

GEOLOGISKT FORUM

Nr 94 ♦ 2017

*Undersökning
på djupet*

*Bergslagen och
Broken Hill*



Snowball
Earth

Ekologisk
efterbehandling

GEOLOGISKT FORUM

Nr 94 ♦ 2017

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: En omkring tre meter
lång borrhäla visas upp av David
Sicken. Hålet är borrarat inom COSC-
projektet. Läs mer om detta på sidan 10.
Foto: Henning Lorenz.

Upplaga: 825 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

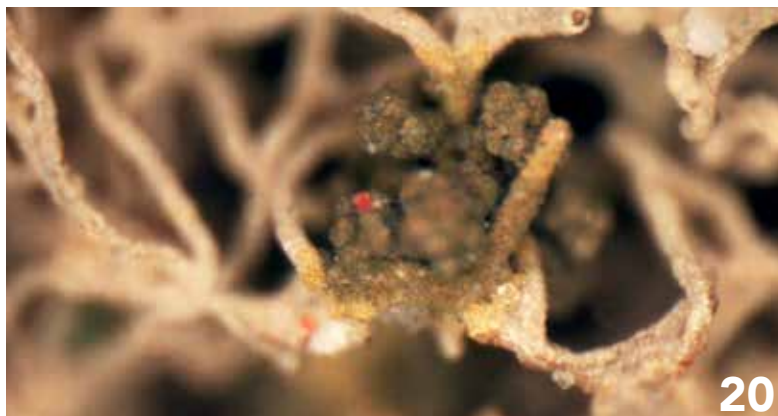
Tidningen publicerar sedan starten år
1994 populärvetenskapliga artiklar inom
geovetenskapens alla områden.

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 september 2017.

Geologiska Föreningen

I DETTA NUMMER

- 3 Djuplodande kunskap
- 3 Geologisk Brexit
- 4 Ekologisk efterbehandling kan skapa nya naturvärden
- 8 Antropocena och antropogena mineral
- 10 COSC – en undersökning på djupet
- 15 Fasadstensvandring och årsmöte
- 16 Hypotesen om Snowball Earth
- 20 Kan magmatiska bergarter vara fossilförande?
- 24 Bergslagen & Broken Hill
- 29 På gång
- 30 Sista ordet: Sveriges unika mineralresurser – vem bryr sig?



20



24



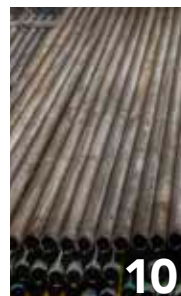
8



16



4



10

Djuplodande kunskap

DET ÄR BARA i undantagsfall som vi kan få information om hur berggrunden och jordlagren kan se ut på djupet. I detta nummer kan du läsa om hur djupborrning långt ner i berggrunden väster om Storsjön ska hjälpa oss att förstå bl.a. hur bergskedjor bildas.

Fossil förknippas man sällan med magmatiska bergarter, men forskare på Riksmuseet har hittat bl.a. fossilt svampmycel i sprickor och hålrum i sådana bergarter. Vissa av fossilen har visat sig vara

mycket gamla. Resultaten av forskningen har omskrivits i flera artiklar under våren och det är alltid roligt när svenska forskare får mycket uppmärksamhet.

Att jorden minst en gång varit helt täckt av is är spännande att tänka sig. Skulle det kunna hända igen?

Annars handlar det en hel del om gruvor på ett eller annat sätt i detta nummer. Läs om hur man kan förbättra miljön i både pågående och avslutade gruvprojekt. Jämförande studier mellan Bergslagen,

Broken Hill i Australien och några malmer i Sydafrika har gett ny förståelse för hur malmerna i Sverige bildats och hur de ska klassificeras.

I *Sista ordet* vill Linda Ylivainio skapa debatt om den svenska gruvnäringens framtid. Har den en framtid? Vad tycker du? Välkommen med din åsikt!

Antropocen är ett begrepp som väcker känslor inom geologkretsar. Här-omdagen diskuterades just det begreppet i Filosofiska rummet i Sveriges radios

P1. Något förvånande (eller kanske inte?) så var inte någon geolog inbjuden att delta i diskussionen ...

Jeanette Bergman Weihed, redaktör



Geologisk Brexit

Man har länge diskuterat hur landbryggan som tidigare fanns mellan det som nu är England och Frankrike försvann. Bergskammen över kanalen exponerades under perioder med låg havsyta. Flera teorier kring denna landbrygga har funnits och samtliga har varit svåra att bevisa.

Ny forskning av professor Gupta med flera från Imperial College London har nyligen presenterats i tidskriften *Nature*. Med nya och bättre, framför allt geofysiska metoder kan man nu bättre förklara hur England blev en isolerad ö.

De flesta är överens om att det funnits en stor issjö i södra Nordsjön. Denna var uppdämd mellan inlandsisen i norr och bergskammen över Engelska kanalen i söder. Sjön bildades i första hand av smältvatten från inlandsisen, men vatten kom också via floder och vattendrag från landområden. Med tiden steg nivån på sjön så högt att vatten flödade över bergskammen söderut och många stora vattenfall uppstod.

De nya forskningsresultaten visar på två händelseförlopp i nedbrytningen av bergskammen. Dels orsakade de stora vattenfallen kraftig erosion av landbryggan vilket ledde

till att bergskammens kant successivt förflyttade sig norrut. I mätningarna ser forskarna även uteroderade dalgångar och bassänger på havsbotten som tros vara ett resultat av erosion från vattenfallen och de floder som bildats nedanför vattenfallen.

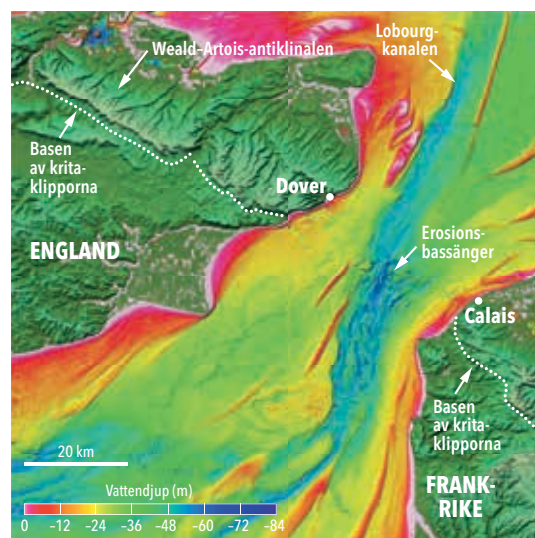
Man anser också att erosion längs ett nätverk av floddalar genom bergskammen till slut gjorde att landbryggan kollapsade på flera platser vilket bidrog till en tappning av det dämnda vattnet ut i östra Engelska kanalen. Därigenom öppnades kanalen upp mer fullständigt.

Det finns fortfarande brister i datering av händelseförloppet, men den första tiden med stora vattenfall anses ha varit för runt 450 000 år sedan, vilket motsvarar den förrförra istiden som i Nordeuropa kallas Elster.

Nästa del i processen, med erosion och kollaps av landbryggan, tros ha orsakats av smältvatten från förra istiden, som i Nordeuropa kallas Saale, för omkring 160 000 år sedan.

Man har dock funnit en marin molluskfauna i området som visar på sporadiska kontakter mellan södra Nordsjön och Engelska kanalen mellan dessa perioder, så än är inte sista ordet sagt om utvecklingen.

Det är naturligtvis avgörande att först isoleringen av England om man



också ska förstå utvecklingen av flora och fauna, liksom hur människan har kunnat ta sig över till England.

När väl länken till Frankrike försvinner så begränsas ju möjligheten att röra sig mellan England och hela den eurasiatiska kontinenten, vilket gör att detta även blir en viktig länk i förståelsen av biogeografi och arkeologi.

Läs hela artikeln på <https://www.nature.com/articles/ncomms15101>. ♦

Magnus Hellqvist, universitetslektor i geovetenskap vid Uppsala universitet.



FOTO: ENETJÄRN NATUR.

Ekologisk efterbehandling kan skapa nya naturvärden

TEXT: TOVE HÄGGLUND

Det finns en fantastisk potential att skapa värdefull natur på exploaterad mark genom ekologisk efterbehandling. Slätstrukna, sprutsådda gräsytor och tallar i raka rader tillhör snart historien. Nu handlar det om att göra det riktigt bra för olika arter av djur och växter, och då får det gärna vara kantigt, stenigt och brant. Det får finnas både vatten, klippblock, döda träd, plantor, buskar och träd av olika sorter. Här kan ekologer, ingenjörer och maskinförare göra något bra tillsammans!

GRUVOR, BERGTÄKTER, sandtäkter och grustäkter innebär vanligtvis stora ingrepp i naturen, men samtidigt uppstår nya naturvärden av just dessa verksamheter, både under drifttiden och efter avslutad drift. Anledningen är att dessa verksamheter skapar många olika miljöer som är ovanliga i vardagslandskapet, men som är livsviktiga för många arter.

I täkter och gruvområden finns sorterade jordarter och unga naturmiljöer, vilka "imiterar" strukturer som förekommer i naturliga miljöer, t.ex. fattiga naturbetesmarker, hedar, stränder, nipor samt klipp- och rasbranter i fjällen och vid havet.

I sand- och grustäkter trivs många olika insekter och grod- och kräldjur som är beroende av störd

och blottad mark med soluppvärmda platser. I bergtäkter och gruvor häckar fåglar som gillar klippbranter och här trivs växter som annars lätt konkurreras ut på andra platser. Brokig topografi, grunda vattensamlingar, omväxlande fuktig och extremt torr mark bidrar ytterligare till en mångfald av arter inklusive växter, mossor och lavar.

Till vänster: Så kallade vandringsbiotoper, t.ex. upplagshögar som kontinuerligt flyttas, ger livsrum för konkurrenssvaga arter såsom sandtrav, gåsört, smörblommor, kamomill, violer m.fl. Den stora koncentrationen av olika blommande arter, som blommar under olika delar av säsongen, är en viktig näringskälla för många insekter som dessutom ofta bygger bon i den blottade mineraljorden. Om marken inte störs kontinuerligt växer dessa områden igen med buskar och träd och då går mångfalden förlorad.

Nedan: Sandiga sluttningar ger livsrum för backsvala, en art som minskat kraftigt i Sverige. Här syns bohål i en naturgrustäkt.

Det är främst när man avslutar driften i en gruva eller täkt som det finns ett gyllene tillfälle och en outnyttjad potential för att skapa nytt naturkapital. Men även under drift kan man skapa och bibehålla naturvärden inom områdena, både genom successiv efterbehandling och så kallad temporär natur.

Ekologisk efterbehandling är ett enkelt och praktiskt tillämpningsbart verktyg för alla som exploaterar naturen och som senare ska återställa den. Med hjälp av ekologisk efterbehandling kan vi skapa nya förutsättningar för biologisk mångfald och med

större värden än tidigare. Och det bästa av allt, det behöver inte kosta så mycket!

Vad innebär ekologisk efterbehandling?

Ekologisk efterbehandling innebär nyskapande och efterliknande av naturtyper och ekosystem på mark där detta helt saknas, nyligen har saknats eller kommer att avlägsnas eller förstöras på grund av mänskliga aktiviteter.

Målsättningen med ekologisk efterbehandling är att skapa förutsättningar för en hållbar markanvändning och långsiktigt hållbara ekosystem som bidrar till ökad biologisk mångfald och ekosystemtjänster. Inom ekologisk efterbehandling är målet oftast inte att naturmiljön ska återgå till det som varit innan naturmiljön på platsen stördes utan det kan vara helt andra typer av ekosystem.

Det är de olika verksamheterna som själva skapar förutsättningarna för ekologisk efterbehandling. Just därför är många av de åtgärder som kan genomföras för att gynna den biologiska mångfalden redan på plats och därmed också kostnadseffektiva.

Åtgärderna kan handla om att i en täkt gräva lite djupare för att skapa en vattensamling, att schakta av ett

EKOLOGISK EFTERBEHANDLING

Syftet med ekologisk efterbehandling är att i första hand öka den regionala och lokala biologiska mångfalden, men även att gynna ekosystemtjänster och värden för rekreation och friluftsliv.

Höga naturvärden är områden och strukturer med stor betydelse för biologisk mångfald.

Biologisk mångfald är variationsrikedomen bland levande organismer av alla ursprung, inklusive från bland annat landbaserade, marina och andra akvatiska ekosystem och de ekologiska komplex i vilka dessa organismer ingår; detta innefattar mångfald inom arter, mellan arter och av ekosystem.

lager med mycket organiskt material för att de sandälskande arterna ska få en livsmiljö, att spränga ut en klipphylla för fåglarna eller att vid efterbehandlingen använda den fröbank som finns i de avbaningsmassor som redan ligger på plats i området.

Man kan med fördel gynna och förstärka de naturvärden som skapas av verksamheten även under drifttiden. Då är den skötsel som de av verksamheten skapade miljöerna



FOTO: ENETJÄRN NATUR.

kräver enkel, speciellt när maskiner och personal redan finns på plats. Det kan handla om att gräva om i upplagshögar som vuxit igen eller att skapa en ny rasbrant i en sandhög så att backsvalor får en ny slänt att bygga bon i.

Allt som behövs är egentligen bara att vi tänker lite annorlunda, att vi utnyttjar de maskiner som redan finns på plats och att personerna som jobbar får kunskap om den biologiska potentialen. Ett bra startskott är att ta fram en plan för hur åtgärderna ska genomföras både under drift och när platsen ska lämnas tillbaka till naturen.

En plan lägger grunden

Genomgående när man planerar för ekologisk efterbehandling är att alla åtgärder ska adressera vissa utpekade arter eller naturtyper. Dessa får gärna finnas i ett landskapsperspektiv, men vara bristvaror i omgivningarna. Det är ekonomiskt och tidsmässigt smart att redan när en gruva eller täkt anläggs och är i drift ta tillvara på vegetation och jordmassor och att successivt forma landskapet enligt den ekologiska efterbehandlingsplanen.

Det handlar om att redan från början lägga grunden för att området ska utvecklas i en önskvärd riktning. Många värden skapas och består redan under driften, men idag saknas ofta viktig kunskap för att arter och naturtyper ska kunna gynnas på bästa sätt utifrån verksamhetens och landskapets förutsättningar. Några exempel på konkreta åtgärder att genomföra är följande:

- Skapa avsatser och hyllor med varierad storlek vid bergsbranter. Här kan man prioritera klippbranter där vatten trycker ut från berget, det skapar ytterligare en dimension av livsmiljöer.
- Skapa och bibehålla öppna solbelysta slänter och sluttningar med blottad mineraljord – ett varmt läge med mycket solinstrålning är bra. Schakta av vissa ytor för att ta bort gammalt dött gräs och för att blottlägga mer jordmaterial.
- Undvika insädd av vegetation i slänterna. Låt växligheten etableras naturligt.
- Om man vill påskynda växtetablering kan man tillföra en

ängsfröblandning med så lokala arter som möjligt eller sprida avslaget gräs som får fröa av sig.

- Under drifttiden kan man låta några upplagshögar med finare jordmassor (sand, bergkross) ligga orörda under 3–4 år. Därefter använda, sälja eller röra om i materialet och lämna några nya upplagshögar under ytterligare 3–4 år.
- Anlägga vattenmiljöer i form av öppna, grunda vattensamlingar (max 1,5 m djupa). Flera små vattenmiljöer är bättre än en stor.

Ekosystemtjänster är ekosystemens direkta och indirekta bidrag till människors välbefinnande. Tjänsterna som kommer från ekosystemen ger oss bland annat luft- och vattenrening, jordbildning, primärproduktion och naturupplevelser som kan påverka vår hälsa positivt.

Små vattensamlingar kan vara väldigt artrika. De är viktiga för både insekter, groddjur, ormar och fåglar.



FOTO: ENETJÄRN NATUR.

Det är bra med en lång och varierad strandlinje och ett varierat vattendjup.

- Skapa variation i vattenmiljöns närhet. Många vattenlevande grod- och kräldjur lever stora delar av sina liv på land. Se till att det i direkt anslutning till vattenmiljön (inom 5 m) finns sten, block och håligheter. Lagg gärna ut avverkade träd och ris med mycket grenar i anslutning till vattenmiljöerna.
- Använd aldrig näringsrik matjord vid anläggning av dammar, diken eller bäckar.

Bra att ligga steget före

Man kan ana ett trendbrott, och flera företag inom gruv-, täkt- och stålindustrin har redan upptäckt fördelarna med att ligga steget före. De har förstått att en verksamhet som tar fram en ekologisk efterbehandlingsplan i ett tidigt skede kan spara både tid och pengar, och dessutom bidra till de nationella miljömålen.

Vi tror också att det från tillståndsmyndigheternas sida framöver kommer att ställas högre krav på ett ekologiskt fokus vid efterbehandlingar. Fram till nu har fokus på efterbehandling legat på att minimera risker och att få de efterbehandlade områdena att smälta in visuellt i omgivningen. Riskminimering är självklart viktigt även vid ekologisk efterbehandling och en efterbehandlingsplan måste alltid utgå från de tekniska krav som kan ställas på t.ex. kvalificerad täckning av farliga massor.

Framtidens efterbehandling

Vi tror att framtidens efterbehandling kommer att handla om mer än de tekniska aspekterna. Vikten av att skapa biologisk mångfald och viktiga ekosystemtjänster kommer att få större tyngd och utrymme. Blickar vi utanför Sveriges gränser ser vi att ekologisk efterbehandling är på väg att bli det normala, så i detta fallet ligger vi lite efter i Sverige.

EU-kommissionen konstaterar i en pågående studie att ekologisk efterbehandling är ett viktigt verktyg för att hindra ytterligare förlust av biologisk mångfald. Vi människor lever ju på de ekosystemtjänster som naturkapitalet levererar. Därför är det

viktigt att se exploaterad natur som en kommande resurs för arter och naturmiljöer och i förlängningen för nybildning av naturkapitalet.

Om vi går utanför EU:s gränser, i ett globalt perspektiv, är gruvor och täkters potential att bidra med biologisk mångfald välkänd. I ett flertal länder finns riktlinjer eller handböcker för att förklara och beskriva hur man ska jobba med åtgärder som gynnar arter som är knutna till täkter.

Under 2015 tog vi på Enetjärn Natur, i samarbete med Swerock, fram en handbok som blev prisbelönt. Den beskriver på ett enkelt, illustrativt och inspirerande sätt hur bra natur kan skapas i täkter under svenska förhållanden. Exempelen på konkreta åtgärder som nämnts här är hämtade från handboken.

Under 2015–2016 genomförde vi också ett utvecklingsprojekt tillsammans med branschorganisationerna SveMin och Jernkontoret, finansierat av Vinnova, om potential och metoder för ekologisk efterbehandling av gruvor och stålverk. Projektet visade att det finns stor potential att gynna såväl ekosystemtjänster, skyddade arter och sociala värden vid efterbehandlingen av gruvor och stålverk. Den arealmässiga potentialen för ekologisk efterbehandling av gruvor i Sverige uppskattades vara 21 400 hektar.

Många goda exempel

Det finns exempel på hela täkter och dagbrott från mineralindustrin som restaurerats med fokus på biologisk mångfald där man nu ser att resultaten är väldigt goda. Opgrimbie är en före detta täkt i Belgien som restaurerats och som nu ingår i nationalparken Hoge Kempen.

Det är naturligtvis möjligt att göra något liknande även i Sverige. Här har arbetet med ekologisk efterbehandling inte kommit lika långt, men flera verksamhetsutövare inom gruv- och täktbranschen har eller är i färd med att ta fram planer för biologisk mångfald under drift och vid efterbehandling.

Nätverkande

För de svenska företag som vill ha ett bra förhållningssätt till naturen har

Enetjärn Natur är ett konsultföretag som bistår företag i frågor om markanvändning, naturvård och samhällsplanering. Vi jobbar med värdering av naturmiljöer, miljöprövningar och ekologisk kompensation, i synnerhet när höga naturvärden berörs. Vi utvecklar metoder och verktyg som gör att näringslivet kan vara med och förhindra förlusterna av vårt gemensamma naturkapital. Vi jobbar över hela landet och har kontor i Stockholm, Umeå och Malmö. Ekologisk efterbehandling av tidigare industrimark är en av våra specialgrenar.

vi på Enetjärn Natur med samarbetspartner lanserat ett branschöverskridande företagsnätverk för Business & Biodiversity. Här kan företag mötas för att dela kunskap, främja innovation och skapa förutsättningar för samarbete om förhållningssätt till naturen. Liknande nätverk finns redan globalt, på EU-nivå och i flera europeiska länder. Intresset ökar snabbt för möjligheten att koppla samman affärsutveckling med förvaltning av naturkapitalet på ett hållbart sätt.

Förlusten av biologisk mångfald är lika allvarlig, eller allvarligare, för människans långsiktiga överlevnad på jorden som klimatförändringarna. Vi hoppas nu att fler av samhällets aktörer vill arbeta för att vända trenden med en snabbt minskande biologisk mångfald. Ekologisk efterbehandling är en metod att arbeta med, där det finns stor potential att göra mycket nytta! ♦

Läs mer

Om nätverket Business@Biodiversity
Sweden: <https://businessandbiodiversity-blog.wordpress.com/>

Handbok till att skapa bra natur i täkter:
http://www.enetjarnnatur.se/site_specific/uploaded_files/32963/handbok-for-biologisk-mangfald-i-takter.pdf
Handbok om potential för ekologisk efterbehandling för gruvor och stålverk. <http://www.enetjarnnatur.se/static/sv/735/>



Tove Hägglund,
Naturmiljöstrateg på
Enetjärn Natur.



FOTO: DAN HOLTSTAM.



FOTO: PÅR WEHED.

Antropocena och antropogena mineral

TEXT: DAN HOLTSTAM

Det hör väl inte till vanligheterna att en artikel i en geovetenskaplig tidskrift blir en världsnyhet, i alla fall inte om det rör sig om en smal mineralogisk publikation. Därför höjde man lite på ögonbrynen när media i hela världen, alltifrån *Washington Post* till *India Today*, refererade till en nypublicerad artikel i *American Mineralogist* i början av mars i år.

Originalartikeln, med titeln *On the mineralogy of the 'Anthropocene Epoch'*, innehåller inga sensationella nyheter vetenskapligt sett, men lyckades ändå fånga intresset hos journalisterna.

Paul Crutzen med flera föreslog redan på 1980-talet att den geologiska epok vi nu lever i borde kallas antropocen och ses som en efterföljare till holocen, som är kvartärperiodens innevarande del. Epoken har ännu inte blivit godkänd, men människan (*anthropos*) har trots allt haft en avsevärd påverkan på den naturliga miljön. Spåren kan även tydligt följas i geologiska lagerföljder som förändringar av den fossila faunan och

floran, olika geokemiska markörer med mera.

Mineralrikets evolution

Författarna till artikeln i *American Mineralogist* lyfter specifikt fram argument baserade på mineralogisk kunskap för etablerandet av den nya epoken. I tidigare arbeten har de pekat på den "evolution" mineralriket haft under jordens 4,5 miljarder år, och att bildandet av allt fler olika mineral och mineralgrupper avspeglar den omfattande och delvis språngvisa geologiska utvecklingen av vår planet.

Man förutspår nu att människans inverkan på variationen och utbred-

ningen av olika mineral och mineral-liknande substanser kommer att bli omfattande och global. Förändringen kan komma att överträffa den "stora syrekatastrofen" (*the Great Oxygenation Event*) för omkring 2,3 miljarder år sedan då förutsättningarna uppstod för bildandet av omkring två tredjedelar av dagens 5 200 kända mineral genom biologisk aktivitet i oceanerna.

Vad definieras som ett mineral?

Dagens definition av mineral som *naturligt förekommande och bildade genom geologiska processer* utesluter substanser som tillverkats avsiktligt. Även föreningar som uppstått indirekt genom människans försorg, t.ex.

Längst till vänster: Koboltkieserit, $\text{Co}(\text{SO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$, ett ljus rosa, pulveraktigt mineral, tillsammans med scorodit (grågrönt) och erytrit (rödlila), beskrevs 2002 som ett nytt mineral från Bastnäs-fältet vid Ridderhyttan. Detta är exempel på ett mineral i gråzonen mellan naturligt och antropogent. Genom omvandling av malm rik på koboltglans bildas koboltkieserit sekundärt (genom oxidation).

Till vänster: Som markörer för den "antropocena epoken" skulle troligen rester av stora betong- och stålkonstruktioner dominera. Här Toronto.

Till höger: Den dag Aitikgruvan läggs ner kommer en stor och djup sjö att bildas i takt med att dagbrottet fylls med grundvatten.

genom omvandling av varp, slagg eller skrot, exkluderas.

Tidsperspektivet saknar betydelse. Oavsett om det handlar om sekundära kristaller på bronsåldersartefakter eller recent korrosion av syntetiskt framställda speciallegeringar räknas produkterna inte som mineral strikt sett.

Före 1995 var definitionen av ett mineral inte lika precist reglerad av *the International Mineralogical Association*, IMA. Därför finns många införlivade i handböckerna som inte skulle ha godkänts idag. Författarna har identifierat drygt tvåhundra sådana mineral i litteraturen. Ett särskilt udda exempel är calclacit som främst bildas genom inverkan av ättiksyra, härrörande från ekplankor, på karbonathaltiga prover förvarade i skåp i museisamlingar. I några få fall kan det ha funnits bedrägliga avsikter där syntetiska material sänts till mineraloger för undersökning under föregivande av att de påträffats i naturen.

Det finns minst ett ytterligare hundratal mineral som påträffats i flera olika miljöer, och för vilka det finns indikationer på både ett antropogent och ett mer "äkta" geologiskt ursprung.

I ett enskilt fall kan det dock vara mycket svårt att avgöra vad som är naturligt och vad som är antropogent. Ett sekundärt bildat mineral i en tunnel eller ett gruvschakt kan vara en helt naturlig bildning, men också ett resultat av den specifika miljön (luftfuktighet, pH i grundvattnet etc.) som skapats av människohand.

Syntetiska föreningar

I betydligt större skala, men bortom den gängse definitionen på mineral, produceras idag en enorm mängd mineralliknande ämnen. Exempel på sådana är YAG-kristaller (yttrium-aluminiumgranat) som används i lasrar, karbider och nitrider som används i slipmedel, och kiselchips som utgör halvledare i datorer. Andra exempel är tegel, porslin, klinker och cement, som är polykristallina aggregat av silikater, oxider, hydroxider, sulfater och andra föreningar.

Ingen räknar normalt detta som mineralförekomster eller mineralresurser idag, men hur kommer man att betrakta situationen om låt säga en miljon år, när detta material omfördelats och spritts ut över stora områden, och kanske bildar egna lager och linser inbäddade i mer ordinarie geologiskt material? Oavsett definition blir dessa förekomster då obestridliga markörer för den antropocena epoken.

Framtida eldorado för mineralsamlare?

En modern databas över samtliga beskrivna oorganiska, kristallina ämnen innehåller 180 000 poster, och många av dem är säkerligen robusta nog att överleva både långvarig vittering, erosion och deformation. Även om bara en bråkdel av dessa ämnen bevaras kommer antalet nya föreningar att överstiga jordskorpan, och möjligen hela solsystemets, naturligt bildade mineral.

Måhända låter det som ett eldorado för en post-antropocen mineralsamlare? Och eventuella framtida civilisationer, mänskliga eller ej, kan komma att dra nytta av dessa ackumulationer, en variant på dagens modeuttryck *urban mining* och *landfill mining*.

Mänskliga aktiviteter som gruvdrift och transport av ballast, industrimineral och malmer från sin ursprungliga plats för att bygga vägar, broar, kraftverk och annat kommer att leda till en omfördelning av geologiskt material i en omfattning som kan överträffa de kända naturliga

processerna (t.ex. glaciation). Platser som gruvor och grustag blir också indikatorer för denna unika epok, just genom frånvaron av det material som ursprungligen fanns där.



Nya forskningsområden

Den refererade artikeln innebär inget stort vetenskapligt genombrott men den sammanfattar ändå på ett intressant sätt det faktum att människan fundamentalt omgestaltar jordens ytliga delar, och ger även yttrycket "mineralogisk evolution" en ny dimension. Alla de mineralliknande komponenter som beskrivs här kan ge upphov till stratigrafiska "ledmineral" som för mycket lång tid kommer att bära vittnesbörd om den moderna människans tidsepok. Artiklar som den här nämnda stimulerar till nya forskningsområden och sätter rådande definitioner på prov. ♦

Källa

Hazen, R.M., Grew, E.S., Origlieri, M.J. & Downs, R.T. 2017. On the mineralogy of the 'Anthropocene Epoch'. *American Mineralogist* 102, 595–611.



Dan Holtstam är samordnare på Vetenskapsrådet och docent i mineralogi.



COSC – en undersökning på djupet

TEXT: CHRISTOPHER JUHLIN

FOTO: HENNING LORENZ.

Sverige har en lång tradition av malmprospektering och gruvdrift, men vi kan relativt lite om berggrundens struktur på djupet, processer inom berggrunden, det biologiska livet nere i berget och liknande. Vår kunskap kommer huvudsakligen från observationer på jordens yta. Borrhål, gruvor och geofysiska experiment kan tillföra viktig information i den tredje dimensionen, djupet.

GENOM ATT KOMBINERA geofysiska mätningar med geologisk information och vetenskaplig borrhning kan vi få unik information om jordens inre, och kartlägga och göra tolkningar av geologiska strukturer i jordskorpan. Sådan

information ger oss möjligheter att bättre förstå många av de processer som styr vår miljö på jorden, t.ex. bergskedjebildning, jordskalv, deformation i berggrunden och utvecklingen av liv i berget.

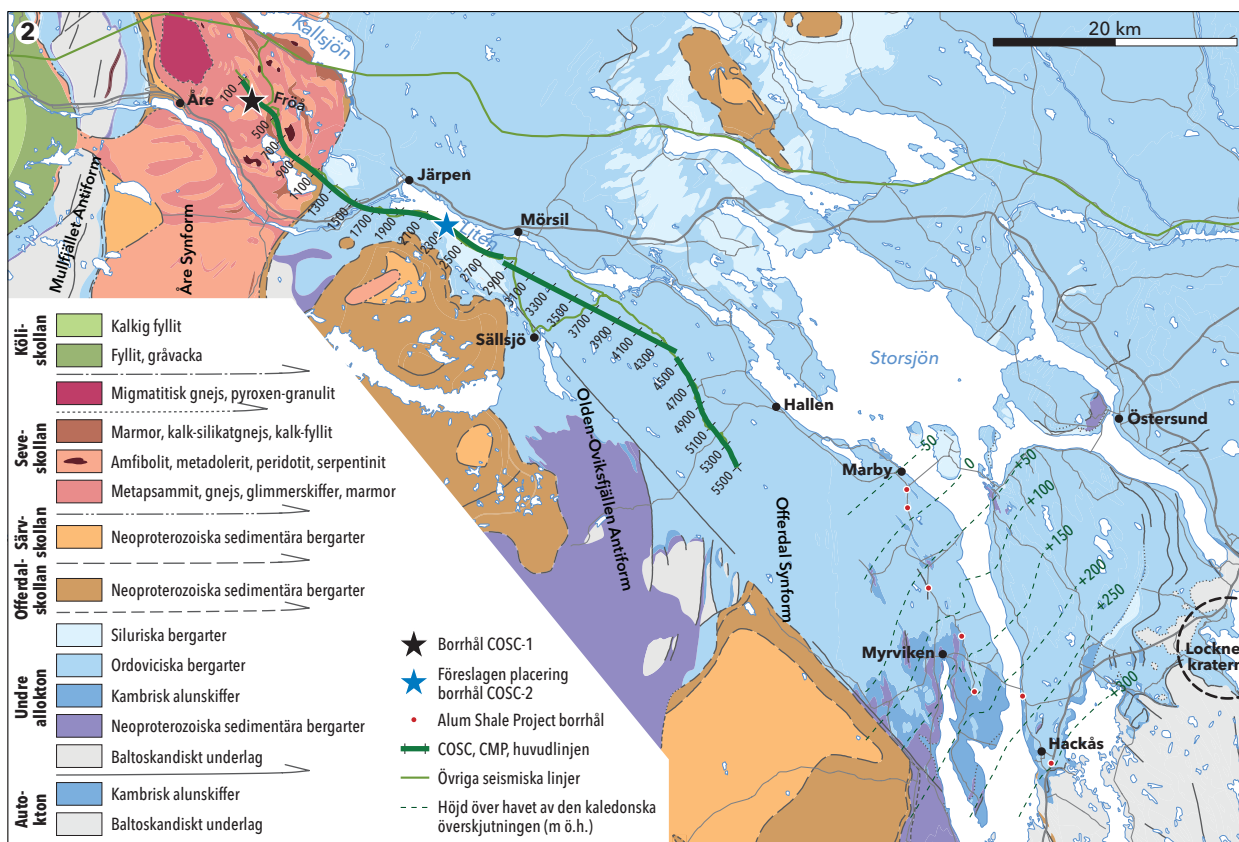


Bild 1: Riksrigger (se faktarutan på sidan 14) är här uppställd vid borrhålets COSC-1 nära Fröa gruva, omkring 5 km öster om Åre.

Bild 2: Geologisk karta över COSC-området. Seismikprofilen som visas på nästa uppslag sträcker sig längs den gröna linjen. Borrhningar från 1960-talet i Myrviksområdet ger kunskap om djupet till den kaledonska överskjutningen. Kartan är modifierad från Juhlin m.fl. 2016.

KALEDONIDERNA

Kaledoniderna är en term som refererar till den bergskedjebildning, orogenes, som uppstod när lapetus-havet stängdes och kontinenten Baltica kolliderade med kontinenten Laurentia för 490–390 miljoner år sedan. Idag hittar man resterna av denna orogenes i den skandinaviska fjällkedjan, Skottland, östra Grönland och östra Nordamerika.

Projekt för att förstå bergskedjebildning

Den svenska fjällkedjan, Kaledoniderna, har undersökts under lång tid med både geofysiska mätningar och geologisk kartering. Detta har gett oss en god uppfattning om hur den har bildats, men ett antal frågor återstår fortfarande, speciellt när det gäller den djupare strukturen.

För att öka kunskapen om de djupare strukturerna i fjällkedjan och för att studera orogena processer i allmänhet startade COSC-projektet (*Collisional Orogeny in the Scandinavian Caledonides* eller Bergskedjebildning i de skandinaviska Kaledoniderna) år 2013 inom det svenska vetenskapliga borrhningsprogrammet SSDP (läs mer om programmet på www.ssdp.se).

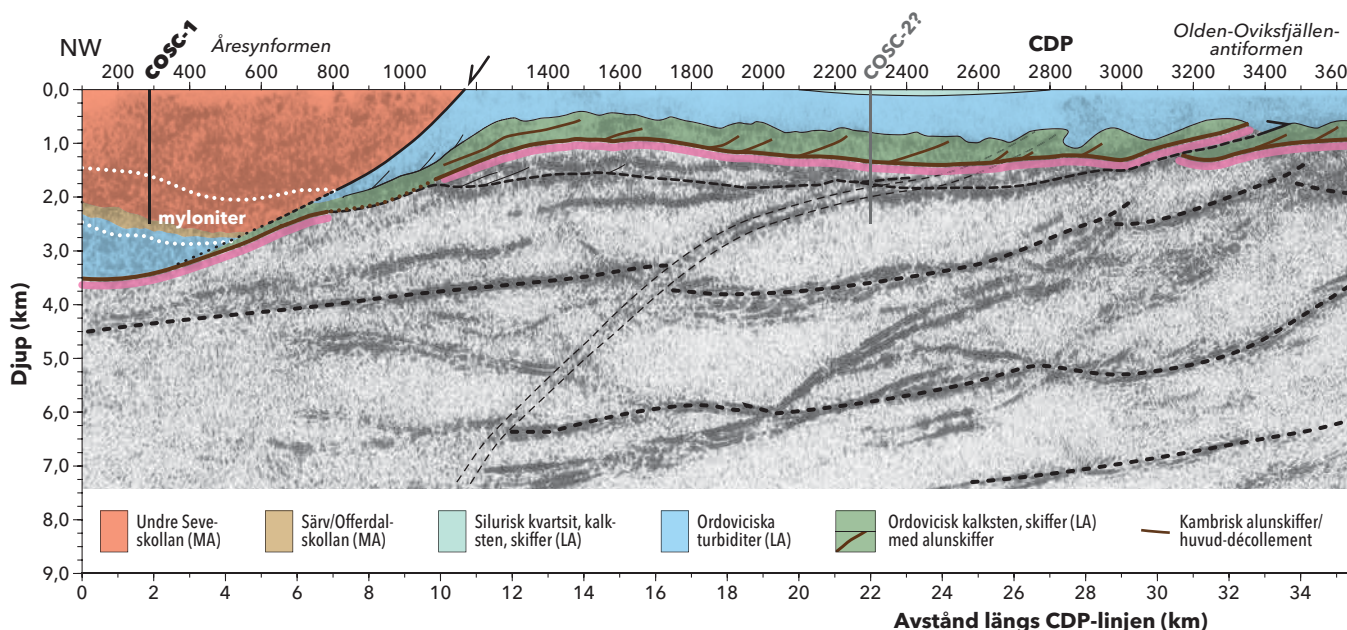
Processerna som bildar bergskedjor, deras yttre tecken (t.ex. Tibetanska plattan i Himalaya) och den aktivitet som är associerad med dem (jordbävningar, aktiv tektonik, klimat) påverkar många människor.

Ett mål med COSC-projektet i Jämtland är att studera bergskedjebildande processer i den svenska fjällkedjan och relatera den kunskap vi får därifrån till bergskedjebildande

processer mer generellt. Genom att jämföra djupt eroderade gamla bergskedjor (vår egen fjällkedja) med moderna bergskedjor som fortfarande bildas (t.ex. Himalaya) hoppas vi kunna nå ny kunskap om hur tektoniska processer har förändrats över tiden, men också bidra till att bättre förstå utvecklingen av dagens bergskedjor eftersom det blottade berget i fjällkedjan motsvarar 15–20 km djup i Himalaya.

Två borrhål ska ge kunskap

Med två borrhål ner till ca 2,5 km vill vi ta kontinuerliga prov i form av borrhåll för att därmed få en profil genom en del av fjällkedjan som har överskjutits sammanlagt flera hundra kilometer över Sveriges urberg (den fennoskandiska skölden). Det första borrhålet COSC-1 borrhades framgångsrikt ner till 2,5 km i närheten av Åre under sommaren 2014 (bild 2). Borrhningen finansierades av International Continental Scientific Drilling Program (ICDP) och Vetenskapsrådet (VR). Huvudmålet med detta borrhål var att undersöka Seveskollan och dess kraftigt omvandlade bergarter.



Medel har sökts från ICDP, Vetenskapsrådet och Knut och Alice Wallenberg-stiftelsen för att utföra ett andra borrhål, COSC-2, och tillhörande vetenskapliga mätningar och analyser. Detta borrhål planeras mellan Järpen och Mörsil och ska ge möjlighet att studera den viktigaste överskjutningszonen i centrala Sverige, den kaledonska överskjutningen, och de kraftiga seismiska reflektorerna som finns i urberget där (bild 3).

Djupaste borrhålet hittills

Borrhålet COSC-1 borrades från början av maj till slutet av augusti 2014. Riksrigger (se faktarutan på sidan 14) användes för att utföra borrhåll ned till 2496 m med kontinuerlig kärnborrning. Den nästan kompletta borkärnan (bild 4) tillsammans med geofysiska mätningar i borrhålet under hösten 2014 har gett en unik samling material som kommer att utnyttjas många år framöver av forskare. Detta borrhål är det hittills djupaste kärnborrhålet i Norden.

Vad visade borkärnorna?

Gnejserna i den undre delen av Seveskollan är mer homogena än väntat. I princip har de samma sammansättning från ytan och ner till omkring 1700 m. Amfibolitgnejser, felsiska gnejser och kalk-silikatgnejser dominerar på olika nivåer. En stor överraskning var tjockleken på deformationszonen som ligger i den nedre delen av borrhålet. Den är minst 800 m tjock och består till stor del av myloniter (en starkt deformerad bergart).

Den undre gränsen av deformationszonen borrades inte igenom, men i den undre delen av deformationszonen observerades metasandstenar, vilket tolkades som ett tecken på att borrhålet antingen började penetrera en underliggande enhet eller åtminstone en tektonisk flisa av den. Nära botten av borrhålet observerades att myloniter i

metasandstenar innehåller en stor mängd granatkristaller som ibland är upp till 1 cm stora. Granater bildas vid högt tryck, och förekomsten av granater i myloniterna tyder på att granaterna växte till i deformationszonen sent under kollisionsprocessen.

Geofysik och geologi kombineras

Den integrerade tolkningen av tillgänglig geofysik och geologisk information som utfördes innan borrhållingen bekräftades till stor del av COSC-1-borrhållingen med undantag av den nedre delen av borrhålet. Seismiska undersökningar utförda före borrhållingen visade på närvaron av en högreflekterande enhet från ytan och ner till omkring två kilometers djup. Denna tolkades representera Seveskollan. Tyngdkraftsmodelleringen och magnetfältsmodelleringen överensstämde med den seismiska tolkningen, och tydde också på att Seveskollan sträckte sig till omkring två kilometers djup under borrhållplatsen.

De geofysiska mätningar som gjordes i borrhålet visade att de seismiska reflektionerna som finns inom den tolkade Seveskollan härstammar från linser av amfibolit som ligger i felsiska gnejser. Det är kontrasten mellan tyngre, mer järnrika bergarter och ljusare, mer sura bergarter som ger upphov till de seismiska reflektionerna. Reflektiviteten är mest påtaglig i den översta kilometern av jordskorpan, och en ganska tydlig reflektion har sitt ursprung på ca 900 meters djup.

Analysen av den insamlade geofysiska informationen från borrhålet visar att de översta 1000 metrarna innehåller den största andelen tjockare amfiboliter, tjockare än 15 m. Intervallet 1000–1700 m innehåller också en betydande mängd amfibolitlager, men dessa är i detta intervall i allmänhet mycket tunnare än i den övre delen av borrhålet. Nedanför 1700 m är amfibolit mindre vanligt förekommande.

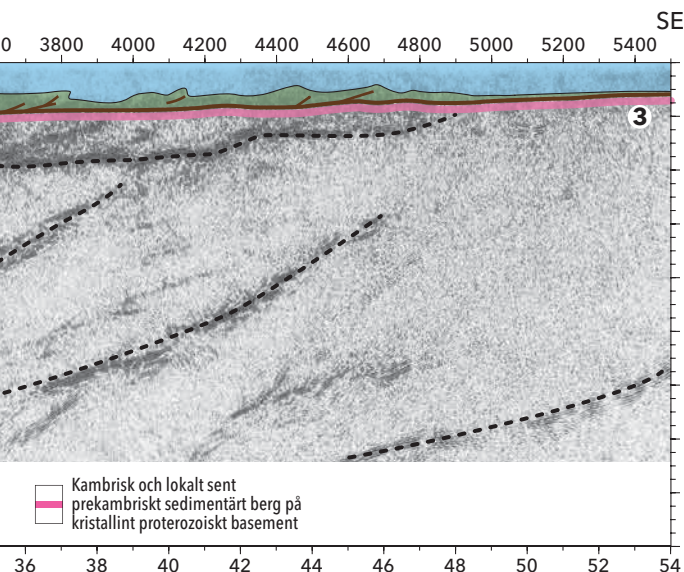


Bild 3: Seismisk profil med geologisk tolkning. Borrhålet COSC-2 planeras ligga vid CDP 2300. Profilens läge visas i den geologiska kartan på föregående uppslag. Bilden är modifierad från Juhlin m.fl. (2016).

BERGARTSFYSIK

Varje bergart har specifika geofysiska egenskaper, t.ex. densitet, elektrisk ledningsförmåga, seismisk våghastighet, värmeledningsförmåga osv., och det är med hjälp av dessa egenskaper som vi kan koppla en geofysisk mätning till berggrundens egenskaper. De geofysiska egenskaperna kan ibland vara anisotropa, t.ex. kan en seismisk våg fortplantas sig snabbare i en riktning genom en bergart jämfört med i en annan riktning.

För att tolka en geofysisk mätning behöver vi veta vilka fysiska egenskaper olika bergarter har. Detta kan vi ta reda på genom mätningar i labbet på bergartsprov som samlats in. Ett problem är att relatera mätningar som vi gör i laboratorieskala till dem som vi gör i fältskala. Därför kan högupplösta geofysiska mätningar på blottat berg ge ytterligare kunskap om vilka geofysiska egenskaper som olika bergarter har. Denna information kan då, tillsammans med laboriemätningar, ge oss insikt om vilka egenskaper berget har djupare ner i jordskorpan.

Det finns en mängd olika geofysiska mätningar som kan utföras, och det är självfallet bäst att få fram absoluta värden på bergarternas egenskaper. Men oftast får vi nöja oss med att veta något om kontrasterna mellan två bergarter. Nästan alla geofysiska mätningar vi gör är tvetydiga, dvs. det finns ett flertal (eller till och med ett oändligt antal) modeller som kan förklara mätresultaten. Genom att utnyttja flera metoder och använda geologisk expertis kan dock rimliga modeller tas fram.

Temperaturgradienten mäts

Efter det att borrhningen avslutats mättes flera temperaturloggar för att bestämma jämviktstemperaturen i borrhålet. Skillnaderna i den uppmätta temperaturen i intervallet mellan 1600 och 2000 m djup var liten mellan de olika mättillfällena, och vid 2000 m djup mättes en temperatur på runt 45 °C. Detta tyder på en okorrigerad genomsnittlig temperaturgradient på omkring 20 °C per kilometer.

En preliminär uppskattning av värmeproduktionen från berget gjordes med hjälp av en borrhålssond som mäter den naturliga radioaktivitet i berget som produceras av ämnena uran, torium och kalium. Mätningen indikerar att de genomborrade bergarterna har en måttlig värmeproduktion. Det finns också ett omfattande program för att bestämma värmeproduktion och värmeledningsförmåga i berget genom mätningar på själva borrhkärnan.

Vattenförande zoner

Tester för att bestämma vattengenomsläppligheten i berget genomfördes vid ett borrhningsuppehåll vid 1616 m och också på slutdjupet 2496 m. Dessa tester gav viktig information om hur mycket vatten som flödar igenom berget och vattnets salthalt. Metoden är relativt ny och utförs genom att man mäter borrhålsvätskans elektriska ledningsförmåga vid upprepade tillfällen med avsänkning av trycket i borrhålet genom att pumpa ut vatten under mätningen. Genom att sänka vattennivån i borrhålet med hjälp av pumpning flödar vatten in i borrhålet från berget på grund av de tryckskillnader som då uppstår. Baserat på denna loggning kunde åtta hydrauliskt vattengenomsläppliga zoner lokaliseras mellan 300 m och slutdjupet. Värdena för vattengenomsläppligheten är mycket låga och spänner över en storleksordning.

Salthalten i vattnet är låg ända ner till botten av borrhålet. Detta indikerar att meteoriskt vatten (dvs. vatten

som relativt nyligen har varit i kontakt med luften) cirkulerar djupt i området.

Fortsatta planer

För att uppnå de övergripande vetenskapliga målen för COSC-projektet behövs ytterligare ett borrhål, COSC-2. Syftet med detta är att undersöka den metamorfa och strukturella utvecklingen av den nedersta skollan och det prekambriska urberget i fennoskandiska skölden.

Några viktiga frågor som ska besvaras av den borrhningen är: Hur kan den kaledonska överskjutningen karaktäriseras och var ligger den i djupled? Avtar metamorfosgraden med djupet i de låg- till mellangradiga metamorfoserade sedimentära bergarterna? Värmdes de låg- till mellangradiga metamorfoserade sedimentära bergarterna ovanifrån av den högmetsmorfa Seveskollan? Vilka bergarter och strukturer är det som genererar reflektioner i det prekambriska urberget? Vid vilken tidpunkt skedde deformationen vid dessa strukturella nivåer?

En tolkning av seismisk, elektromagnetisk, och flygmagnetisk geofysisk information tillsammans med borrhålsdata i Myrviksområdet ger vissa svar på frågor angående strukturen i den centrala delen av den skandi-



Bild 4: Kärnupptagningen var genomgående bra vid borrhningen av COSC-1. Här förevisar David Sicken en 3 meter lång helt obruten borrhkärna.

VETENSKAPLIG BORRNING

För att ta prover från underjorden krävs oftast att man borrar ner i den. Borrning i vetenskapligt syfte kallas vetenskaplig borrning och kräver hög teknisk och vetenskaplig kompetens. Sådan borrning involverar vanligtvis ett flertal forskningsdiscipliner. Borrprojekt är dessutom förhållandevis dyra och svåra att utveckla för ett forskarlag som saknar tidigare erfarenhet. Detta resulterar ofta i långa planeringstider, uppemot 10 år och längre, från projektidé till genomförande.

Vetenskaplig borrning kan ge viktiga bidrag till den grundläggande förståelsen av den planet vi lever på (grundforskning) och till problem som är avgörande för människors tillvaro och samhällets utveckling. Nyckelområden är bl.a. naturtillgångar, slutförvar av farligt avfall i underjorden, jordbävningar och andra naturkatastrofer, temperatur- och klimatförändringar, den djupa biosfären och livets uppkomst.

I Sverige har vi idag Riksriggen (bild 1) tillgänglig för vetenskaplig borrning. Infrastrukturen och skötseln av denna koordineras från Lunds universitet.

Läs mer på www.riksriggen.se.

Fakta om Riksriggen

Riggen är en wireline-kärnborrigg som är tillverkad av Atlas Copco, CT20C. Djupkapaciteten med borrhör av storlek N är 2500 m. Riggen är monterad på larvband.

Dimensioner (mm):

P: håldiameter/kärndiameter	122,6/85
H: håldiameter/kärndiameter	96/63,5
N: håldiameter/kärndiameter	75,7/47,6

naviska fjällkedjan. Den kaledonska överskjutningen, som identifierats i de grunda borrhålen runt Myrviken (bild 2), i den kaledonska fronten kan spåras västerut längs de östligaste 20 km av seismikprofilen (bild 3) och även längre västerut. Omfattningen av den kaledonska deformationen under överskjutningen och påverkan på det underliggande urberget är mindre lätt att definiera och läget av den djupaste överskjutningen är oklart.

Bästa platsen för ett andra borrhål

Baserad på analys av all tillgänglig information anses den optimala platsen för borrning av COSC-2 längs den seismiska profilen ligga på den södra sidan av sjön Liten. Borrhålet bör där penetrera hela ordovicium och tillåta en detaljerad analys av den kaledonska överskjutningen, som i den seismiska profilen definieras av platt liggande reflektioner med höga amplituder.

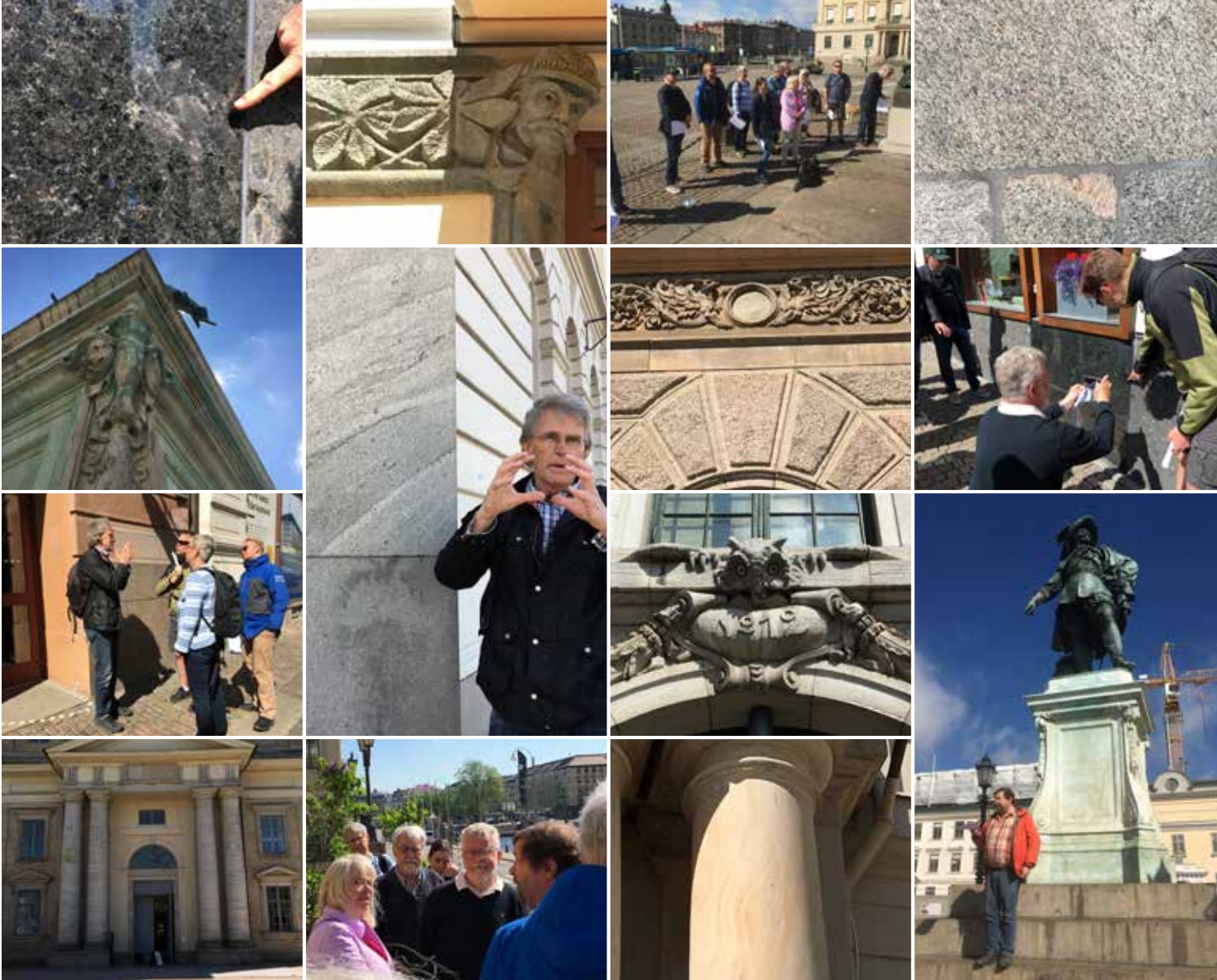
Borrhålet bör också penetrera fyra kraftiga reflektioner under den tolkade kaledonska överskjutningen och möjliggöra identifiering av sammansättningen, strukturella egenskaper och tidpunkten för deformationen av urberget.

Tack

Forskningen inom COSC-projektet har utförts av ett stort antal personer. Jag vill tacka alla som har medverkat i projektet. Mer information om COSC-projektet finns på www.ssd.se/projects/COSC. ♦



Christopher Juhlin är professor vid Institutionen för Geovetenskaper, Uppsala universitet.



Fasadstensvandring och årsmöte

Vi hade tur med vädret den 21 maj då föreningen ordnade en rundvandring för att titta på fasadsten i centrala Göteborg. Eminent guider var Erik Sturkell från Institutionen för geovetenskaper och Thomas Eliasson från SGU, båda i Göteborg.

Turen började på Gustav Adolfs torg där vi fick veta alla detaljer om statyns tillkomst. Den invigdes 1854 och står på ett postament av carraramarmor. Trappstegen under detta består av röd Bohusgranit, möjligen från östra Malmön. Detta är samma sorts sten som också finns i sockeln på Rådhuset.

Från torget gick vandringen sedan längs Norra Hamngatan till Tyska kyrkan och Ostindiska huset. Fasaderna på det senare förändrades mycket i samband med en ombyggnad i slutet av 1800-talet.

Därifrån fortsatte vi in på Västra Hamngatan och bort mot Domkyrkan på vilken vi beundrade kolonnerna som omsluter ingången. Dessa är gjorda av sandsten från Skottland.

Vandringen avslutades utanför hotell Avalon vars sockel är gjord av en mycket vacker larvikit.

Efter rundvandringen transporterade vi oss upp till Geovetarcentrum

där vi fick en lunchmacka och avhöll föreningens årsmöte. Dagen avslutades så med att Pär Weihed höll ett föredrag om människans behov av metaller.

På årsmötet diskuterades bland annat vad vi ska göra för att öka antalet medlemmar i föreningen och hur man ska få fler intresserade av geologi. Arbete pågår också för att försöka få fler sponsorer, för att t.ex. kunna fortsätta ge ut Geologiskt forum.

Om du har idéer om detta eller vill vara med och bidra med egna insatser är du välkommen att höra av dig till någon i styrelsen.



Bild 1: Linda Löwhagen undersöker pseudomorfer efter polygonala iskilar på Garvellachöarna.



FOTO: ANDREAS TILJE CC-BY-SA 4.0.

Hypotesen om Snowball Earth

Det finns många tecken som tyder på att vår planet vid flera tillfällen varit helt täckt av is – vi har haft en snöbollsjord eller *Snowball Earth*. De första indikationerna på detta upptäcktes i Skottland på 1800-talet men rester efter snöbollsjordarna finns på många platser på jorden. Skulle det kunna hända igen?

TEXT OCH BILD: ALASDAIR SKELTON

GEOLOGEN JAMES THOMSON beskrev i en artikel publicerad år 1871 en bergartsformation på ön Islay, utanför Skottlands västkust. Han noterade att bergartsformationen, den världsberömda Port Askaig-formationen, innehåller granitbumlingar och spekulerade om att dessa kunde ha transporterats av en inlandsis. Thomson menade att detta pekade på att det funnits en istid under den senare delen av prekambrium (neoproterozoikum). Idén var inte särskilt märklig då man, tack vare Louis Agassiz, redan visste att Skottland hade varit täckt av is under den senaste nedisningen.

Svårare att förklara var upptäckten av en liknande neoproterozoisk bergartsformation i tropikerna. Den 20 novem-

ber 1907 föreläste geologen och prästen Walter Howchin om glaciala avlagringar längs floden Sturt utanför Adelaide i Australien. Formationen fick namnet *Sturtian* efter floden. Upptäckten ledde till spekulationer om en omfattande nedisning under neoproterozoikum. Att nedisningen skulle ha kunnat vara världsomfattande nämndes först av Douglas Mawson i en beskrivning av den närliggande Elatinaformationen år 1949. Själva glaciationen fick namnet *Elatina* men detta ersattes så småningom av namnet *Marinoan*.

Många hypoteser presenterades

Douglas Mawson var en så kallade "fixist" och trodde inte på Alfred Wegeners hypotes om kontinentaldrift utan för-

Bild 2: Kindtandstruktur och ooider i Lossit Limestone-formationen på Islay.

Bild 3: En frostsprängd sten i Port Askaig-tilliten på Garvellachöarna.

klarade förekomsten av glaciala avlagringar i tropikerna genom dramatiska klimatförändringar. Wegeners hypotes gav en annan förklaring: nämligen att fyndplatserna hade legat nära en av polerna under neoproterozoikum.

En paleomagnetisk studie som gjordes av McElhinny och kollegor år 1973 bekräftade att kontinenten Gondwana faktiskt hade legat vid Sydpolen under neoproterozoikum. Men metoden ifrågasattes av Embelton och Williams år 1986. De visade att kontinenten Gondwana inte ens hade funnits under neoproterozoikum. Istället fanns en sammanhängande landmassa som de kallade Rodinia och som de visade låg vid ekvatorn under neoproterozoikum. Frågan om en världsomfattande nedisning under neoproterozoikum väcktes därigenom igen. Embelton och Williams talade om en klimathändelse som var oöverträffad i Jordens historia.

Ett flertal hypoteser lades fram för att förklara förekomsten av glaciala avlagringar vid ekvatorn. En hypotes var att jordaxelns lutning hade överskridit 56 grader under neoproterozoikum. Det skulle ha lett till att ekvatorn hade ett kallare klimat än polarna. En annan hypotes, som idag ger fler än 1000 träffar i databasen Web of Science, är *Snowball Earth*-hypotesen som presenterades 1992 av Joe Kirschvink.

Vittring styr klimatet

Under geologisk tid har Jordens klimat framför allt reglerats genom kemisk vittring av berg. Koldioxiden i atmosfären reagerar med silikatmineral och blir vattenlöslig. På detta sätt lämnar koldioxiden atmosfären och som konsekvens minskar växthuseffekten. Resultatet blir en *negative feedback*. Om Jordens temperatur stiger så vittrar bergarterna snabbare. Det gör att växthuseffekten minskar och Jordens temperatur sjunker. På samma sätt, om Jordens temperatur sjunker så vittrar bergarterna långsammare, växthuseffekten ökar och temperaturen stiger. Det är alltså ett helt naturligt och mycket effektivt regleringssystem!

Men under neoproterozoikum, menade Kirschvink, så slutade regleringssystemet att fungera. Höga berg vid ekvatorn orsakade en ovanligt snabb kemisk vittring, varvid växthuseffekten och således Jordens temperatur minskade kraftigt. Isar började bildas även i tropikerna.

Is har högt albedo, det vill säga hög reflektionsförmåga. Det gör att en stor del av solenergin speglas tillbaka ut i rymden från en istäckt Jord. En isfri Jord däremot har lågt albedo och solenergin absorberas effektivt. Enligt Kirschvink orsakade tillväxten av isar i tropikerna ett ökat albedo och Jorden blev ännu kallare. Till slut nåddes en brytpunkt och Jorden hamnade i ett *Snowball Earth*-läge.

Idag kommer en del av koldioxiden i atmosfären från vulkaner, och även vid en snöbollsjord frigörs koldioxid av vulkaner. Skillnaden är att de naturliga mekanismerna som tar bort koldioxid från atmosfären, t.ex. kemisk vittring, inte fungerar eftersom Jorden är helt istäckt. Resulta-



tet, enligt Kirschvink, blir att koldioxidhalten i atmosfären ökar kontinuerligt. Växthuseffekten ökar därför och till slut smälter snöbollen.

Vi vet inte med säkerhet om en snöbollsjord verkligen har funnits men ett flertal sedimentologiska och geo-kemiska bevis stödjer hypotesen.

Minst två snöbollsjordar

Sedimentologiska bevis på snöbollsjordar finns på alla världens nuvarande kontinenter och dessa tyder på åtminstone två episoder av snöbollsjord: en äldre episod (Sturtian) som enligt de senaste åldersbestämningarna inträffade för 717–660 miljoner år sedan, och en yngre episod (Marinoan) som skedde för 645–635 miljoner år sedan.

I en "klassisk" snöbollssekvens ligger en eller fler glaciala avlagringar (tilliter) mellan karbonatbergarter (kalkstenar, dolostenar) – som en smörgås. De underliggande karbonatbergarterna visar tecken på att ha avsatts i ett varmt klimat och på att havets nivå sjunker, t.ex. förekomsten av dolosten. Övergången till glaciala avlagringar ska vara snabb. Ovanpå de glaciala avlagringarna ligger en så kallade *cap carbonate* – en dolosten som vanligtvis innehåller järnformationer. Förekomsten av denna *cap carbonate* utgör bevis på en snabb övergång till ett växthusläge efter att snöbollen har smält.

Dolostenar bildas i samband med smältningen eftersom havet, som är övermättat på koldioxid från undervattensvulkaner, får ett tillskott av kalcium och magnesium från



de nyligen blottlagda kontinenterna. Järnformationerna bildas eftersom havet är övermättat på järn som också har ett vulkaniskt ursprung. Havet får ett tillskott av syre när isen smälter och järnet faller ut som oxider.

Kolisotoper ger ledtrådar

Geokemiska bevis för att vi haft snöbollsjordar kommer framför allt från kolisotoper. Kol förekommer naturligt som två stabila isotoper: kol-12 och kol-13. Eftersom den lättare isotopen (kol-12) upptas av levande organismer blir kvoten mellan kol-12 och kol-13 ett mått på hur stor mängd levande organismer som finns i haven.

Under neoproterozoikum bildades karbonatbergarter framför allt genom utfällning från havet eftersom de kalkhaltiga fossil som bildar moderna karbonatbergarter utvecklades först senare i Jordens historia. De utfälda karbonatbergarterna blir anrikade i den tyngre isotopen (kol-13) om mängden levande organismer är stor eller den lättare isotopen (kol-12) om mängden levande organismer är små.

Såväl innan som efter snöbollsjorden förekommer extremt negativa kol-13-anomalier. Dessa anomalier, som visar på anrikning av den lättare isotopen (kol-12) i karbonatbergarter, tolkas vara ett resultat av en kraftig minskning i mängden av levande organismer i samband med *Snowball Earth*.

Det finns naturligtvis också många argument som motsäger hypotesen om snöbollsjord. Bland annat finns inga bra förklaringar till varför livet över huvud taget överlevde en global nedisning. Men tecken på liv – framför allt

stromatoliter som bildas av cyanobakterier – förekommer såväl innan som efter *Snowball Earth*.

En *Snowball Earth*-sekvens på Islay och Garvellachöarna

En av de mäktigaste kända *Snowball Earth*-sekvenserna förekommer på ön Islay – ursprungsfyndplatsen från 1871 – och de närliggande Garvellachöarna. Här finns den 870 m tjocka formationen *Port Askaig Tillite*. En tillit är en bergart som tolkas ha ett glaciale ursprung. *Port Askaig*-tilliten ligger mellan karbonatbergarter: den underliggande *Lossit Limestone* och den överliggande *Bonahaven Dolomite*. I det här sammanhanget motsvarar det engelska ordet *dolomite* dolosten.

I *Lossit Limestone* förekommer dolostenar, stromatoliter och ooider (bild 2) som tyder på ett varmt klimat och en sjunkande havsnivå. En extremt negativ kol-13-anomali bevaras av *Lossit Limestone*-formationen framför allt på Garvellachöarna. Det finns också kindtandsstrukturer (bild 2) som är ovanliga slingrande sprickor ifyllda med karbonatmineral. Dessa skulle kunna representera utsläpp av metan från underliggande organiska sedimentlager.

Port Askaig-tilliten omfattar hela 47 glaciala avlagringar. Såväl vattenavsatta tilliter (bild 4) som marina sediment med droppstenar förekommer. Ovanpå några av de glaciala avlagringarna förekommer pseudomorfer efter polygonala iskilar (bild 1) samt frostsprängda stenar (bild 3) vilka båda tyder på isfria men kalla förhållanden.

Formationen *Bonahaven Dolomite* har tolkats vara en *cap carbonate*. I formationen förekommer dolostenar, stromatoliter (bild 7) och pseudomorfer efter gips (bild 5) vilka

Bild 4: Granitbumlingar i Port Askaig-tilliten på Garvellachöarna.

Bild 5: Pseudomorfer efter gips i *Bonahaven Dolomite*-formationen på Islay.

Bild 6: Linda Löwhagen studerar en israft i *Great Breccia* på Garvellachöarna.

Bild 7: Omkring 10 cm stora stromatoliter i tvärsnitt i *Bonahaven Dolomite*-formationen på Islay.

Bild 8: En dolosten med järnformationer på Garvellachöarna. Dolostenen har tolkats som en *cap carbonate* men tolkningen är osäker

alla tyder på att karbonaterna avsatts antingen i ett grunt hav eller på land i ett mycket varmt klimat. En extremt negativ kol-13-anomali finns också i dessa bergarter.

Dramatiska klimatförändringar

Baserat på åldersbestämning går det inte att bestämma vilken av de två glaciationerna Sturtian eller Marinoan som Port Askaig-tilliten representerar. Mitt i formationen ligger *Great Breccia* som är ett flera hundra meter tjockt lager med upp till hundra meter stora israfter (bild 6). Ovanpå denna ligger en mäktig dolosten som innehåller järnformationer (bild 8). Om dessa bergarter representerar en *cap carbonate* skulle Port Askaig-tilliten kunna representera båda episoderna av snöbolls jord.

Sekvensen på Islay och Garvellachöarna visar på dramatiska klimatförändringar under neoproterozoikum. Karbonatformationerna ovanpå, under och mitt i Port Askaig-tilliten tyder på att ett mycket varmt klimat rådde när dessa bildades. Men själva de glaciala avlagringarna tillsammans med förekomsten av polygonala iskilar och frostsprängda stenar tyder på ett kallt klimat. Vad som är oklart är om förändringarna har varit tillräckligt snabba för att kunna överensstämja med is-albedoeffekten som ingår i *Snowball Earth*-hypotesen.

Att Port Askaig-tilliten består av så många glaciala avlagringar (47 stycken) som alternerar med andra, icke-glaciala bergarter (t.ex. sandstenar, lerstenar och dolostenar) pekar på en istid som liknar den nu pågående istiden med upprepade nedisningar kopplade till måttliga temperaturförändringar snarare än en snöbolls jord. Men den abrupta övergången från kalkstenar till glaciala avlagringar tillsammans med de extremt negativa kol-13-anomalierna stödjer hypotesen om en snöbolls jord. Frågan är för närvarande inte definitivt besvarad.

En Snowball Earth i framtiden

Avslutningsvis kan det vara intressant att spekulera om ifall en snöbolls jord skulle kunna inträffa i framtiden. Svaret på detta är troligtvis nej. Den neoproterozoiska världen saknade växter på land men förekomsten av sådana idag utgör i sig ett eget regleringssystem för Jordens temperatur. Den globala uppvärmning som pågår nu gör också en framtida snöbolls jord mindre sannolik.

Men man kan inte utesluta att om man börjar leka med Jordens albedo genom att pumpa ut svaveldioxidpartiklar i stratosfären genom s.k. *geoengineering* så skulle detta kunna medföra oförutsedda risker. Vi har trots allt bra bevis för att temperaturregleringen i Jordens klimatsystem kan ha slutat fungera åtminstone en gång tidigare i Jordens historia. ♦



Läs mer

Hoffman, P.F. & Schrag, D.P. 2002. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova* 14, 129–155.

Hoffman, P.F. 2009. Pan-glacial – a third state in the climate system. *Geology Today* 25, 100–107.



Alasdair Skelton är professor i geokemi och petrologi vid Institutionen för geologiska vetenskaper, Stockholms universitet.



FOTON: MAGNUS IVARSSON.

Kan magmatiska bergarter vara fossilförande?

TEXT: MAGNUS IVARSSON, STEFAN BENGTSON & DIANA CARLSSON

Förekomsten av fossil är lika starkt sammankopplad till sedimentära bergarter som magmatiska bergarter är till frånvaron av fossil. Detta har varit ett obestridbart faktum sedan geovetenskapernas gryning. Men nu börjar detta synsätt att ändra sig. Forskare vid Naturhistoriska riksmuseet utforskar ett fossilt arkiv som påträffas i sprickor och håligheter i magmatiska och vulkaniska bergarter. Detta kan spela stor roll framöver för studiet av djupbiosfären och det tidiga livet på jorden samt även för sökandet efter liv på Mars.

VI I SVERIGE som har förmånen att bo på en relativt diversifierad berggrund vet klart och tydligt skillnaderna mellan fossilförande och icke-fossilförande berggrund. Fossil hittar man i sedimentära bergarter. Magmatiska bergarter däremot är bildade under förhållanden som inget liv överlever och innehåller därför inga spår av liv i form av fossil.

De flesta sedimentära bergarter representerar gammal havs- eller sjöbotten och innehåller därför fossila rester av organismer som en gång levde i eller på sedimenten, eller som har sedimenterat ur vattenkolumnen. Somliga sedimentära bergarter är uppbyggda av organismrester, t.ex. kritkalksten eller Gotlandskalksten. Sedimentära bergarter karaktäriseras ofta av sitt fossila eller organiska

Bild 1: Spårfossil i vulkaniskt glas från kuddlava på havsbotten, Emperor Seamount.

Bild 2: Borrkärna från Emperor Seamount.

Bild 3: Öppet hålrum med fossiliserat svampmycel.

Bild 4: Uppförstoring av en del av svampmycelet i bild 3 som visar lämningar av symbiotiska prokaryoter i form av mikrostromatoliter som vuxit på mycelet.

PROKARYOTER OCH EUKARYOTER

Allt liv på jorden är indelat i tre domäner: bakterier, arkéer och eukaryoter.

Prokaryoter utgörs av de två domänerna bakterier och arkéer. Prokaryoter definieras som mikroorganismer, vanligtvis encelliga, som saknar cellkärna och cellmembran och har sin arvs massa fritt i cellen.

Eukaryoter utgör den tredje domänen av liv. Till skillnad från prokaryoter har eukaryoter sin arvs massa i en cellkärna avgränsad av cellmembran. Domänen inbegriper rikena djur, växter, svampar och ett stort antal huvudsakligen encelliga grupper ("protister").

FOTO: MAGNUS IVARSSON.



innehåll, och kan få informella namn från detta, som ortoceratitkalksten.

Magmatiska bergarter däremot bildas ur bergarts-smältor med temperaturer som närmar sig eller överstiger tusen grader Celsius och många gånger på stora djup. Detta utesluter förekomsten av liv och följaktligen av fossil. Eller? Höga temperaturer, magmor och stora djup i manteln är förvisso ingen miljö för liv, men utesluter det helt och hållet att fossil går att finna i magmatiska bergarter? Nej, faktiskt inte. Fossil är vanligare än man tror, men de kommer då inte från tiden för bergartens tillkomst. I stället hittar man rester av liv som levt i sprickor och hålrum efter det att berget svalnat och spruckit upp.

Djupbiosfären

Den så kallade djupbiosfären lever och frodas i öppna porutrymmen i alla typer av bergarter, inte minst kristallin berggrund. Det svenska urberget kan kanske framstå som en död och steril miljö vid en första anblick, men faktum är att grundvattnet som sipprar genom sprickor gör det möjligt för mikroskopiskt liv att migrera genom och kolonisera de djupa delarna av berget. Detta är något som studerats länge vid bl.a. Äspölaboratoriet i Oskarshamn.

Men den svenska berggrunden är inget undantag. Mikroorganismer förekommer i berggrunden världen över, både på kontinenterna och i de djupa oceanbottenarna. På 5 km djup i Sydafrikanska gruvor har mikroskopiska prokaryoter och eukaryoter hittats. Till och med

nematoder, som tillhör djurriket, har påträffats där och visat sig vara anpassade för ett liv på djupet.

Att de marina sedimenten innehåller liv har vi vetat under flera decennier men nu har liv även påträffats på stora djup i de underliggande vulkaniska bergarterna, ett område som volymmässigt utgör jordens största mikrobiella habitat. De geokemiska förhållandena är gynnsamma för snabb mineraltillväxt och bidrar därför till goda förutsättningar för fossilisering av mikroorganismer. Detta resulterar i ett rikt fossilt arkiv i dessa spricksystem.

Fossil i magmatiska bergarter

Mångfalden av liv i spricksystemen speglas i den rika morfologiska variationen av fossil som går att finna där (bild 1–3). Svampmycel har visat sig lätt kunna mineraliseras och fossiliseras och tenderar att dominera hålligheterna. Fossila rester av prokaryoter är också vanliga, men de kan vara svårare att upptäcka och tolka. Ett välbevarat svampmycel av hyfer i ett tätt och komplext nätverk kan ses med blotta ögat (bild 3). Prokaryoters lämningar däremot kräver mikroskop eller svepelektronmikroskop och ibland ännu mer kraftfulla instrument som synkrotronbaserad röntgentomografi för att se och studera (bild 4–6).

Kategorier av fossil

Generellt kan man dela upp det fossila arkivet i magmatisk berggrund i två huvudtyper: spårfossil och fossila mikroorganismer. Den första kategorin, spårfossil, utgörs av

spår efter mikrobiell aktivitet och upplösning av mineral. Många mikroorganismer producerar organiska syror och komplexbildare som fräter på mineral och lämnar efter sig etsade hålrum. Det kan röra sig om allt från ytliga gropar på en mineralyta till komplexa tunnelsystem djupt inne i ett mineral eller substrat.

Vulkaniskt glas i djuphavens kuddlavor är ett material som mycket ofta påverkas av mikrobiell aktivitet och som uppvisar ett rikt arkiv av mikroskopiska spårfossil, både i modern havsbotten och i äldre. Några av de äldsta tecknen på liv på jorden utgörs av sådana spårfossil.

Den andra kategorin, fossila mikroorganismer, är rester av mikroskopiskt liv som koloniserat sprickor och hålrum och blivit bevarade på plats där de en gång levde (bild 2–8). Mikroorganismer fäster på väggar i sprickor och hålrum och det är där de återfinns som fossil när de slutligen dör och mineraliseras.

Mikroorganismer mineraliserar, vanligtvis som järnoxider eller leror, av vätskor som cirkulerar i berggrunden. Många mikroorganismer faller ut mineral redan under sin livstid som ett resultat av metabolism. Järnoxiderande bakterier faller till exempel ut järnoxider på och i anslutning till sina celler, och svamphyfer faller ut oxalater och leror som fungerar som en första grodd till mineralisering. Denna ökar sedan successivt efter organismens död och leder slutligen till fullständig mineralisering och fossilisering.

Utforskning av djupbiosfären

Att studera fossila mikroorganismer i magmatiska miljöer är ett relativt nytt område inom paleobiologin och det finns mycket kvar att undersöka. Märkligt nog vet man mer om fossila mikroorganismer i den kristallina havsbotten än om sådana i den kontinentala jordskorpan. Men insikten växer om att organismerna i den fossila djupbiosfären kan ge oss väsentlig kunskap.

Ett område är utforskandet av djupbiosfären i områden där det är svårt att provta levande mikroorganismer utan risk för kontamination, såsom havsbotten. Spårfossil i kuddlavor var länge det enda tecknet på att liv existerar i dessa djupa och extrema miljöer. Alla försök att provta levande mikroorganismer från sådana miljöer gick om intet på grund av kontaminerande havsvatten.

Det var med hjälp av fossil man först hittade eukaryoter (svampar i detta fall) i dessa miljöer samt påvisade symbiosförhållanden mellan svampar och prokaryoter. Dessa fynd ledde till att man senare sökte efter och hittade levande svampar i havsbotten. Utan de fossila fynden skulle man nog inte ens ha letat efter svamp där.

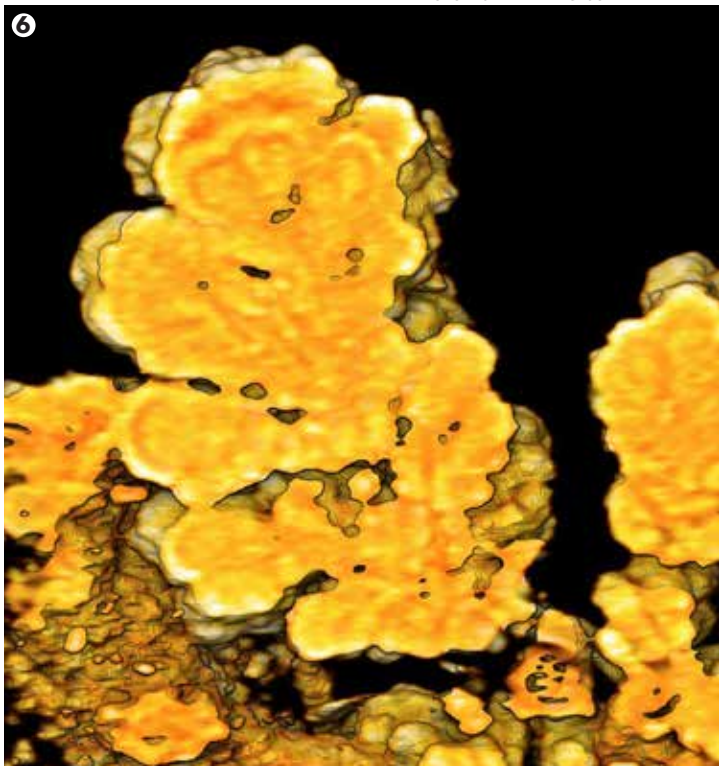
Detsamma händer nu i den kontinentala jordskorpan där fossila fynd av svamp lett till att man med genetiska tekniker metodiskt söker efter och funnit svamp. Paleobiologi kan därför ses som ett pionjärområde inom utforskandet av liv i de magmatiska bergarterna.

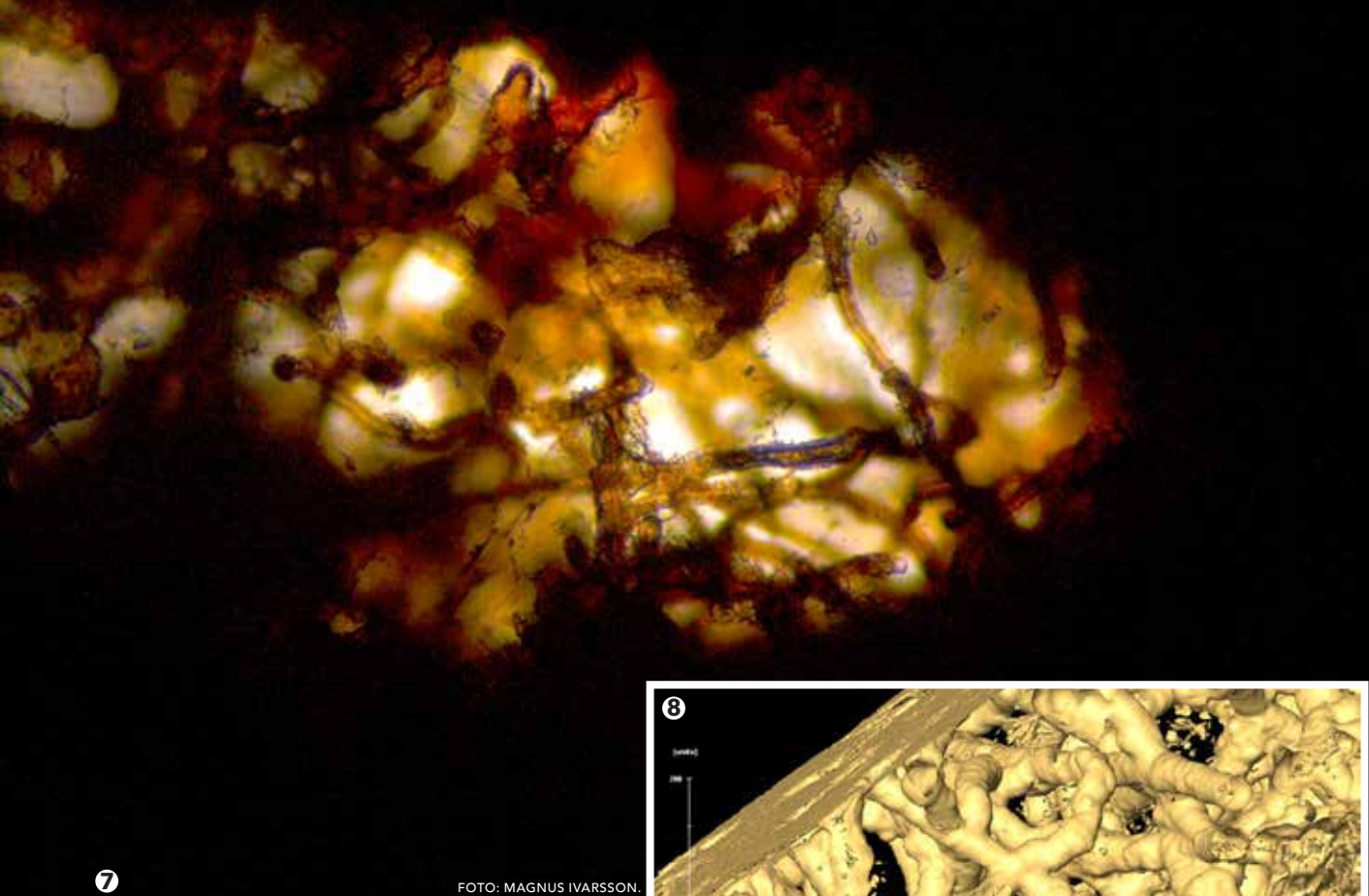
En annan fördel med fossil är förstås att man kan spåra livet bakåt i tiden. Berggrunden, framför allt under havsbotten, var ett tidigt habitat på jorden och därför viktigt att studera ur ett evolutionärt perspektiv. Just nu pågår på Naturhistoriska riksmuseet ett intensivt arbete att utforska ofioliter, gammal havsbotten som av tektoniska

Bild 5: Tomografisk rekonstruktion av samma del av svampmycellet som i bild 4 där hyfernas relation till mikrostromatoliten syns samt ytterligare en symbiotisk prokaryot, nämligen celler som sitter uppspända som nät mellan hyferna. Dessa celler samt även mikrostromatoliterna har tolkats som lämningar av järnoxiderande bakterier eller arkéer.

Bild 6: Tomografisk rekonstruktion som visar en genomskärning av en mikrostromatolit. Den karaktäristiska lagringen är ett resultat av tillväxten och är därför parallell med tillväxtriktningen.

FOTON: STEFAN BENGTSO.





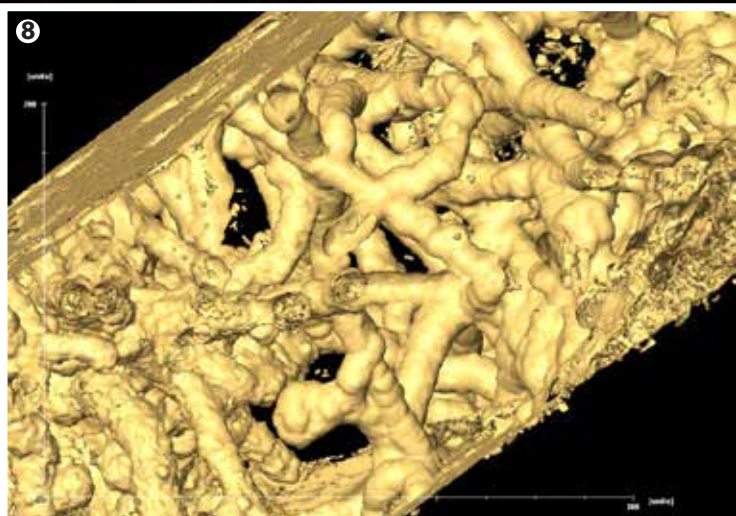
7

FOTO: MAGNUS IVARSSON.

Bild 7: Fossila svamphyfer i ett hålrum i basalt som senare fyllts med calcit.

Bild 8: Tomografisk rekonstruktion producerad med hjälp av synkrotronbaserad röntgentomografi av samma fossila svamphyfer som i bild 7. Bilden visar en genomskärning genom ett tunnslip. Notera den ökade upplösningen och detaljrikedomen jämfört med bild 7 som tagits med optiskt mikroskop.

FOTO: STEFAN BENGTON.



rörelser skjutits upp på land, för att förstå livets utveckling under den tidiga jordens havsbotten.

Liv på Mars

Vilka andra tillämpningar finns för denna typ av fossil? I nära förestående Marsexpeditioner, som till exempel NASA:s Mars 2020 eller ESA:s ExoMars är sökandet efter liv, och framför allt fossilt liv, ett av huvudmålen.

Den dominerande bergarten på Mars är vulkaniska basalter, precis som jordens havsbotten, så studiet av fossila mikroorganismer i havsbotten är av största vikt för de kommande åren för att förstå var, vad och hur man ska söka efter och karaktärisera liv i dessa bergarter.

Arkiv av information om liv och miljö

Ett annat användningsområde är som paleoindikatorer för tidigare förhållanden i berggrunden. Mikroorganismer interagerar med sin närmiljö och kapslar in ämnen och föroreningar i sina celler vilket i många fall blir permanent vid mineralisering och fossilisering.

Genom att studera element- och isotopsammansättning hos mikrofossil och deras nära associerade biomineraliseringsringar kan man få information om mikroorganismernas metabolism, men även om miljön i vilken de levde med hänsyn till vattenkemi, redoxförhållanden, pH m.m.

Fossila mikroorganismer utgör ett rikt arkiv av paleo-information som vi ännu inte kan tolka fullt ut men som har stor potential och kan spela en viktig roll framöver för förståelsen av den djupa miljön i berggrunden. Till exempel kommer vi att kunna utläsa information som kan vara av betydelse för framtida djupförvar av uttjänt kärnbränsle, eller spåra globala miljökatastrofer, som meteoritnedslag, i mikrofossilens sammansättning. ♦



Stefan Bengtson är professor emeritus i paleozoologi, Diana Carlsson är doktorand, Magnus Ivarsson är forskare, samtliga på Enheten för paleobiologi vid Naturhistoriska riksmuseet.



FOTO: NILS JANSSON.

Bergslagen Broken Hill

TEXT: NILS JANSSON, RODNEY ALLEN, STEFAN SÄDBOM & ANDERS ZETTERQVIST

Föga anade nog gränsryttaren Charles Rasp att det var en av världens största och rikaste sulfidmalmer som han stod på när han märkte ut sin inmutning 1883. Fyndet av Broken Hill var startskottet på en ny gruvepok i Australiens historia som skulle hjälpa det unga samväldet att bli en betydelsefull aktör inom världsekonomin och leda till bildandet av världens största gruvbolag, BHP Billiton.

DEN ZINK-, BLY- OCH SILVERRIKA MALMEN vid Broken Hill ansågs vara så unik att den med tiden fick en ny malmtyp uppkallad efter sig – *Broken Hill-typ*. När geologer i Australien under andra halvan av 1900-talet blickade ut i världen i jakt på malmer av samma typ hamnade lupen på Aggeneys-Gamsbergsområdet i Sydafrika och på sulfidmalmen i Bergslagen – i synnerhet malmerna i Zinkgruvan och Stollbergsfältet.

Jämförelsen mellan Bergslagen och Broken Hill har dock knappast vunnit något större gehör bland svenska geologer, även om det så klart är spännande när svenska malmer jämförs med en av världens största sulfidmalmer. Till viss del beror detta på att Broken Hill också är en av de mest svårförstådda och omtvistade malmerna på jorden, och alla är inte överens om vad begreppet *Broken Hill-typ* egentligen innebär.

Till vänster: Laven vid Brownes shaft byggdes på 1890-talet och är den äldsta bevarade på "Main line of lode", benämningen på malmstråket som bröts vid Broken Hill.

Till höger: Tvärsektion genom de olika malmelinerna vid Broken Hill. Enligt den mest accepterade modellen var malmelinerna (bortsett från C) ursprungligen horisontella och parallella med sedimentär lagring. De komplexa geometrierna anses ha uppkommit till följd av tre deformationsfaser.

Många modeller för malmbildning

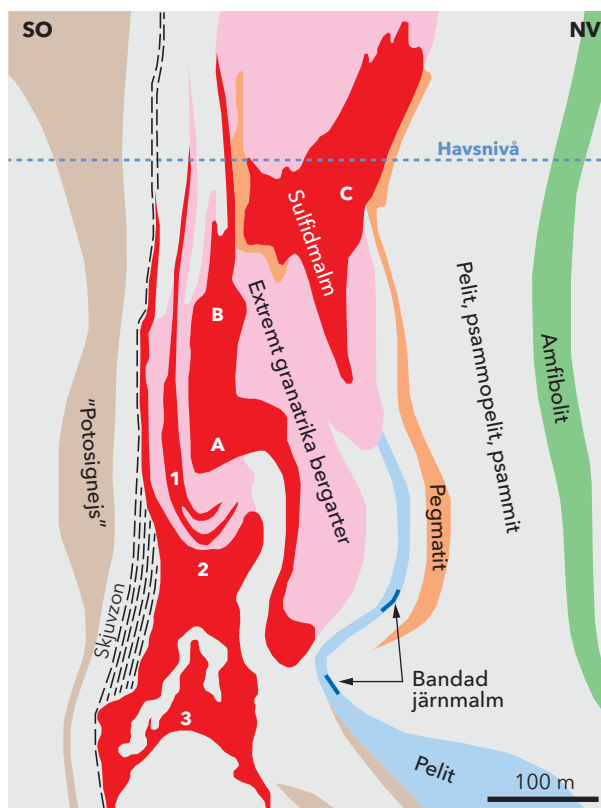
En sammanställning som gjorts av den australiska organisationen CSIRO (*Commonwealth scientific and industrial research organisation*) visar att mer än femtio olika modeller har lagts fram för hur och när själva malmen i Broken Hill bildades, och än idag finns förespråkare för radikalt olika teorier. Dessa inbegriper allt från tidig malmbildning på havsbotten till sen malmbildning i skjuvzoner i samband med deformation och metamorfos. De flera hyllmeter av ofta motsägelsefull litteratur som finns om Broken Hill är en utmaning att plöja sig igenom, även för den mest inbitne.

Att förstå en malms bildningsmekanismer är en grundförutsättning för att kunna ta fram mer avancerade modeller för att kunna förutsäga var och hur nya malmer av samma typ kan hittas. I Bergslagen har mer än 100 år av forskning gjort att vi kommit ganska långt inom detta område, även om många kontroverser har funnits och flera gåtor återstår att lösa. Dessa bleknar dock i jämförelse med de otaliga malmgenetiska kontroverser som har genomsyrat Broken Hills forskningshistoria. Mot denna bakgrund är det kanske förstäeligt att vi känner en viss tveksamhet inför att anamma en malmtyp baserad på Broken Hill. Detta tycks snarare tillfoga en ny flora av malmgenetiska problem och begreppsförvirring till våra redan komplexa malmer än föra oss närmare svaren på hur de bildades.

Metamorfos och deformation döljer ursprung

Men hur lika är då egentligen malmerna? Och hur kommer det sig att geologer kan ha så olika uppfattningar om hur de bildades? I samband med ett Vinnova-finansierat forskningsprojekt om bildningsmiljöer och prospekteringskriterier för stratiforma sulfidmalmer i Bergslagen har en grupp geologer från Luleå tekniska universitet, Zinkgruvan, Boliden och Lovisagruvan med stöd av Knutbergstiftelsen ordnat längre studiebesök med workshops i både Aggeneys-Gamsberg och Broken Hill. I samband med dessa har vi haft möjlighet att se och bilda oss en egen uppfattning om sulfidmalmerna och deras regionala sammanhang. Vi har också kunnat förmedla en modern bild av Bergslagens sulfidmalmer till internationella forskare och tillgodogöra oss den senaste forskningen i respektive område.

Det samlade intrycket är att den främsta likheten mellan Broken Hill, Aggeneys-Gamsberg och Bergslagen också är det som gett upphov till själva problemet – nämligen att malmerna är så omdanade av deformation och metamorfos att deras ursprungliga bildningsbetingelser inte längre är uppenbara. Metamorfos har förgrovat berg-



BROKEN HILL

Längs med ett omkring 8 km långt stråk i New South Wales (Australien) har ungefär 215 miljoner ton sulfidmalm brutits i flera olika gruvor för produktion av zink, bly och silver. Mer än 60 miljoner ton mineralisering är känd från restpartier (t.ex. pelare). Dessa bryts och undersöks idag av två företag i olika delar av fältet.

Broken Hill-malmen förekommer i psammitska till pelitiska ytbergarter som avsattes för mellan 1720 och 1640 miljoner år sedan. Själva malmbildningen anses ha ägt rum för omkring 1690 miljoner år sedan.

Området utsattes för deformation och metamorfos för mellan 1620 och 1575 miljoner år sedan. Bergarterna och malmerna utsattes då för höga temperaturer (700–800 °C) och tryck (5–6 kilobar), vilket gav upphov till stora textuella och mineralogiska förändringar.



arterna och deformation har veckat, skjuvat, sträckt och valsat ut dem – ofta till oigenkännlighet. Den ursprungliga mineralogin har dessutom ersatts av en ofta ganska exotisk metamorf mineralogi som består av mineral som endast bildas vid höga tryck och temperaturer.



FOTO: NILS JANSSON.



FOTO: NILS JANSSON.



FOTO: NILS JANSSON.

I samband med deformation och metamorfos så har dessutom malmmineral flyttats runt (remobiliserats) och t.ex. hamnat i gångar och skjuvzoner som tydligt skär över ursprungliga bergartskontakter och tektoniska foliationer. Detta har ofta fått malmerna att skenbart se yngre ut än vad de egentligen är. I Broken Hill har till och med en del forskare argumenterat för att delar av malmen smälte upp under metamorfosen och bildade sulfidintrusioner. Detta gav upphov till ännu en vetenskaplig kontrovers kring Broken Hill.

Det är denna komplexa historia av överprägling som har gett spelrum för olika tolkningar av hur malmerna har bildats. Geologer har helt enkelt haft olika uppfattningar om vilka av malmernas egenskaper som är kopplade till själva malmbildningen, och vilka som är orsakade av senare metamorfos och deformation.

Olika försök att nysta upp den komplexa geologin med hjälp av tidens geologiska kunskap och långa beviskedjor har dessutom gett olika resultat, dels vid olika tidpunkter, dels hos olika geologer vid samma tidpunkt. Idag är dock den gängse mest accepterade uppfattningen i alla områdena att malmerna ursprungligen bildades på eller nära havsbotten, genom inverkan av varma, metallbärande lösningar.

Malmerna unika från början

Men mysteriet med malmernas bildning slutar inte där. Forskning i alla de tre områdena har nämligen visat att malmerna måste ha varit mer eller mindre unika redan från början med avseende på både sammansättning och bildningsmiljö. Malmerna kan med andra ord inte enkelt förklaras genom deformation och metamorfos av "vanliga" sulfidmalmer bildade i sedimentära och vulkaniska

Till vänster: Rodney Allen studerar ett lager av kvartsrikt metakonglomerat i den kvartsitformation som underlagrar Gamsbergmalmen.

Överst till höger: Patrick Spathelf (på knä) vid Vedanta Resources går igenom Gamsbergsmalmens geologi med gruppen. Stående från vänster: Stefan Sädboom (Lovisagruvan), Rodney Allen (Boliden och LTU), Anja Hagerud (Zinkgruvan), Tobias Kampmann (LTU), Henry Gordon (Vedanta Resources) och Archibald Moses (Vedanta Resources).

Ovan: Kopparkis i magnetit-granat-biotit-kvarts-(klorit)-bergart från Swartberggruvan vid Aggeneys-Gamsberg. Denna är till utseendet mycket lik bergarterna i malmzonen i Stollbergfältet i Bergslagen.

Motstående sida: Kvarts-gahnit-bergart från "lode horizon" vid Hidden Treasure mine, Broken Hill-området.

havsmiljöer. Således är de svårt att placera dem i rådande klassifikationscheman för dessa.

Exempel på unika egenskaper är att sulfidmalmerna i alla de tre områdena är associerade med magnetit-mineraliseringar rika på mangan och ibland även fosfor. Vid Swartberg i Aggeneys-Gamsberg och Stollberg i Bergslagen sitter sulfidmalmerna till och med delvis i magnetitrika järnformationer. Många av sulfidmalmerna är dessutom fattiga på pyrit och magnetkis, och stora mängder zink och bly kan förekomma i icke-sulfidmineral snare än i zinkblände och blyglans. Vid Broken Hill anser t.ex. en del geologer att det finns mer zink i spinellmineralet gahnit (ZnAl_2O_3) än i zinkblände. Gahnit förekommer också i sulfidmalmerna i Bergslagen och Aggeneys-Gamsberg, men inte i samma mängd som vid Broken Hill. Alla malmerna verkar dessutom ha bildats i förhållandevis grunda sedimentationsbassänger ovanpå uttöjd kontinental jordskorpa, med eller utan samtida vulkanism. Detta



FOTO: STEFAN SÄDBOM.

AGGENEYS-GAMBERG

Aggeneys-Gamsberg-stråket i Bushmanland i nordvästra Sydafrika består av fyndigheterna Swartberg, Broken Hill (RSA), Big Syncline och Gamsberg. Dessa har brutits på zink, bly, koppar och silver. Brytningen är idag fokuserad på den omkring 160 miljoner ton stora Gamsbergfyndigheten.

Fyndigheterna ligger i en kvartsitisk, proterozoisk sedimentsekvens som pressades samman mot den arkeiska Kaapvaalkratonen i samband med Namaqua-orogensen för 1000–1200 miljoner år sedan. Liksom vid Broken Hill utsattes bergarterna för metamorfos och deformation, dock vid något lägre tryck (3–6 kbar) och temperatur (630–700 °C). I Aggeneys-Gamsberg har ytbergarternas ålder varit omtvistad, men i nuläget anses malmernas värdbergarter vara avsatta för 1200–1300 miljoner år sedan.



skiljer dem från massiva sulfidmalmer i vulkaniska miljöer, vilka oftast bildas på stora vattendjup.

Visserligen är ingen av dessa egenskaper i sig helt unik för dessa malmer, men kombinationen av dem är ovanlig. Det är delvis detta som har motiverat användningen av specialbegreppet *Broken Hill-typ*, antingen som en egen malmtyp eller som en undergrupp till de

ovanstående malmtyperna. Frågan är dock om begreppet ska ses som en egen malmgenetisk typ, eller som ett samlingsbegrepp för metamorfoserade, komplexa massiva sulfidmalmer som inte riktigt passar in i rådande klassifikationsscheman?

Stora skillnader

Resultaten av vår egen forskning i Bergslagen och de intryck vi fått från resorna är att begreppet *Broken Hill-typ* är missvisande när det används för att avse en specifik malmgenetisk modell (åtminstone utanför Australien). Detta eftersom det är lätt att hitta betydande skillnader mellan malmerna i de tre områdena. Ett exempel är att sulfidmalmerna i Stollbergsfältet liksom många andra sulfidmalmer i Bergslagen bildades när varma och sura lösningar reagerade med kalksten, en bergart som helt saknas vid Broken Hill och Aggeneys-Gamsberg.

I Bergslagen tyder det mesta på att malmerna bildades i en marin miljö, medan modern forskning i Broken Hill visar på att avsättningsmiljön utgjordes av en lakustrin riftbassäng. Ett av argumenten för denna miljö är att det i Broken Hill totalt saknas magnesiumomvandlade bergarter. Detta är annars en klassisk omvandlingstyp kring många av Bergslagens sulfidmalmer som tillskrivits upphettat havsvatten.

Helt olika typer av lösningar

Medan det finns bevis för en koppling mellan vulkanism och malmbildning i Stollbergsfältet så är en sådan koppling omtvistad i Broken Hill och helt obefintlig i Aggeneys-Gamsberg. Vår forskning indikerar dessutom att Zinkgruvan bildades när oxiderade och neutrala,

metallbärande lösningar trängde upp i en reducerad miljö på havsbotten. Denna modell är olik de flesta bildningsmodeller som föreslagits för Broken Hill och Aggeneys-Gamsberg, där malmlosningarna anses ha varit sura och reducerade.

Av större vikt är dock det faktum att den nya forskningen visar att malmerna i Stollbergfältet och Zinkgruvan bildades av helt olika typer av lösningar i helt olika malmbildande system. Ändå har båda två klassificerats som malmer av *Broken Hill*-typ i litteraturen. Detta illustrerar hur problematiskt begreppet *Broken Hill*-typ är när det används internationellt med avseende på en distinkt malmgenetisk modell.

Malmerna allt annat än skolboksexempel

Trots detta finner vi ett värde i begreppet när det används i vidare bemärkelse utan någon malmgenetisk innebörd. Det kan då användas för att skapa en global plattform för diskussion kring komplexa, kraftigt omdanade sulfidmalmer som är rika på zink, bly och silver och som inte helt passar in i rådande klassifikationsscheman.

Den kanske viktigaste läxan vi kan lära oss från Broken Hill är att de största och rikaste malmerna på jorden inte nödvändigtvis behöver vara de bästa skolboksexemplen. Således kan det ibland vara bättre att sortera in malmgeologiska avvikare i en bred, löst definierad grupp än att ignorera dem för att de inte passar in, eller att försöka tvinga in dem i alltför stela klassifikationsscheman. Geologerna i alla områdena ställs dessutom inför samma utmaningar när de försöker se igenom effekterna av deformation och metamorfos.

Det finns således mycket att lära av varandra angående själva arbetssättet och de idéer och metoder som utvecklats i respektive område. I alla områdena är det tydligt att

nyckeln till framgång består i detaljerad, målinriktad kartering i både regional och detaljerad skala kombinerat med holistiska, multidisciplinära geologiska studier. I Australien har man dessutom nått stor framgång genom att hålla debatten om Broken Hill-malmens bildning bred och öppen och låtit proponenter av olika teorier komma till tals. ♦

Läs mer

Haydon, R.C. & McConachy, G.W. 1987. The stratigraphic setting of Zn-Pb-Ag mineralization at Broken Hill. *Economic Geology* 82, 826–856.

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

Jansson, N., Erismann, F., Lundstam, E. & Allen, R.L. 2013. Evolution of the Palaeoproterozoic volcanic-limestone-hydrothermal sediment succession and Zn-Pb-Ag and iron oxide deposits at Stollberg, Bergslagen region, Sweden. *Economic Geology* 108, 309–335.



Nils Jansson är forskare vid LTU. Rodney Allen är adjungerad professor vid LTU och chef för geologi FoU vid Boliden. Anders Zetterqvist arbetar som konsult för Zinkgruvan. Stefan Sädbom är styrelseledamot vid Lovisagruvan.

Nedan: Massiv blyglans med vackra kristaller av rodonit förekommer vid North mine i Norra delen av "Main line of lode" vid Broken Hill.



FOTO: NILS JANSSON.

På gång

30 juni till 2 juli. Ädelstens- och mineralmässa i Ylämaa, Finland.
Läs mer på www.jalokivimessut.fi/pa-svenska/hemsida/

2–7 juli. 28th International Cartographic Conference. Washington, DC, USA.
Läs mer på icc2017.org

3–5 juli. SGU i Almedalen 2017. Bland annat visningar av undersökningsfartyget Ocean Surveyor. Läs mer på www.sgu.se

24–26 juli. Iron Ore 2017. Perth, Western Australia.
Läs mer på www.ironore.ausimm.com.au

5–6 augusti. Sten- & mineralmässa på Falkängen, Kinnekulle.
Läs mer på www.skaraborgsgeologiska.se

13–18 augusti. Goldschmidt 2017. Paris, France.
Läs mer på goldschmidt.info/2017/index

20–23 augusti. SGA: Mineral resources to discover. Québec City, Canada.
Läs mer på sga2017.ca

28 augusti till 1 september. 26th International CIPA Symposium – Digital workflows for heritage conservation. Ottawa, Ontario, Canada.
Läs mer på cipaottawa.org/

9 september. Geologins dag.
Läs mer på www.geologinsdag.nu

FOTO: CURT-ROBERT LINDQVIST.



Res ner i urberget

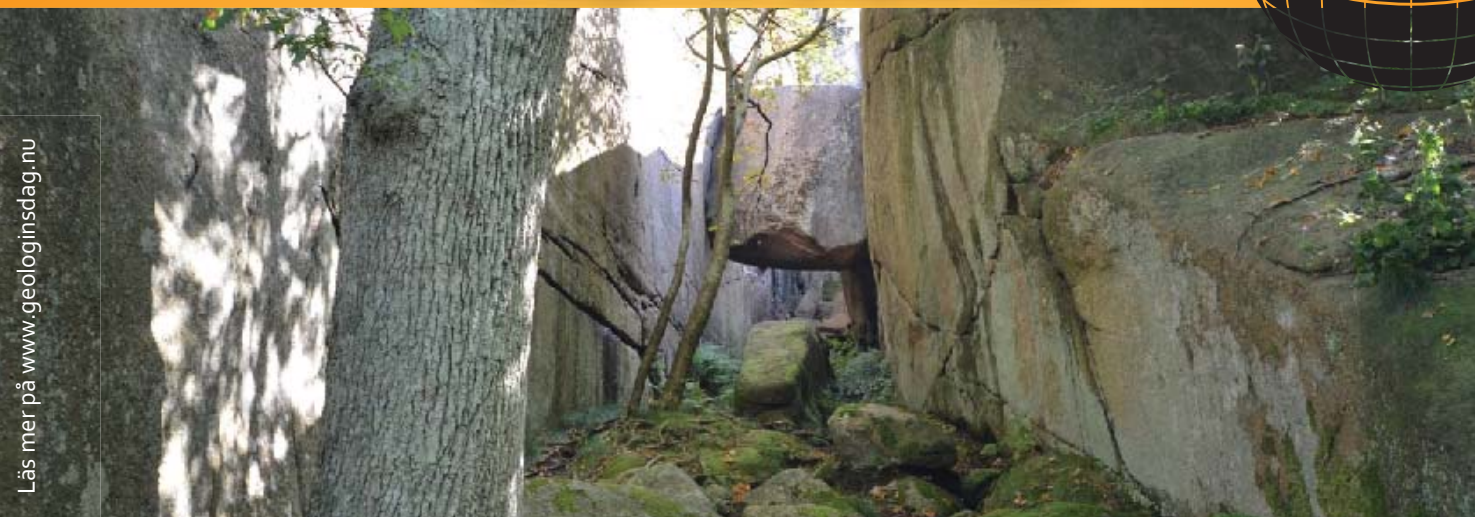
I sommar anordnar SKB besök 500 m ner i Äspölaboratoriet norr om Oskarshamn.

I Äspölaboratoriet forskar SKB om hur man ska bygga ett slutförvar för använt kärnbränsle. Där testas olika tekniska lösningar i full skala och i en verklig miljö. SKB kommer att visa och berätta om hur deras arbete skapar förutsättningar för en säker framtid.

Besöksturer anordnas veckorna 26 och 28–33. Föranmälan krävs. Läs mer och anmäl dig här: www.skb.se/event/guidade-turer-i-aspolaboratoriet-2/

Geologins Dag

lördagen den 9 september



I samarbete med:

Boliden Mineral AB • FAB – föreningen för Aktiva i Borrbranschen • Georange • Geotec
Naturvetarna • Stockholms universitet • Svensk Kärnbränslehantering AB
Sveriges Bergmaterialindustri • Uppsala universitet

SGU
Sveriges geologiska undersökning

SveMin


Naturhistoriska
riksmuseet



Sveriges unika mineralresurser – vem bryr sig?

De senaste åren har anseendet för den svenska gruv- och mineralnäringen hamnat i en rejäl utförlöpa. Näringen gick från att ha varit en bransch som alla viktiga regionala, nationella och globala politiker, beslutsfattare och policymakers såg potentialen i och ville stödja framväxten av, till att ha gett miljöskurken ett ansikte och alltid bli betraktad som boven i dramat. Har någon annan lust att hjälpa till att ändra på den saken?

SISTA ORDET

produktion med en bullrig och dammig gruvscen. När licensfinansierade Sveriges Television producerar spännande drama med serier som *Midnattssol* (2016), *Jordskott* (2015) och *Blå ögon* (2014), lurar alltid rovgiriga gruvägare bakom konspirationen. Med tanke på de konkurser och miljöskandaler några företag inom den svenska gruv- och mineralnäringen gjort sig skyldiga till kanske någon tänker att branschen har sig själv att skylla för att man blivit populärkulturens bad boy.

Parallellt med branschens medialt skamfilade anseende har utvecklingen inom det miljörättsliga området skenat.

NÄR STATLIGA Apoteksbolaget gör reklam i betal-tv för sina hudvänliga kroppsprodukter, illustreras konkurrenternas

Olika EU-direktiv sätter ramar, ibland vagt, ibland mycket preciserat, för hur bl.a. biologisk mångfald, miljö och vatten får påverkas av en exploatering och hur avfallshantering ska ske. Precis som är avsett med direktiv är det upp till varje medlemsstat att själv bedöma på vilket sätt direktivets syfte uppnås i den inhemska lagstiftningen.

Senare års praxis från EU-domstolen och de högsta svenska rättsinstanserna borde inge oro för hur detta hanteras i Sverige när det kommer till snart sagt varje anspråk på markanvändning. Praxisutvecklingen har inneburit ett mycket långtgående hänsynstagande till de intressen som skyddas av EU-direktiven. Det har skett på bekostnad av andra viktiga samhällsintressen, t.ex. etableringen av infrastrukturprojekt, besöksnärlingsanläggningar, bostadsbyggande och mineralutvinning.



Linda Ylivainio, jurist på Bergsstaten 2013–2016, politiskt sakkun-
nig i gruv- och mineralfrågor hos näringsministrarna Maud Olofs-
son och Annie Lööf, teol. stud., riksdagskandidat (C) Norrbotten.

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

Geologiska Föreningen tackar sina sponsorer för 2017

Platinasponsorer

BOLIDEN

L
LULEÅ
TEKNISKA
UNIVERSITET

Guld sponsorer


Stockholms
universitet


UPPSALA
UNIVERSITET


LUNDS
UNIVERSITET


GÖTEBORGS UNIVERSITET



Kosteröarna och
Kosterhavets
nationalpark är väl
värda ett besök,
särskilt sommartid.