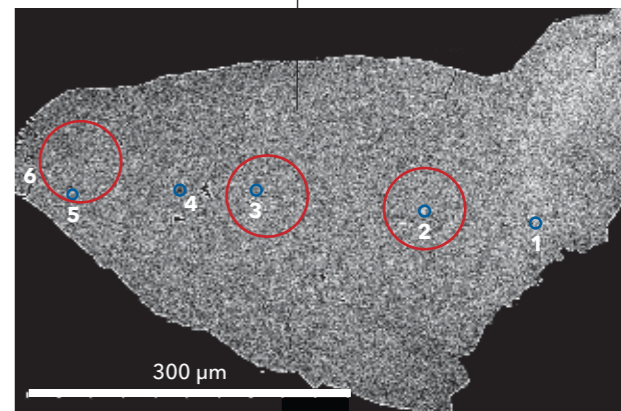
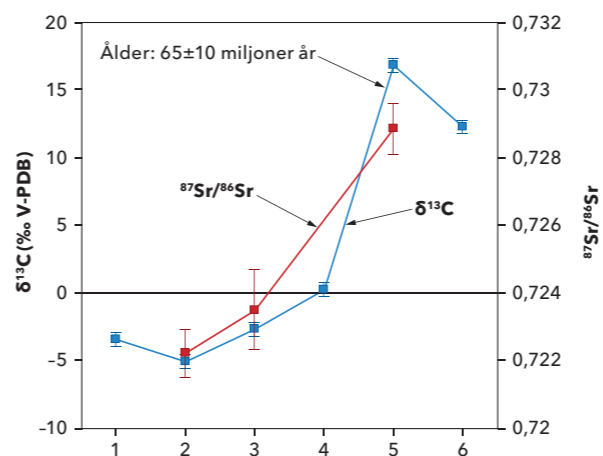
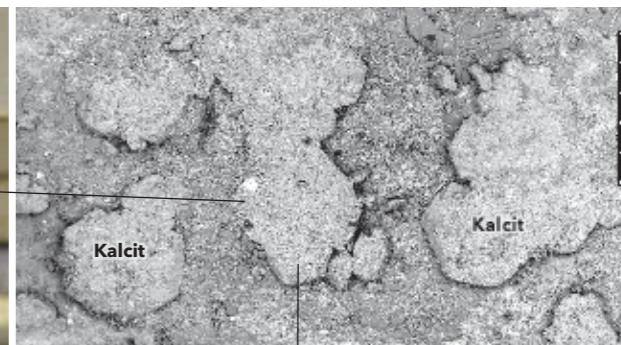
genom ofullständig nedbrytning av djur- och växtdelar i en syrefattig miljö under högt tryck och värme, har inslag av sådan termogen gas till den djupa urbergsakvifären under sedimenten i stort sett negligerats som förklaringsmodell vid prospektering vid Siljan.

Gas bildad av mikrober

Den tredje varianten av metangas bildas av mikroorganismer under ganska låga temperaturer jämfört med de andra typerna och kallas mikrobiell metangas (ibland biogas). De metanbildande mikroberna i fråga kallas metanogener och tillhör nästan uteslutande domänen arkéer, dvs. encelliga organismer som utgör en av de tre domänerna på livsträdet. De andra två domänerna är bakterier och eukaryoter.

Förekomsten av mikrobiell gas i Siljansringen har dock varit i stort sett negligerad vid prospektering. I studier som jag bedrivit på stort djup i Sveriges urberg på andra platser, och även studier från Finland, visar att spår av liv, ”biosignaturer”, av metanogener kan bevaras i mineral som fällts ut i sprickor där metanogener har levt.

När metan bildas av metanogener genom reduktion av acetat eller koldioxid föredrar de nämligen att använda den stabila kolisotopen med tolv neutroner och protoner (^{12}C) framför isotopen med tretton neutroner och protoner (^{13}C). Detta gör att produkten (dvs. metanet, CH_4) får en annorlunda isotopsammansättning jämfört med ursprungsmaterialet



som reduceras. Detta kallas inom geokemi för isotopfraktionering.

Isotopfingeravtryck visar ursprung

Vid reduktion av koldioxid är fraktioneringen större än vid acetatfermentering, och därmed är metan av denna förstnämnda typ extremt utarmat på ^{13}C jämfört med den senare, som i sin tur är mer utarmad än termogen gas, som i sin tur är mer utarmad än abiotisk gas. Man kan alltså använda fraktioneringen som ett hyfsat bra sätt för att avgöra metanets ursprung.

Även fraktioneringen av väteisotoperna ^1H och ^2H (eller D) skiljer sig ofta mellan de olika typerna av gas. Man kan kalla detta för isotopfingeravtryck, och för kolisotoperna mäter man det som en kvot ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$). Sedan normaliserar man värdet mot kvoten i en standard och använder avvikelsen från standarden, i promille, som mått ($\delta^{13}\text{C}$).

Väldigt negativa $\delta^{13}\text{C}$ -värden (från -60 ‰ och ner till -100 ‰) är en bra indikator på att metanet har mikrobiellt ursprung. När sådant ^{13}C -utar-

mat metan bildas genom reduktion av koldioxid lämnas, enligt enkel massbalansräkning, koldioxid som är rik på ^{13}C kvar. När kolet från denna koldioxid sedan inkorporeras i kalcit som faller ut i sprickor kan kalcitens starkt ^{13}C -rika isotopsammansättning ($\delta^{13}\text{C}$ +5 till +30 ‰) avslöja metanbildning av mikroorganismer.

Om man kan åldersbestämma kalciten genom radiometrisk datering kan man även visa för hur länge sedan metan bildades av mikroorganismerna, medan mätning på den gas som finns i borrhålen idag kan ge en inblick i proportionen av metan från olika källor.

Jag gick därför på jakt efter sekundär kalcit i den sprickrika berggrund som de nya borrhålen gett tillgång till. Dessutom tittade jag igenom gasdata från Siljanområdet för att se om dessa kunde ge någon klarhet i gasens ursprung och när gasen ansamlats.

Masspektrometern avslöjar

Jag tog prover av kalcit från ett stort antal sprickor i borrhålen både från de sedimentära bergarterna

Överst till vänster: En spricka i granit med kalcitkristaller på sprickytan.

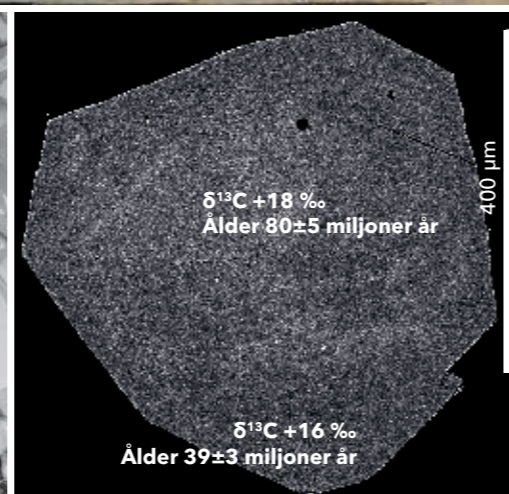
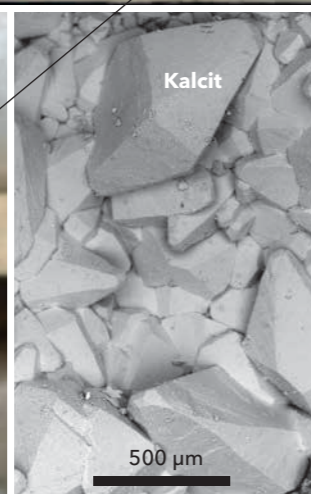
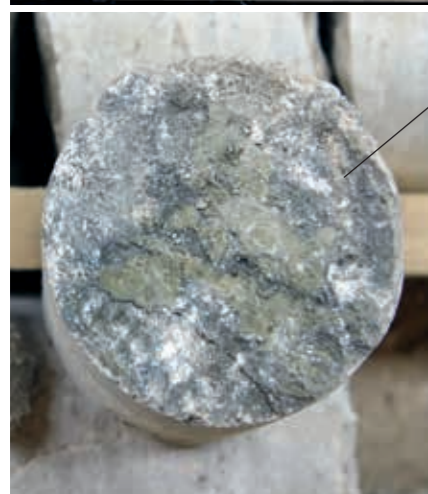
Överst till höger: Detalj av kalcitkristallerna avbildad med svepelektronmikroskop. Skalan är 500 μm .

Undre bilderna: Isotoptransekter i en av kalcitkristallerna (polerad genomskärning t.h.). U-Pb-ålder visas för den yngsta, ^{13}C -rika (metan-relaterade) och ^{87}Sr -rika tillväxtzonen i kalcitkristallen.

och från den kristallina berggrunden. Provtagningen fokuserades till sprickor som borrharna noterat som gasförande.

Mineralproverna analyserades sedan med sekundärjonmasspektrometri vid NordSIM-laboratoriet vid Naturhistoriska riksmuseet, i Stockholm. Tio mikrometer stora analyspunkter sattes i transekter längs tillväxtaxeln inne i de polerade mineralkornen.

Rikligt med starkt ^{13}C -anrikad kalcit kunde detekteras, både från sprickor i den djupare granitberggrunden och i de ytligare sedimentära bergarterna. Dessa signaturer fanns ner till flera hundra meter



under kontakten mellan de sedimentära bergarterna och urberget.

Sådana isotopsignaturer kan inte härstamma från en abiotiskt bildad gas som transporterats från större djup. Isotopsignaturerna visar istället entydigt att det är mikroorganismer som bildat metan lokalt i sprickorna.

I sprickorna i de sedimentära bergarterna var isotopsignaturen ganska homogent ¹³C-rik inom kristallerna, men i granitens sprickor fanns mer än en generation av kalcit, vilket även visas av variationen i strontiumisotopsammansättning (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) i de olika tillväxtzonerna.

Den ¹³C-rika metanogenesrelaterade kalcitgenerationen var här associerad med en yttre påväxtzon i kristallerna. Genom radiometrisk U-Pb-datering av kalciterna,

genomförd vid British Geological Survey, visade det sig att de hade åldrar i spannet 20–80 miljoner år, med ett kluster kring 35–40 miljoner år, dvs. mer än 300 miljoner år efter meteoritnedslaget.

Senare bildning av metan

Metanbildningen verkar alltså vara en senare historia än nedslaget. Kalciten bildades under en period med tektonisk aktivitet i området runt Baltiska skölden. Kontinentalplattorna rörde på sig och det medförde bland annat att Nordamerika skildes från Eurasien varvid Nordatlanten började bildas och Alperna bildades i söder.

Att Baltiska skölden påverkats av dessa rörelser börjar bli mer och mer känt i och med att tekniken för att

Övre bilden: Borrkärnor från kalksten i Siljansringen.

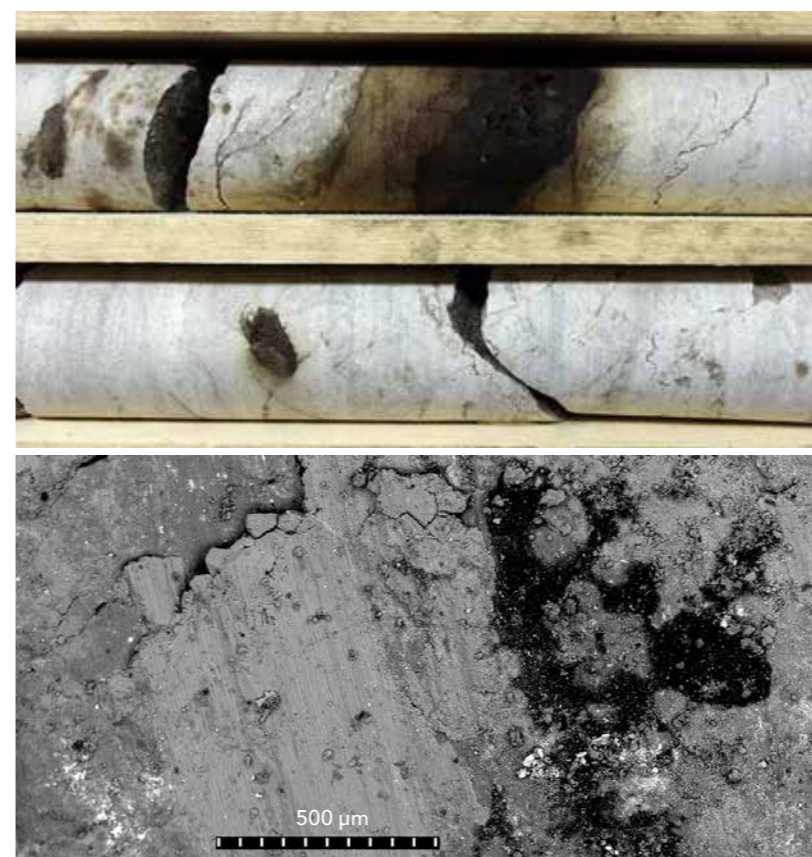
Nedre bilden till vänster: Öppen spricka i kalksten. Sekundär kalcit och pyrit täcker sprickytan.

Nedre bilden i mitten: Detalj av kalcitkristaller på sprickytan i SEM-bild.

Nedre bilden till höger: Polerad genomskärning av en kalcitkristall med isotopvärden som visar på en ¹³C-rik metanrelaterad signatur. Två U-Pb-åldrar visas, en högre ålder i kärnan och en lägre ålder i kanten av kristallen.

åldersbestämma mineral i sprickor och skjuvzoner utvecklats. Liknande åldrar finns t.ex. beskrivna från kalcit som bildats vid sprickrörelser i plattformssedimenten på Öland.

Det är troligt att dessa rörelser skakade liv också i Siljansringens underjordiska spricksystem. Sprickor



Övre bilden: Borrkärna med olja och bitumen i kalkstenssprickor.

Undre bilden: Svepelektronmikroskopbild med bitumen (svart) och kalcit i en granitspricka.

öppnades upp och tillgängliggjorde olja, biogas och bitumen från ovanliggande sediment som än idag är bevarade i kraterkanten.

Dessa sediment har ju varit utsatta för förhöjda temperaturer när de överlagrats av andra sediment och även vid själva nedslaget. Olja, bitumen och termogen gas i tidig mog-nadsfas sipprade då ut från skifferarna till omgivande berggrund. Vi hittar spår av detta långt ner i granitens sprickor där bitumen från sedimenten finns och på denna har ¹³C-rik kalcit bildats.

Processen har troligen skett i flera steg. Bitumen har först fermenterats av mikroorganismer och den vätgas som då bildas har i nästa steg använts som elektrondonator av metanogener som reducerar koldioxid till metan. Den metangas som bildats i graniten har blandats med termogen gas och biogas av sedimentärt ursprung.

Mikrober i den djupa berggrunden har vanligen inte ha så mycket energi att livnära sig på så dessa kolväten har varit ett mycket välkommet

tillskott för kolonierna av mikroorganismer långt ner i kraterstrukturen. Den tolkningen kan vi även göra baserat på de organiska molekyler som finns bevarade i kalciterna. De visar nämligen både fettsyror av mikroorganismer och tecken på biodegradering av termogena kolväten.

Troligen var förhållandena för 20–80 miljoner år sedan mer lämpade för mikrobiell kolonisation än vid tiden för nedslaget. Vid nedslaget var nämligen sedimenttäcket mycket tjockare och den geotermiska gradienten gjorde att urberget var för varmt för att mikroorganismer skulle trivas. Troligen har även urtvättning och mobilisering av kolväten från skiffern skett på grund av inflöde av sötvatten vid de senare sprickreaktiveringarna.

De metanbildande mikrobernas aktivitet har i vilket fall varit så intensiv att det lämnat avtryck i sprickornas mineralarkiv. Tidigare mikrobiell gasbildning kan inte uteslutas, men det finns inga bevis för det i mineralarkivet.

Gas bildad av mikrober

Hur är det då med själva gasen som finns i sprickorna idag? De fåtaliga analyser som finns från borrhålen visar ¹³C-urladdad metan och ¹³C-anrikad koldioxid, helt i linje med ett dominerande mikrobiellt ursprung. Det finns även lite detekterbara högre former av kolväten, bl.a. etan, propan och butan, som visar att det finns en termogen komponent eftersom mikrobiell kolvätegas nästan uteslutande är i form av metan. Samma mikrobiella signatur finns även hos metan i en dricksvattenbrunn i området.

Det finns flera tecken på att den termogena gasen har biodegraderats mikrobiellt. Det mesta faller därmed på plats. Gasen som hittas idag är främst mikrobiell, och har bildats av mikrober som livnärt sig på organiskt material, olja, bitumen och termogen gas av skifferursprung, och detta har skett under lång tid i kraterns spricksystem som sträcker sig djupt ner i det kristallina berget. Några tecken på en abiotisk gas kan dock inte urskiljas i varken gas- eller mineraldata.

Gasansamlingar av okänd volym

Därmed inte sagt att det inte finns gasackumulation. I kontakt zonen mellan sediment och granit hittas nämligen en ansamling av starkt ¹³C-fattig kalcit, just där det finns observationer av gas i flera av borrhålen. Sådan isotopsignatur hittar man vanligen i kalcit i marina sediment där metan oxiderats anaerobt i ett akvifärsgränsskikt mellan höga metanhalter och ytligare sulfatrikt vatten.

Liknande, extremt ¹³C-fattig kalcit hittade jag djupt ner i urbergets sprickor i Oskarshamn i samband med undersökningar för ett kärnbränsleförvar. När metan oxideras av mikrober bildas bikarbonat som ärver metanets ¹³C-fattiga isotopsignatur. När bikarbonaten reagerar med Ca²⁺ i vattnet faller kalcit ut, och signaturen kan spåras tillbaka hundratals miljoner år. En effektiv kolsänka för växthusgas om man så vill!

För att metan ska oxideras anaerobt behövs en process där en substans samtidigt reduceras (elektronacceptare), och vanligen är det sulfat som reduceras till sulfid av bakterier. Av denna process bildas mineralet pyrit vid reaktion med löst Fe²⁺. Sulfatreducerande bakterier och metanoxiderande arkéer hjälps alltså åt i en sådan process.

Detta förhållande kan spåras i Siljansringen i och med att pyrit med en isotopsammansättning som bara kan förklaras av bakteriell sulfatreduktion hittas tillsammans med ¹³C-fattig kalcit i sprickorna. Troligen har det funnits metanfickor av okänd storlek under sedimenten, och när sulfatrikt vatten från de marina enheterna träffat på metanet oxiderades det och sulfaten reducerades.

Astrobiologiska implikationer

Meteoritkratrar har länge intresserat forskare inom astrobiologi. Meteoritnedslag kan ha påverkat kolonisering av den karga livsmiljön djupt nere i berget eftersom den uppspruckna berggrunden ger plats för mikrobiella samhällen, och hettan ger upphov till livsviktig cirkulation av vatten och gaser. Dessutom kan meteoriter ha burit med sig aminosyror som kan ha bidragit till uppkomsten av liv.

Meteoritnedslag kan därmed stimulera kolonisering av annars livlösa planeter, och kan även ha varit en nyckelspelare för att liv en gång i tiden etablerade sig på jorden.

Meteoritnedslaget i Siljan kom till när livet redan sprudlade på jorden, men hur själva koloniseringen av mikroorganismer efter nedslaget gått till har man inte känt till tidigare. Vår nya kunskap om Siljansringen visar att detaljerade och mångfacetterade undersökningar krävs för att förstå länken mellan meteoritnedslaget och kolonisationen.

Vid Siljan kan vi se att kratern koloniserats, men att detta främst skedde när förhållandena, till exempel temperaturen, blivit mer gynnsam för mikrobiellt liv än vad som var fallet vid tiden för nedslaget. Själva kraterstrukturen, med en ring av sediment, har varit optimal för mikrobiell kolonisation genom att kolväten och organiskt material från sedimenten kunnat migrera i kraterns sprickor och agerat energikälla åt djupa mikrobkolonier.

Den nya metodiken vi presenterar har långtgående astrobiologiska konsekvenser eftersom den är optimal för att spåra uråldrig aktivitet av mikroorganismer och kan därför användas i andra kratersystem, som till exempel kratrar på Mars där man nyligen konstaterat att metan pyser ut.

NASAs rover Curiosity har vid flera tillfällen kunnat detektera metangas från Gale-kratern på Mars. En analys av metangasen som pyser ut där och studier av isotopsignaturer i kalcitmineral skulle kunna visa om metangasen bildas av mikroorganismer eller om den har något annat ursprung, och man skulle även kunna spåra urgammalt och sedan länge utdött liv genom mineralanalyser. Detta är relevant eftersom förutsättningarna för liv på Mars var bättre i planetens barndom, då den mer liknade vår planet, med ett atmosfärstryck som gav förutsättning för flytande vatten och begränsade skadlig strålning.

Metodiktest i Lockne

För att testa vår metodik på en annan krater tog vi oss an prover från den

458 miljoner år gamla Locknekratern i Jämtland. I denna krater har tidigare studier beskrivit spricksystem med kalcit- och sulfidutfällningar.

I sprickorna finns även spår av fossila mikroorganismer, och en koppling mellan meteoritnedslaget och mikrobiell kolonisation har därför legat nära till hands. Men ingen datering har bekräftat den relationen.

I vår studie av Lockne kunde vi dels belägga att sprickmineraliseringarna är 100 miljoner år yngre än nedslaget, och därmed att de fossila mikroorganismerna koloniserade kratern långt senare än man tidigare trott. Dessutom var kalciten i sprickorna ¹³C-anrikad, precis som i Siljan, och en liknande koppling mellan mikrobiell metanogenes och ytliga, men nu borteroderade skiffrar, kan därför antyd, även baserat på det kerogenlika material som finns i sprickorna.

Återigen visar det sig att detaljerade och mångfacetterade undersökningar krävs för att förstå länken mellan meteoritnedslag och mikrobiell kolonisation, speciellt i djupt eroderade spricksystem i urberget, där koppling till direkta nedslagsstrukturer inte är lika uppenbara som i ytliga sediment.

Våra fynd visar dock definitivt att den uppspruckna berggrunden i meteoritkratrar är en gynnsam miljö för djup kolonisering av mikroorganismer, i alla fall på jorden. ♦

Läs mer

Drake m.fl. 2019. Timing and origin of natural gas accumulation in the Siljan impact structure, Sweden. *Nature Communications* 10, 4736.

Tillberg m.fl. 2019. Re-Evaluating the age of deep biosphere fossils in the Lockne impact structure. *Geosciences* 9 (5).

Drake m.fl. 2015. Extreme ¹³C-depletion of carbonates formed during oxidation of biogenic methane in fractured granite. *Nature Communications* 6, 7020.



Henrik Drake är docent och forskare i miljövetenskap vid Linnéuniversitetet. henrik.drake@lnu.se

Minnesord Sven Stridsberg



FOTO: LENNART BERNIS.



FOTO: P. AHLBERG.

Vänstra bilden:

Sven vid ett av de många besöken i Duxford, England.

Högra bilden:

Sven och Gian C. Parea, Modena, under en exkursion i norra Apenninerna, Italien, 1981.

Geologen och paleontologen Sven Stridsberg, Harlösa, har avlidit efter en tids sjukdom vid 74 års ålder den 30 juli 2019. Han sörjs närmast av hustrun Marie-Anne och syskonen Lars och Britta med familjer.

SVEN FÖDDES I FAMMARP utanför Halmstad 1945 och var son till svampodlaren Harald Stridsberg och dennes hustru Astrid. I unga år flyttade han med familjen till Lockarp utanför Malmö och tog studentexamen vid Kjällängens läroverk i Malmö 1967.

Redan som barn närde Sven ett brinnande intresse för djur, natur och teknik, inte minst tåg och flygplan, och 1968 började han studera geologi vid Lunds universitet. Han blev fil. kand. 1971 och fortsatte därefter med en forskarutbildning i historisk geologi och paleontologi.

Sven disputerade 1985 med en avhandling titulerad *Functional morphology of Silurian oncocerids from Gotland* och blev docent 1991. Han innehade sedan 1972 olika befattningar vid Geologiska institutionen, först som amanuens och assistent, och från 1983 och fram till pensioneringen som universitetslektor.

Svens forskning behandlade särskilt utdöda bläckfiskar från silur (444–419 miljoner år sedan) och han publicerade en rad vetenskapliga artiklar om deras systematik, skal-

tillväxt, evolution och funktionella morfologi. Han blev med tiden en auktoritet inom detta forskningsfält och drog sig inte för att presentera sina resultat och nya tolkningar på internationella symposier.

Parallellt med forskningen bedrev Sven omfattande undervisning på olika kurser. Han trivdes med sina arbetsuppgifter och gladdes åt att vi alla hade roligt på jobbet – hans inlägg och humoristiska betraktelser, inte sällan med en kanelbulle inom räckhåll, förgyllde många av våra kaffestunder.

Sven hade naturlig fallenhet för undervisning och var en mycket skicklig föreläsare. För studenter och doktorander var han en mentor i ordets bästa betydelse och 1989 blev han belönad med studenternas pedagogiska pris för utmärkta lärarinsatser.

Han var också flitig med att producera läromedel. Av dessa märks i synnerhet *Svenska fossiler i ord och bild*, ett rikt och väl illustrerat arbete som publicerats i flera utgåvor, senast av Studentlitteratur, och använts av tusentals studenter sedan 1970-talet.

Sven var också djupt engagerad i att popularisera och föra ut geologin till en bredare publik. Genom åren var han en idog föredragshållare och arrangör av en lång rad exkursioner.

Som pensionär behöll Sven sitt intresse för geologi och paleontologi, men engagerade sig även i studiecirklar och hembygden. Han arbetade också energiskt vidare med en av sina stora passioner, nämligen flyg och dess historia. Under hela 25 år var Sven redaktör för *Svensk Flyghistorisk Tidskrift* och trots en svårartad sjukdom arbetade han oförtrutet med att bli klar med ytterligare ett nummer veckorna före sin bortgång.

Sven var alltid mycket positiv, hjälpsam och bjöd på sig själv, och det är långt fler än vi som delar Marie-Annes sorg och saknar en vän och kollega. Han efterlämnar ett stort tomrum, men samtidigt minns vi med glädje de många år vi haft förmånen att umgås och arbeta med honom. ♦

För vänner och kollegor

Per Ahlberg, Mats Eriksson, Kent Larsson och Johan Lindgren

Assar Haddings pris till Stefan Bengtson

Det prestigefyllda Assar Haddings pris för år 2019 har tilldelats professor emeritus Stefan Bengtson, Stockholm. Priset delades ut första gången 1959 och har därefter delats ut vart tredje år av Kungliga Fysiografiska Sällskapet i Lund till person som ”inom det geologiska forskningsområdet gjort sig särskilt förtjänt därav”. Prissumman för 2019 uppgick till 350 000 kronor.

Professor Bengtson tilldelas priset för sin banbrytande forskning om såväl djurrikets tidiga utveckling som den evolutionära övergången från en exklusivt mikrobiell biosfär till en som utöver mikrober karaktäriseras av större varelser som djur, växter och svampar.

Stefan Bengtson blev filosofie doktor 1977 vid Uppsala universitet och var från 2007 och fram till sin pensionering 2014 enhetschef och professor i paleozoologi vid Naturhistoriska riksmuseet i Stockholm där han verkat sedan 1995. Han har under 50 år arbetat med att analysera tidiga djurfossil från kambrium för att klarlägga deras uppbyggnad och utveckling. Många av dessa djur utvecklades under den ”kambriska explosionen” som för en halv miljard år sedan hade producerat en biosfär som i mångt och mycket

var lik den vi ser idag, även om landytan ännu inte hade koloniserats. Han har även beskrivit ett avsevärt antal nya arter och släkten av fossila organismer med användning av en välgrundad taxonomi.

För att belysa olika fossils uppbyggnad och släktskap har Stefan utnyttjat nya analys- och avbildningsmetoder. Genom att utföra mikrotomografi på mycket små fossil har han sålunda kunnat påvisa detaljer mindre än en tusendels millimeter och därefter undersöka tredimensionella digitala objekt med kraftfulla datorer. Detta har bland annat resulterat i upptäckten av embryolikhande fossil, som eventuellt är föregångare till djuren, i omkring 600–500 miljoner år gamla lagerföljder från senprekambrium och kambrium.

Tillsammans med geokemister och sedimentologer har Stefan Bengtson också belyst den proterozoiska biosfärens utveckling, och hans forskning har i hög grad bidragit till ny och ökad förståelse av hur biosfären utvecklades från att vara mikrobdominerad till den divers och mångskiftande biosfär vi ser idag. Samarbetet med forskare runt om i världen har varit omfattande och han har publicerat närmare 200



Stefan Bengtson vid prisceremonin på Grand Hotel i Lund. Foto: Per Ahlberg.

vetenskapliga artiklar och monografier, många av dem i internationellt ledande tidskrifter. ♦

Per Ahlberg, Helena Alexanderson och Raimund Muscheler. Geologiska institutionen, Lunds universitet

Nytt borrhprojekt ska undersöka postglaciala förkastningar

Hur och när bildades postglaciala förkastningar? Hur har bergarterna i och vid förkastningarna påverkats strukturellt och mineralogiskt? Vilka är de hydrogeologiska och hydrauliska egenskaperna hos förkastningarna?

Dessa är bara några av de frågor som ett nytt borrhprojekt vill finna svar på. Projektet DAFNE (Drilling Active Faults in Northern Europe) har fått delfinansiering av det internationella kontinentalborrningsprogrammet ICDP och nu söker man kompletterande finansiering för att kunna sätta igång med borrhningar.

Syftet är att genom vetenskaplig borrhning undersöka de tektoniska och strukturella egenskaperna hos postglaciala förkastningar i norra

fennoskandiska skölden. Planen är att borra två borrhål på två borrhplatser, totalt fyra borrhål, genom Pärvieförkastningen väster om Kiruna.

Mellan 2003 och 2019 registrerades fler än 1900 seismiska händelser längs Pärvieförkastningen. Vid projektets planerade borrhplatser består den av två förkastningsplaner som tycks korsa varandra på ca 10 km djup. Det är också på det djupet en stor del av jordskalven detekterats.

De postglaciala förkastningarna bildades eller reaktiverades troligen i slutet av Weichselistiden då isen drog sig tillbaka. Detta resulterade i att belastningen på jordskorpan minskade och en isostatisk höjning av denna började. Men förekomsten av

förkastningarna visar att den isostatiska jordskorpehöjningen inte bara var ett elastiskt fenomen, utan att mer eller mindre våldsamma jordbävningar också uppstått då rörelser skett längs förkastningszonerna.

Förhoppningen är att forskningen ska förbättra kunskapen om jordskalv och landhöjningsprocesser i stabila kontinentområden samt om seismiska risker och berggrundens stabilitet med fokus på bland annat gruvinducerad seismicitet, vattenkraftverk och gruvdammar, lagring av kärnavfall och koldioxid samt djupgeotermi.

Projektledare är Maria Ask vid Luleå tekniska universitet.

Källa: ICDP.

På gång

4–5 april. Mineral- och smyckestensmessa, Göteborg. Läs mer på www.geologerna.se

27 april – 1 maj. World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Island. Läs mer på www.wgc2020.com/

3–8 maj. European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2020, Wien, Österrike. Läs mer på www.egu2020.eu/

9–10 maj. Internationell sten- & smyckemässa, Malmköping. Läs mer på idefarmen.se

12–13 maj. Bergforskardagarna 2020, Luleå. Läs mer på svemin.se

18–20 maj. EIT Raw Materials Summit 2020, Berlin. Läs mer på <https://www.eitrmsummit.com>

21–26 juni. Goldschmidt2020 – International Conference on Geochemistry and Related Subjects, Honolulu, Hawai'i, USA. Läs mer på www.eag.eu.com/about/goldschmidt/

3–5 juli. Internationell sten- och smyckemässa, Ylämaa, Finland. Läs mer på www.ylamaanjalokivimuseo.fi/en/

25–26 juli. Kopparberg stenmarknad. Läs mer på www.geoloco.com

Ny rapport om innovationskritiska metaller och mineral i Bergslagen

I Bergslagen finns många av de innovationskritiska metaller och mineral som behövs för att klara klimatomställningen. Det bekräftas av en ny SGU-rapport där Bergslagens potential för såväl primär som sekundär utvinning av de aktuella materialen har kartlagts.

Bland annat har kobolt, sällsynta jordartsmetaller, volfram, platina-gruppens metaller och indium hittats både i berggrunden och i olika typer av gruvavfall, och i flera fall är fynden tidigare okända enligt SGU. Detta gäller till exempel förhöjda halter av sällsynta jordartsmetaller som påträffats vid Vena gruvfält – en tidigare okänd förekomst. Sällsynta jordartsmetaller (REE) i betydande mängd har också dokumenterats inom Grängesberg- och Riddarhyttedälarna.

Kartläggningen har fokuserat på kunskapsuppbyggnad om innovationskritiska metaller och mineral i primära och sekundära källor, samt på insamling av högkvalitativa geologiska, geokemiska och geofysiska data.

Läs mer och ladda ner rapporten genom att följa qr-koden här intill.

Källa: SGU.



FOTO: LTU.

Självkörande drönare navigerar i bergrum

Robotikgruppen vid Luleå tekniska universitet har nyligen lyckats med autonom drönarflygning i gruvliknande miljö. Så fort drönaren lämnat marken finns det ingen pilot som styr, och drönaren är programmerad att analysera sin omgivning och att fatta egna beslut, till exempel för att självständigt kunna undvika hinder. Autonoma drönare kan komma att användas inom många områden, till exempel för riskfyllda inspektioner i otillgängliga miljöer. En autonom drönare skulle till exempel kunna skickas in i gruvor direkt efter sprängning eller ras, och därigenom förbättra säkerhets- och underhållsarbete.

Källa: LTU.

POSTTIDNING B
Geologiska Föreningen
c/o Tellurit AB
Storgatan 11
972 38 Luleå

Geologiska Föreningen tackar sina sponsorer för 2020

Platinasponsorer



UPPSALA
UNIVERSITET



Stockholms
universitet

Institutionen för geologiska vetenskaper
Institutionen för naturgeografi

LULEÅ
TEKNISKA
UNIVERSITET

Guldsponsorer

NEW **BOLIDEN**



LUNDS
UNIVERSITET

LKAB



GÖTEBORGS UNIVERSITET



Stalagtiter och stalagmiter i Lumme-lundagrottan, norr om Visby.