



Sveriges geologiska undersökning

FoU-seminarium vid SGU
19–20 april 2010

Dokumentation



FoU-seminarium vid SGU 19–20 april 2010

SGU-rapport
2010:5

SGU-rapport
2010:5

FoU-seminarium vid SGU 19–20 april 2010

Dokumentation

**Sveriges geologiska undersökning
Forskning och Utveckling**

SGU-rapport 2010:5

Förord

SGU har ansvar att med ett anslag på ca 5,5 milj. kr stödja geovetenskaplig tillämpad forskning och riktad grundforskning vid svenska universitet och högskolor. Syftet med FoU-verksamheten är att utveckla och använda nya kunskaper och metoder inom geologin för att bättre kunna tillfredställa samhällets behov och verka för en hållbar utveckling. Det geovetenskapliga innehållet och projektets genomförbarhet bedöms av en av SGU för ändamålet tillsatt FoU-grupp. Denna är sammansatt av representanter för universitet och högskolor på sådant sätt att de olika geovetenskapliga fack- och kompetensområdena är företrädade. Av 30 mottagna ansökningar om ett belopp av 11,7 milj. kr beviljades 6 nya projekt forskningsmedel medan 10 fortsättningsprojekt fick fortsatt finansiering efter godkänd lägesrapportering.

SGU bedriver också egenfinansierad forskning och utveckling. Verksamheten bedrivs i projektform efter ansökan från enskilda medarbetare. Av 65 mottagna ansökningar om ett belopp av 11,8 milj. kr beviljades 31 forskningsmedel. Beviljat belopp uppgick till 4,0 milj. kr.

Bland EU-finansierade projekt 2009 ingick OneGeology Europe och MUSTANG ("A multiple space and time scale approach for the quantification of deep saline formations for CO2 storage").

Under två dagar 19-20 april 2010 presenteras resultat från FoU-projekt med medel ur SGUs Stöd till geovetenskaplig forskning vid universitet och högskolor samt ur SGUs egenfinansierade forsknings- och utvecklingsverksamhet.

Från 2009 är det kostnadsfritt att använda SGU-information i icke-kommersiell forskning.

Under 2009 genomfördes planerna på en omorganisation av SGU och den nya organisationen trädde i kraft den 1 januari 2010. Den innebär en tydlig linjeorganisation med avdelningar som svarar direkt mot användarna. Avdelningar finns för mineralresurser, samhällsplanering, mark och grundvatten, geodata samt Bergsstaten. FoU, Personal, Information och Ekonomi utgör staber. En tydlig förändring för FoU är att projekt utförs inom avdelningarna, där resultaten också kan tas om hand, redovisas och implementeras i verksamheten.

Förslag till examens- och forskningsarbeten läggs ut på SGUs hemsida och SGU-are ställer i detta sammanhang upp som handledare.

Fyra SGU-medarbetare har nominerats till prövning som adjungerade professorer vid fyra universitet/högskolor.

Geovetenskaplig forskning är av central betydelse i ett framtida samhälle. Många av de samhällsaktuella frågor som idag diskuteras har geovetenskaplig bäring. Naturresurser, energi, risker, miljö och hälsa, klimatförändringar etc. berörs i detta sammanhang, frågor som är av nationell, europeisk och global betydelse och avgörande för vår framtid. En större nationell satsning på geovetenskaplig forskning för lösande av dessa för samhället viktiga problem krävs. Därav frågeställningarna i första dagens inledande diskussion med företrädare för olika organisationer: "Hur intensifiera svensk geoforskning och hur kan SGU bidra"?

Uppsala den 26 mars 2010

Lars Persson

Katarina Nilsson

Dag Fredriksson

Olle Selinus

Adresser till externa föredragshållare:

Rodney Allen, Boliden Mineral AB, 936 81 Boliden

Therese Bejgarn, Luleå University of Technology, 971 87 Luleå

Prosun Bhattacharya, KTH-International Groundwater Research Group, Dept. of Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, prosun@kth.se

Kjell Billström, Swedish Museum of Natural History, Box 50 007, 104 05 Stockholm

Curt Broman, Department of Geological Sciences, Stockholm University, 106 91 Stockholm

Mattias von Brömssen, Dept. of Soil and Water Environment, Ramböll Sweden, Box 4205, 102 65 Stockholm, Sweden, mattias.bromssen@ramboll.se

Peter Dahlin, Inst. f. geovetenskaper, Uppsala universitet, 752 36 Uppsala

Lars Dynesius, Inst. f. geovetenskaper, Uppsala universitet, 752 36 Uppsala

Andrea Förster, Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), Germany

Örjan Gustafsson, Dept. of Applied Environmental Science (ITM), Stockholm University

Juliane Hübert, Inst. f. geovetenskaper, Uppsala universitet, 752 36 Uppsala

Gunnar Jacks, KTH-International Groundwater Research Group, Dept. of Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, gunnjack@kth.se

Nils Jansson, Luleå tekniska universitet, 971 87 Luleå

Jochen Kamm, Inst. f. geovetenskaper, Uppsala universitet, 752 36 Uppsala

Karin Lundström, SGI, Linköping

Martin Kruså, Dept. of Applied Environmental Science (ITM), Stockholm University

Laust B. Pedersen, Inst. f. geovetenskaper, Uppsala universitet, 752 36 Uppsala

Håkan Persson, Statens geotekniska institut, 412 96 Göteborg

Laura Sanchez-Garcia, Dept. of Applied Environmental Science (ITM), Stockholm University

Håkan Sjöström, Inst. f. geovetenskaper, Uppsala universitet, 752 36 Uppsala

Michael Schieschke, Inst. f. geovetenskaper, Uppsala universitet, 752 36 Uppsala

Marcus Svensson, Dept. of Soil and Water Environment, Ramböll Sweden, Box 4205, 102 65 Stockholm, Sweden, marcus.svensson@ramboll.se

Pär Weihed, Luleå University of Technology, 971 87 Luleå

Sveriges geologiska undersökning

Jenny Andersson

Mehrdad Bastani

Sören Byström

Ingemar Cato

Mikael Erlström

Mattias Göransson

Niklas Juhojuntti

Josef Källgården

Annika Lindblad

Lena Maxe

Lena Persson

Gerhard Schwarz

Michael B. Stephens

Bo Thunholm

Mats Wedmark

Helena Whitlock

SGU, Box 670, 751 28 Uppsala

www.sgu.se

Omslagsbild: Övergivet gruvhål, Svalbard. Foto Lars Persson, SGU

Program för FoU-seminarium vid SGU 19–20 april 2010

Presentation av resultat från FoU-projekt med medel ur SGUs stöd till geovetenskaplig forskning vid universitet och högskolor samt SGUs egenfinansierade forskning och utveckling
Plats: SGUs hörsal, Villavägen 18, Uppsala

Måndag 19 april 2010

09.00–09.10 *Öppning, Jan Magnusson*

Forskningsdiskussion: "Hur intensifieras svensk geoforskning? Kan SGU bidra?"

Ordförande: Jan Magnusson

Geologin griper in i varje persons vardag. Ändå saknas medvetenheten om detta i samhället. Genom de kontakter SGU har nationellt och internationellt vill SGU bidra till att finansieringsbasen för den svenska geovetenskapliga forskningen totalt utökas. Intensifiering av EU-finansierade projekt är också angeläget.

09.10–09.25 Björn Sellberg, Formas
09.25–09.40 Lena Svendsen, Vinnova
09.40–09.55 Peter Wikberg, SKB
09.55–10.10 Carl-Otto Frykfors, ITEC/Vinnova

10.10–10.30 KAFFE

10.30–10.45 Göran Bäckblom, MITU
10.45–11.00 Pär Weihed, LTU
11.00–11.15 Chris Juhlin, UU
11.15–11.30 Jan Bida, Minfo/Per Murén, NCC Roads
11.30–11.45 Diskussion

11.45–12.45 LUNCH

Ordförande: Katarina Nilsson

12.45–13.10 Rodney Allen/Nils Jansson: The origin of iron ores in Bergslagen and their relationships with polymetallic sulphide ores.

13.10–13.35 Håkan Sjöström/Peter Dahlin: Structure and stratigraphy of the Dannemora iron deposit.

13.35–14.00 Pär Weihed/Therese Bejgarn: New styles of intrusive related gold mineralization in northern Sweden.

14.00–14.25 Kjell Billström/Curt Broman: Zn–Pb breccia ores in the "Gold Line", Storuman area: temporal and genetic relationships of a new type of deposits.

14.25–14.50 KAFFE

Ordförande: Lars Persson

14.50–15.15 Michael Stephens: Timing and migmatization in three separate tectonic domains Sveco-karelian orogen, south-eastern Sweden.

15.15–15.40 Mikael Erlström: Koldioxidlagring i djupa akvifärer – möjligheter, risker och utvecklingsläge.

15.40–16.05 Gerhard Schwarz: Bergvärmemetodik för framtagning av värmeledningskartor.

Tisdagen den 20 april 2010

Ordförande: Dag Fredriksson

- 09.00–09.40 Inbjuden inledningstalare Executive director Anders Berntell, SIWI (Stockholm International Water Institute), Stockholm: Vatten, nästa klimatfråga – en global översikt.
- 09.40–10.15 **Magdalena Thorsbrink/Gustav Sundén/Bo Thunholm:** Möjligheter att utveckla SGUs grundvattennät med stöd av modellberäkningar – så möter vi behoven av en utökad nivåövervakning.
- 10.15–10.40 KAFFE
- 10.40–11.05 **Håkan Persson/Karin Lundström:** Grundvattennivåer i slutna akviferer i Sverige.
- 11.05–11.30 **Bo Thunholm:** Rumslig modellering av grundvattnets rörelse och nivå.
- 11.30–11.55 **Lena Maxe:** Grundvattnets kemiska tillstånd i Sverige.
- 11.55–12.55 LUNCH

Ordförande: Olle Selinus

- 12.55–13.20 **Prosun Bhattacharya:** Arsenic in groundwater in northern Sweden.
- 13.20–13.45 **Örjan Gustafsson:** Account of Black Carbon (BC) in the Swedish marine sediments: How significant is BC burial as a net sink in the national carbon budget? Is BC governing the geospatial distribution of Carcinogenic PAHs?
- 13.45–14.10 **Juliane Hübner/Laust Pedersen:** RMT med kontrollerad källa.
- 14.10–14.35 KAFFE
- 14.35–15.00 **Niklas Juhojuntti:** Kombinerad modellering av data från resistivitets – och RMT-mätningar samt refraktionsseismik för att förbättra den hydrogeologiska tolkningen.
- 15.00–15.25 **Lena Persson:** Detection and mapping of anisotropy in quick clays using electrical resistivity measurements.
- 15.25–15.50 **Mats Wedmark:** Modifiering, optimering av MRF mjukvara för flygmätning.

The origin of iron ores in Bergslagen and their relationships with polymetallic sulphide ores

NILS JANSSON & RODNEY ALLEN

Introduction

Several magnetite deposits displaying variable spatial relationships to sulphide ores occur in the Garpenberg supracrustal inlier of northern Bergslagen, Sweden (Fig. 1). A research project was initiated as a PhD-project in 2007, aimed at studying the spatial and temporal relationships between the different deposit types. This presentation summarizes results obtained from studies in the areas around Ryllshyttan, Smältarmossen and Lappberget (Fig. 1). The magnetite deposits in the Garpenberg inlier show different relationships to the sulphide ores and have here been grouped into four main categories. The magnetite deposits display features that are of general interest to base metal sulphide exploration in the region and these features will be discussed in the following sections. All volcanic rocks, intrusions and limestone in the following description have undergone ductile deformation and amphibolite facies metamorphism, and are in fact metavolcanics, metagranitoids, amphibolites and marbles. However, to emphasize primary features, the 'meta'-prefix has been dropped.

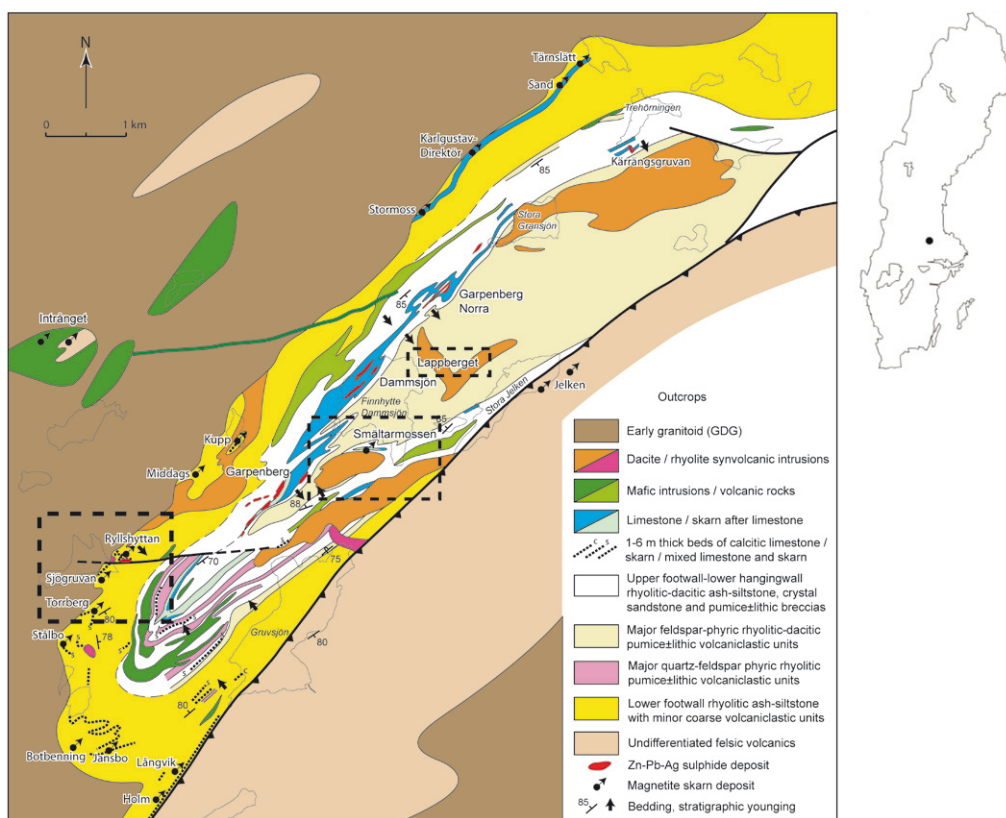


Fig. 1. Regional geological map of the Garpenberg area. Modified after Allen et al. (2003). Outlined names denote mines and ore fields. The three studied areas within the Garpenberg area have been outlined as dashed boxes.

Hydrothermal-exhalative iron formations of the lower Garpenberg footwall

Regionally extensive stratiform iron formations occur in Garpenberg's lower footwall (Fig. 1). Although relatively iron-rich, only minor mining has occurred as they are magnetite poor and most iron occur in garnet, clinopyroxene and epidote in skarn beds that are interbedded with fine-grained rhyolitic sediments.

The deposit type is described by Jansson (2009), who concludes that they are metamorphosed stratiform iron formations with a component of detrital rhyolitic material. The skarn bed protoliths are interpreted to have been calcareous-ferruginous sediments, accumulated below wave-base during times of low volcaniclastic sedimentation. The iron is interpreted to be hydrothermal, based on REE patterns, and to have been supplied from hydrothermal plumes or brine pools. Metamorphism to skarns is interpreted to have occurred before regional D₂ deformation.

Post-depositional alteration has affected some beds, expressed by lateral variations in mineralogy and composition. In the hydrothermal alteration envelope of Ryllshyttan (Fig. 2), the skarn beds have recorded Mg-enrichment, forming metamorphic progenitors for pargasite-almadine rocks. More distal, the rocks have recorded Mn-enrichment, forming metamorphic progenitors for quartz-spessartine rocks. These post-depositional modifications are seen in certain beds, outside zones of pervasive alteration at Ryllshyttan and may serve as indicators of proximity to zones of strong hydrothermal alteration related to base metal sulphides.

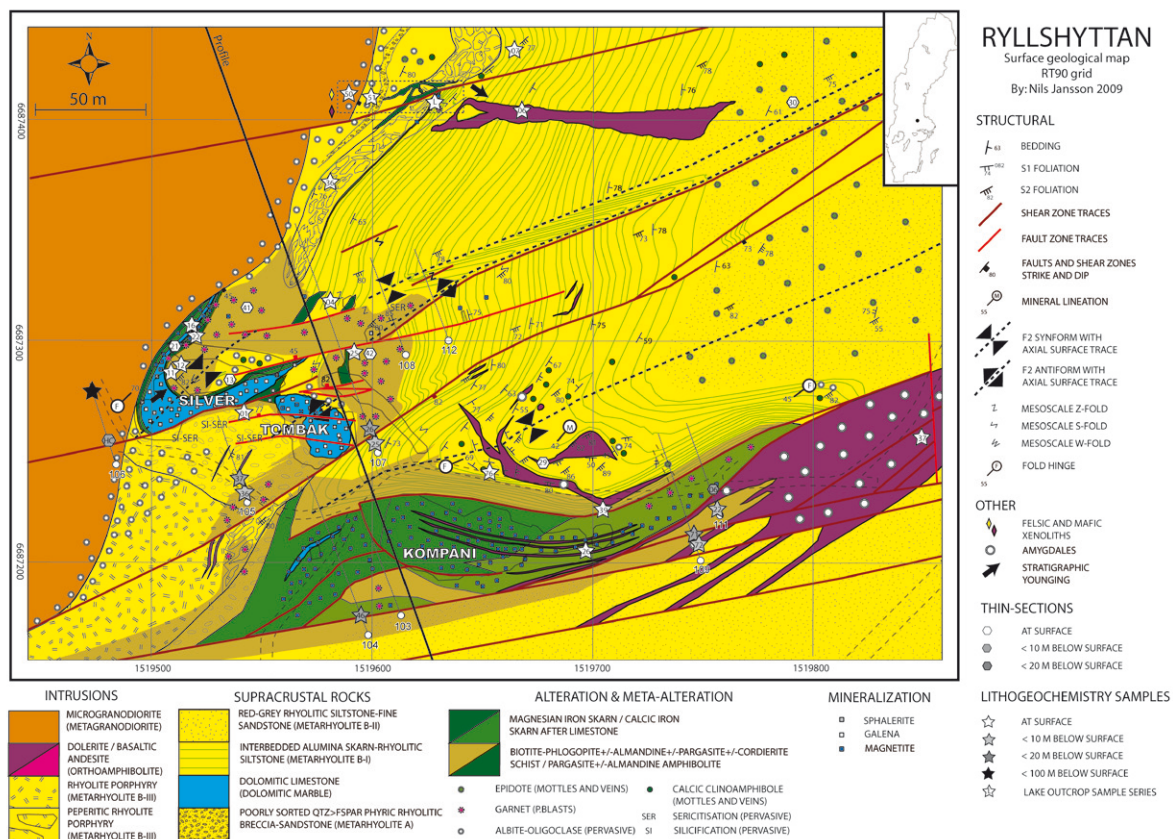


Fig. 2. Geological surface map of the Ryllshyttan deposit (Jansson, 2009).

Stratabound magnetite-sphalerite deposits – Ryllshyttan

Ryllshyttan is a formely mined stratabound Zn-Pb-Ag-(Cu) + magnetite deposit in the lower footwall of the Garpenberg deposit (Fig. 1). It is hosted by a folded, strongly skarn-altered and dolomitized original limestone surrounded by altered rhyolitic volcanic rocks (Fig. 2, Jansson 2009). Ore formation has been constrained to have occurred epigenetically temporally between the emplacement of syn-volcanic rhyolite porphyry intrusions and a microgranodiorite intrusion based on hydrothermal alteration related to ore formation cross-cutting the former but not the latter (Fig. 2). These intrusions have yielded SIMS zircon U-Pb ages of 1895 ± 4 Ma and 1894 ± 4 Ma, respectively, bracketing ore formation to the same time interval. The

alteration envelope of Ryllshyttan records the earliest tectonic fabrics, suggesting syn-volcanic ore formation by sub-seafloor carbonate replacement.

Hydrothermal fluids appear to predominantly have flowed along lithological boundaries such as bedding planes and intrusive contacts. Rhyolitic and mafic units are altered to almandine and cordierite porphyroblastic biotite-quartz schists. These are interpreted as medium grade metamorphic equivalents of the chlorite-sericite altered volcanic rocks associated with VMS-type deposits.

The chemistry of the altered carbonate unit mirrors that of the altered volcanic rocks, suggesting the two alteration types to be related. Skarn textures suggest a complex regional metamorphic evolution where skarn formation in already altered lithologies was essentially isochemical on the scale of the entire deposit, yet clearly involved metasomatism and remobilization of earlier formed sulphides and iron oxides on a smaller scale. Indeed, the configuration of Ryllshyttan's sulphide ore bodies relative to the tectonic outline suggests significant syn-tectonic remobilization in conjunction with folding and shearing. Alternatively, the earliest skarns must have formed already at a syn-volcanic stage in conjunction with ore formation prior to regional metamorphism.

Whereas sulphides in all instances cross-cut magnetite ore, no evidence for a significant hiatus between iron oxide and sulphide mineralization has been found. Both may have formed during different stages of a single hydrothermal event. Compared to similar but sulphide-barren magnetite deposits at the same stratigraphic level, Ryllshyttan is distinct in its hydrothermal alteration envelope, involving strong K-Mg-Fe-Mn \pm Si enrichment of volcanics.

Stratabound magnetite-galena deposits – Lappberget

The stratabound Lappberget ore body of the Garpenberg deposit is one of Bergslagen's largest sulphide ores. It is a blind ore hosted mainly by strongly dolomitized, silicified and skarn-altered limestone in a major F_2 domal anticlinal structure (Allen et al. 2003). A previously unknown magnetite mineralization in the Lappberget ore body is currently under investigation. The magnetite mineralization comprises stratabound magnetite-galena > pyrrhotite-chalcopyrite with a gradational relationship to the currently mined sphalerite-galena > pyrite-chalcopyrite ore. The magnetite-galena mineralization displays the same features indicative of an epigenetic origin as the mined sulphide ores (cf. Allen et al. 2003). Besides a zonation in ore mineralogy, a zonation in skarn mineralogy is also observed from the sphalerite-galena to the magnetite-galena ores, involving an increasing garnet content and increasing Fe and Mn contents in clinopyroxene gangue.

The magnetite mineralization occurs in an over 200 m thick zone in the culmination of the Lappberget dome and thins out along its limbs. The massive sulphide ore bodies are predominantly found structurally and stratigraphically below the magnetite mineralization. Due to the gradational relationship between the two mineralization types, the magnetite-galena mineralization forms an interesting potential vector for deep-seated blind sulphide ores of the Lappberget type and stimulates an interest in formerly mined Mn-rich magnetite ores where high galena contents have been observed.

Stratabound intrusive-associated magnetite deposits – Smältarmossen

This type of magnetite deposit has only been encountered at the Smältarmossen mine where it was formerly mined. The deposit is hosted by an andradite-clinopyroxene dominated skarn formation at the contact between rhyolitic sandstone and stratigraphically overlying former limestone (Fig. 3). The limestone horizon is stratigraphically equivalent to the host of most Garpenberg ore bodies including Lappberget, yet sulphides are only accessory at Smältarmossen.

The mineralization and associated skarns display a strong spatial affinity to feldspar-porphyrific apophyses from a syn-volcanic dacite porphyry intrusion in the footwall of Smältarmossen (Fig. 3). The apophyses are commonly skarn-altered adjacent to mineralization. The footwall rhyolites and the main porphyry body are sodic-altered and epidote-hornblende-clinopyroxene \pm garnet-veined. Felsic rocks proximal to the ore zone display intense alteration to skarns of epidote, hornblende, clinopyroxene, and garnet. Though the alteration minerals have commonly completely replaced the igneous mineralogy of affected rocks, primary

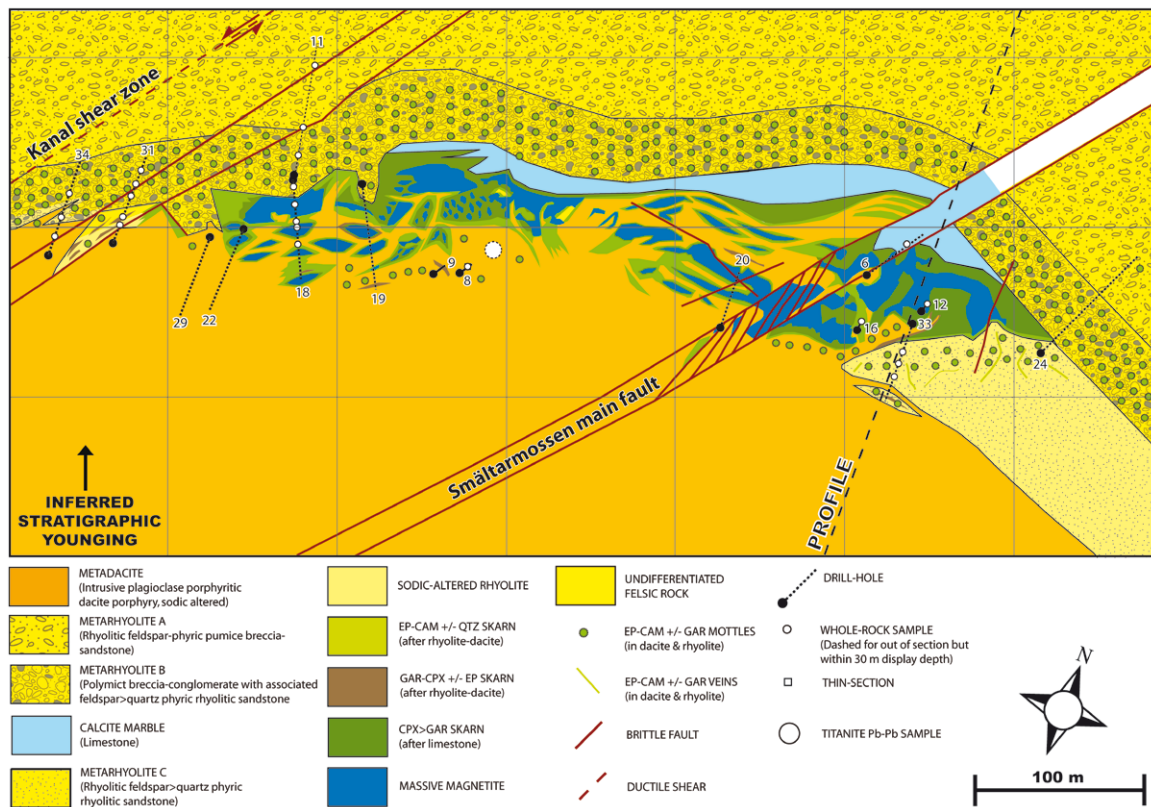


Fig. 3. Geological map of the 223 m level of the Smältarmossen mine based on core-logging, old mine plans and internal Boliden Mineral data.

textures are still locally recognizable and testify to igneous protoliths of some of the Smältarmossen skarns. The limestone is extensively replaced by mainly magnetite and clinopyroxene with accessory andradite, epidote and calcic clin amphibole.

The gross deposit-scale mineralogical zoning in the main skarn zone involves increasing clinopyroxene/garnet ratio as well as a subtle increase in Mn-content in clinopyroxenes from the lower to upper contact of the skarn zone. Deposit-scale garnet zonation is more complex, but involves a general increase in andradite vs. andradite-grossular solid solution from the stratigraphic footwall towards the marble front and a general temporal increase in grossular component in garnets.

Regional exploration by Boliden Mineral AB and field mapping indicate that the magnetite ore formed epigenetically by replacement of a pure calcitic limestone. The timing of skarn formation is, however, uncertain. Skarns may have formed during amphibolite facies regional metamorphism of chlorite, epidote, calcite and actinolite associations related to ore formation. This may place Smältarmossen in the same category as some Andean intrusive-related magmatic-hydrothermal iron oxide formations related to sulphide mineralization (cf. Haller & Fontboté 2009). The geological setting, textural characteristics and mineralogical and lithochemical zoning is, however, also consistent with a contact metasomatic origin for the iron ore, with the porphyry acting as a causal intrusion. The porphyry is co-magmatic with granite and microgranodiorite that have yielded SIMS U-Pb zircon ages of 1895 ± 3 and 1894 ± 4 Ma respectively.

Conclusions

Magnetite deposits in the Garpenberg area show different relationships to sulphides. The stratiform magnetite deposits represent the oldest type, predating epigenetic sulphide deposits in the area and recording alteration related to sulphide ore formation. The epigenetic deposits of Ryllshyttan and Lappberget display

many features suggesting that iron oxides and sulphides formed during different stages of single hydrothermal events. Both are accompanied by zones of strong hydrothermal alteration, involving strong K-Mg-Fe-Mn ± Si enrichment of volcanic rocks. The Smältarmossen deposit is a unique type of epigenetic magnetite mineralization in the area, differing in its setting relative to intrusions and style and chemistry of alteration. It may be related to the emplacement of a dacite porphyry intrusion into limestone.

References

- Allen, R. L., Bull, S., Ripa, M. & Jonsson, R., 2003: Regional Stratigraphy, Basin Evolution, and the setting of stratabound Zn-Pb-Cu-Ag-Au deposits in Bergslagen, Sweden. *Final report for SGU-FoU project 03-1203/99*, jointly funded by SGU and Boliden Mineral AB.
- de Haller, Antoine. & Fontboté, L., 2009: The Raúl-Condestable Iron Oxide Copper-Gold Deposit, Central Coast of Peru: Ore and Related Hydrothermal Alteration, Sulfur Isotopes, and Thermodynamic Constraints. *Economic Geology*, vol. 104, 365–384.
- Jansson, N., 2009: The origin of the Ryllshyttan stratabound Zn-Pb-Ag-(Cu) + magnetite deposit, Garpenberg, Bergslagen, Sweden. *Licentiate thesis, Luleå University of Technology, ISSN: 1402-1757*, 37 pp.

Structure and stratigraphy of the Dannemora iron deposit

HÅKAN SJÖSTRÖM & PETER DAHLIN

Dannemora inlier är belägen ca 50 km norr om Uppsala och består av ca 1,9 Ga metaryoliter och underordnat metadaciter, tillsammans med marmor som ställvis är malmförande och omgivet av metagranitoider. Trots överpräglade deformation och metamorfos är bergarterna i Dannemoraområdet bland de bäst bevarade metavulkaniterna i Bergslagen. De uppvisar typiska drag för pyroklastiska flödesavsättningar dvs. avsaknad av sortering eller lagring, rikligt med pimpstenar och fragmenterade fenokrister. Omlagrade varianter tyder på de avsattes ovanför vågbasen eller avsattes på land och senare översvämmades då marken sänktes. Stratigrafin är indelad i en undre enhet med endast metavulkaniter som är exponerad i antiktinalen väster om Gruvsjön (fig. 1) och i en övre enhet där dels metavulkaniter men även marmor med järnmalm påträffats i Dannemorasynklinalen.

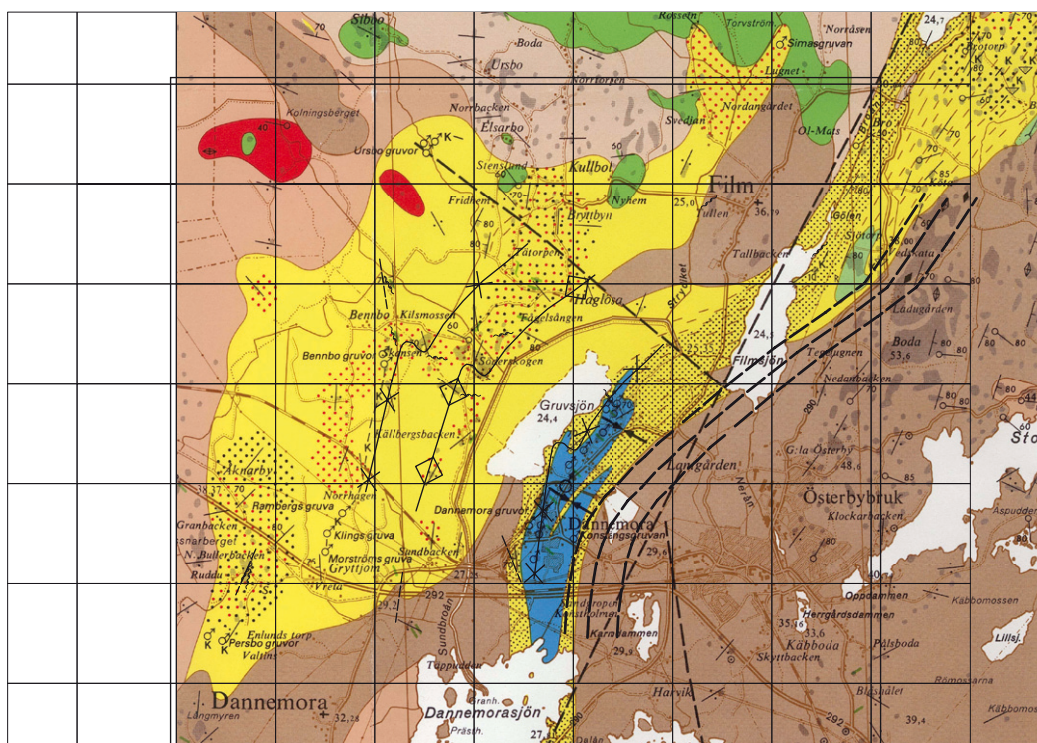


Fig. 1. Karta över Dannemora inlier. Tre axialplan är markerade: Dannemorasynklinalen i öster, Bennbosynklinalen i väster med mellanliggande antiktinal. De streckade linjerna öster om Dannemorasynklinalen är norra förlängningen av Österbybruk–Vattholma deformationszon. Rutnätet är 1x1 km. Legend gul = metavulkanit, blå = marmor, brun = metagranitoid, grön = metabasalt/gabbro, röd = post-tekonisk granit. Från skannade berggrundsdaten Af 166 Östhammar NV. 1988. © Sveriges geologiska undersökning (SGU). D-nr: 30-2169/2007.

Den primära avsättningstemperaturen varierar från het i den undre enheten till svalare i den övre enheten. Glasiga delarna av pyroklastiska avsättningarna är termodynamiskt instabila och ersätts av kristaller s.k. devitrifiering. Sfüruliter som består av kristobalit och/eller fältspat är exempel på devitrifieringsprodukter som bildas vid temperaturer som överstiger glasomvandlingstemperaturen som för ryolitiskt glas är ca 500°C. Sfüruliter har påträffats vid mikroskopianalyser av prover från undre enheten (fig. 2A). I de övre delarna av stratigrafin har det i utbrottsprodukterna bevarats den ursprungliga formen hos glasfragment och pga. utbliven kompaktion under hög temperatur s.k. svetsning och/eller högtemperaturdevitrifiering. Istället har lågtemperaturomvandling resulterat i sericitaggregat där den typiska formen av glasfragment, dvs. flikig och kanter som är konvexa inåt, har bevarats. Detta är troligen inte en primär omvandling, utan först ersättes fragmenten av lermineral som i sin tur omvandlades till sericit under metamorfosen. Exemplet som visas

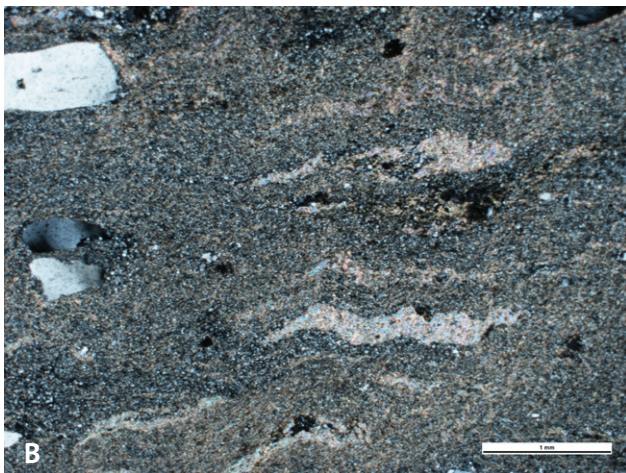
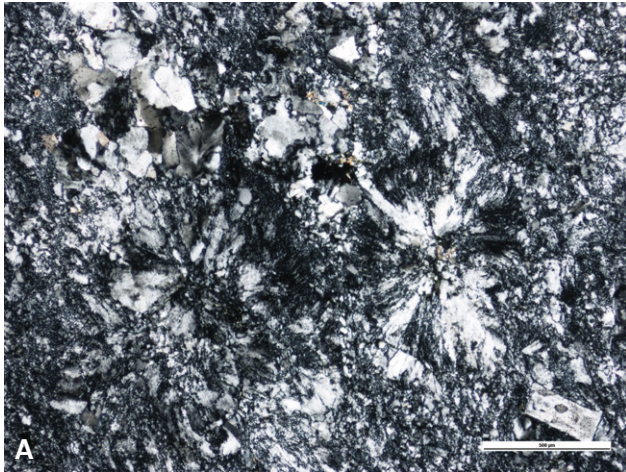


Fig. 2. A – sfärliter från den undre enheten. B – Sericitaggregat som ersatt glasfragment som är ett tecken på lågtemperaturomvandling. I detta fall har inte den primära formen bevarats utan de har blivit kompakterade under diagenesen och tektoniskt deformerade, tydligt i kreneleringen.

nedan (fig. 2B) är sericitaggregaten tillplattade, troligen parallellt med lagringen (S_0) som senare krenelerades genom tektonisk deformation.

Två kilometer väster om Dannemora i området Bennbo (fig. 1) är den övre delen av stratigrafien exponerad. Här finns en ca 60 meter lång O–V profil som är signifikant ur både stratigrafisk och strukturell synvinkel. I profilen med brant stupande lager påträffas en mängd sedimentära strukturer, t.ex. korsskiktning, erosionskanaler, deformation av mjuka sediment såsom vattenflyktstrukturer och veckning. De visar stratigrafiskt uppåt åt öster och således i den västra skänkeln av en synklinal och en häll har påträffats med motsatt uppåtstruktur dvs. åt väster. Vattendjupet och sedimentkälla måste ha varierat eftersom kornstorlekarna varierar från grus till silt-ler. Möjliga källor till de klastiska sedimenten är en närliggande vulkan, kontinent och vulkaniska utbrottsprodukter. Den senare är uppenbar i förekomsten av osorterade lager med kvartskorn och både devitrifierade pimpstenar och fiamme (kompakterade pimpstenar). Vissa horisonter är anrikade på magnetit i siltiga-leriga delar och när det blir tillräckligt tätt mellan dessa horisonter bildar de bandad järnformation (BIF). I dessa BIF-lager förekommer Ba-haltig fältspat, hyalofan, med omkring ca 8 vikt% barium. Baserat på Ba-halten så bildades sannolikt dessa hyalofankrystaller under diagenesen. Om det finns någon koppling mellan hyalofan och BIF i detta fall är inte ännu klarlagt.

Åt alla riktningar utom åt öster är kontakterna mellan metavulkaniter och granitoider magmatiska. I öster är kontakten starkt tektoniserad i form av en skjuvzon som är den norra förlängningen av Österbybruk-Skyttorpzonen (ÖSZ) (fig. 1). Vid formlinjetolkning så syns effekterna av skjuvzonens rörelser <1000 m in i de deformerade metavulkaniterna och metagranitoiderna. Det bör nämnas att alla kontakter mellan metavulkanit och metagranitoid som karterats i fält visar tecken på mer eller mindre skjuvning, om än med mindre tektoniskt påverkade bergarter än ÖSZ.

Strukturellt har två regionala foliationer identifierats: S_1 och S_2 , samt en lokal S_3 . S_1 är i huvudsakligen parallell med S_0 som stryker mellan N–S och NO–SV och stupar brant åt V. S_1 är tät och definieras av sericit och klorit. Tydligaste F_1 strukturen är den isoklinalveckade malmförande Dannemorasynklinalen. S_2 är mest påtaglig i bergarter med strökorn av kvarts och benämns som grain shape fabric (GSF). Den är brant och stryker mellan VNV–OSO och NV–SO med z-veckning av S_0/S_1 som resultat. S_3 har inte definierats och kan inte kopplas till några storskaliga strukturer. Sammanfattning av identifierade och tolkade geologiska händelser i Dannemora inlier finns i tabell 1.

Tabell 1.

Geologisk händelse	Foliation	Lineation	Veck	Fas
Vulkaniterna + kalksten avsätts samt intrusion av graniterna	S_0		Synsedimentära veck	Extensionsfas
(?) Extension och intrusion av diabas (?)		Möjlig, kopplad till kontakterna, men överpräglad av den tektoniska lineationen		Extensionsfas?
D_1	S_1 tät, definieras av sericit/klorit. Parallell med axialplan till F_1	Möjlig, horisontell och parallell med veckaxel till F_1	F_1 Isoklinala, N–S strykande och med branta axialplan	Kompressionsfas
(?) Extension och intrusion av diabas (?)		Möjlig, kopplad till kontakterna, men överpräglad av den tektoniska lineationen		Extensionsfas?
D_2	S_2 GSF, gles och tydligast i strökornsförande bergarter	L_2 Sträcknings- och skärningslineation mellan S_1/S_2	F_2 Asymmetriska, z-veck	Kompressionsfas: bildning av veck och skjuvzoner
D_3	S_3 Lokal			Okänd

De metamorfa förhållandena har uppskattats genom deformationsmekanismer och petrografi. Tolkning av deformationsmekanismer såsom bulging och sub-grain rotation i bl.a. kvarts från skjuvade bergarter har temperaturen tolkats att understiga 500 °C. Petrografen i metadiabaser består av är epidot + klorit + aktinolit ± albit-oligoklas ± titanit. Oligoklas dyker upp som metamorft mineral vid övergången mellan grönskiffer- och amfibolitfacies som är vid cirka 500 °C. Mikrosondanalyser av amfibolerna visar att de är extremt kalciumrika och majoriteten av dem är aktinolit som bildas under grönskifferfaciesförhållanden. P-T-bestämningar cirka 20 km O och NO om Dannemora inlier, har givit temperaturer överstigande 500 °C och eftersom ÖSZ har en östra blocket uppåt komponent resulterar det i ett djupare snitt österut och således högre temperaturer.

De 17 geokemiska analyserna av gångbergarter plottar som basalt till pikrobasalt och de sju metavulkaniterna som ryolit till trakyt i TAS-diagram (fig. 3A). Diskrimineringsdiagram baserat på spårelement (visas inte) plottar metavulkaniterna dock tydligt i fältet för dacit. Endast sju, minst omvandlade, metavulkanit-analyser är utvalda för att representera ytbergarterna. Vid normalisering av metadiabaserna mot kondrit (fig. 3C) så uppvisar de tyngre sällsynta jordartsmetallerna en anrikning i förhållande till de lättare och med en svag topp i europium. En negativ anomali av Nb i det mantelnormaliserade diagrammet (fig. 3D) tyder på att den basaltiska magman har blivit kontaminerad av kontinental skorpa. Detta är förenligt med den tektoniska miljön baserat på Ta/Yb mot Th/Yb där metadiabaserna sprider mellan ”active continental margin” (ACM) och ”within-plate volcanic zone” (WPVZ) (fig. 3B) och metavulkaniterna plottar väl inne i fältet för ACM.

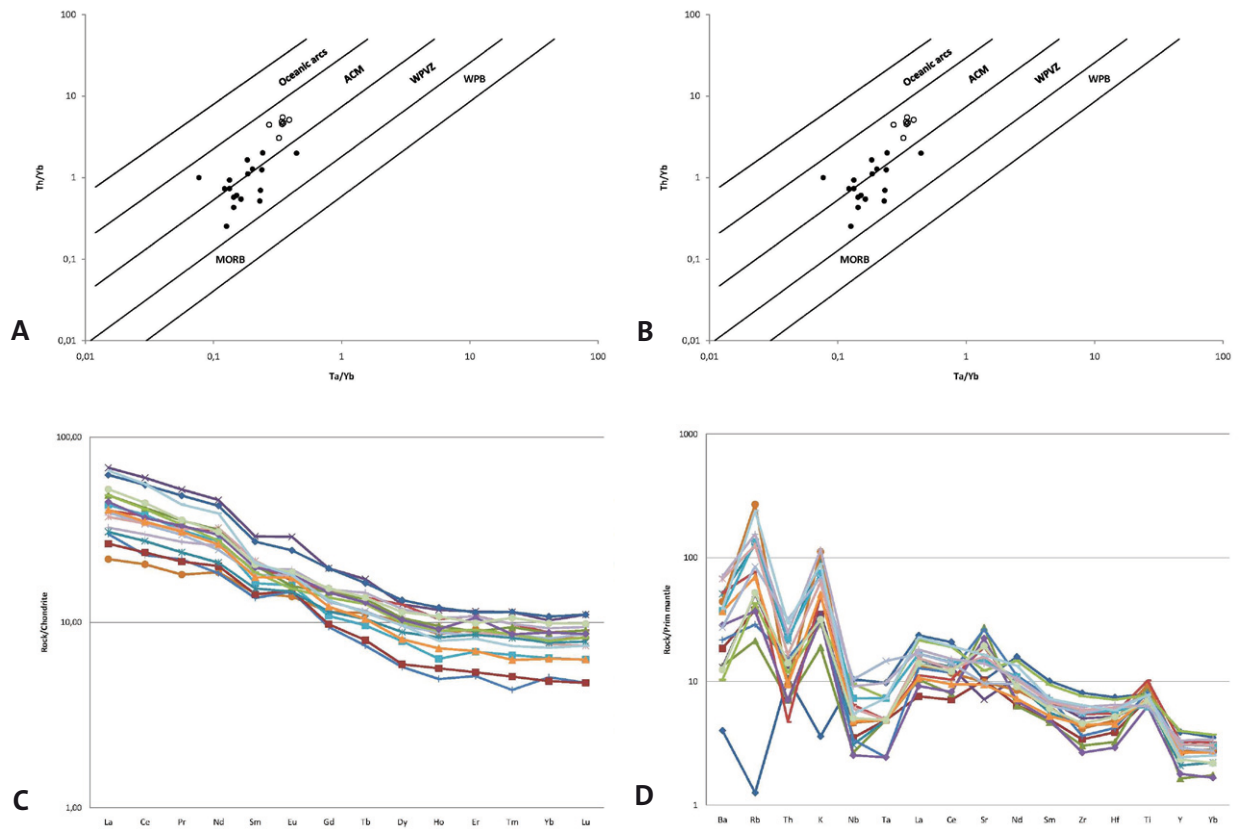


Fig. 3. A – TAS-diagram. B – Tektoniskt diskrimineringsdiagram baserat på Ta/Yb mot Th/Yb. Fyllda cirklar är metadiabaserna och tomma cirklar är metavulkaniter. ACM = active continental margin, WPVZ = within-plate volcanic zone, MORB = middle ocean ridge basalt, WPB = within plate basalt. C – Koncentrationer av sällsynta jordartsmetaller hos metadiabaserna normaliserade mot kondrit. D – Koncentrationer av spårämnen hos metadiabaserna normaliserade mot mantelvärdet.

New styles of intrusion-related gold mineralization in northern Sweden

T. BEJGARN & P. WEIHED

Mining has occurred in the Skellefte district, northern Sweden, since the 1920's after the discovery of the anomalous gold-arsenic rich Boliden deposit, followed by the discovery of more than 70 sub-economic to economic VMS type deposits since the 1950's. The majority of these ~1890 Ma VMS deposits are hosted by a complex volcanosedimentary rock sequence, interpreted to have been deposited in an island arc environment situated behind a northward dipping subduction zone (c.f. Billström & Weihed 1996). The Palaeoproterozoic Jörn Granitoid Complex (JGC) situated north of the Skellefte district has been interpreted as a synvolcanic and early orogenic intrusion, and is divided into 3–4 different generations based on geochemistry and age (Wilson et al. 1987; González Roldán et al. 2006). The oldest unit, the ~1.88 Ga GI of the JGC is the most heterogeneous and primitive, whereas younger units, ~1.87 Ga GII, and ~1.86 Ga GIII, are progressively more felsic and evolved in character (Wilson et al. 1987, González Roldán 2010). While the JGC has been the subject of several petrogenetic and geochronological studies related to the origin of the batholith and its relationship to the VMS ores (c.f. Wilson et al. 1987; Billström & Weihed 1996; González Roldán et al. 2006), it is however less known that the heterogeneous GI unit of the JGC hosts several different styles of mineral deposits, discovered during drilling campaigns carried out by Boliden Mineral AB during the past 40 years.

The main study area, the Tallberg–Älgräsk area (Fig. 1), is situated in the southern rim of the JGC, close to the contact to the volcanosedimentary succession of the Skellefte district. The Palaeoproterozoic Tallberg porphyry Cu-Au-Mo deposit (c.f. Weihed & Schöberg 1991) is hosted by a tonalite of the GI, with disseminated and quartz vein stockwork sulphides associated with mainly propylitic and phyllic alteration and steeply dipping NE striking quartz-feldspar porphyritic (QFP) dykes (Fig. 1 & Fig. 2a) dated at c. 1886 Ma (Weihed & Schöberg 1991). Immediately northeast of the Tallberg Cu-deposit, a steeply dipping, NE striking ultramafic-mafic dyke (Fig. 1) crosscuts the JGC at Älgliden (referred to as the Älgliden dyke). The dyke is approximately 50 m wide and 3 km long, and contains disseminated magnetite, pyrrhotite, chalcopyrite, pentlandite, minor pyrite and gold. Pyrite is more common within 10 m from the contact, which is replaced by pyrrhotite towards the centre of the dyke. Except for the dissemination, a 0.5 m massive lens of sulphides is present in the central-lower part of the dyke, comprising a similar sulphide mineral assemblage found as disseminations in the dyke. The Älgliden dyke crosscuts stockwork mineralisation of Tallberg type, and has a preliminary baddeleyite age of 1876 Ma.

The Älgräsk Au(-Cu) deposit situated approximately 3 km east of the Tallberg deposit (Fig. 1), is mainly hosted by a coarse grained quartz-porphyritic granodiorite, and not genetically related to the tonalite host rock in Tallberg. Mineralisation occurs as veins and disseminations of mainly pyrite with locally abundant arsenopyrite, chalcopyrite, sphalerite and minor electrum within a proximal silicic to phyllic hydrothermal alteration and distal propylitic hydrothermal alteration in close vicinity to deformation zones (Fig. 2b & Fig. 2c). Geochemical data suggest that hydrothermal alteration associated with mineralisation in the granodiorite caused addition of Si, Fe and K together with a significant increase in Au, Te, Cu, Zn, As and loss of Ca and Na. Gold alloys and telluride minerals such as petzite, tellurobismuthinite, krennerite, volynskite and hessite occur intergrown within fractures, along grain boundaries or as inclusions in pyrite and/or arsenopyrite and less common by together with quartz and phengite. Besides propylitic, phyllic and silicic alteration associated with mineralisation, sodic-calcic and quartz destructive alteration are spatially related to the mineralisation. **These styles of alteration is generally characterised by enrichment in Na (\pm Ca) and depletion of mainly Si, K and base metals.** The mineralisation crosscuts gabbroic rocks and quartz-feldspar porphyritic dykes suggested to be related to the porphyry dykes and tonalite host rock in Tallberg. All the studied deposits are crosscut and in places displaced by unmineralised mafic dykes, suggested to be of at least two generations of mafic dykes present in the Älgräsk area. Deformation within the mafic dykes suggests that at least one phases of ductile deformation is post-mineralisation.

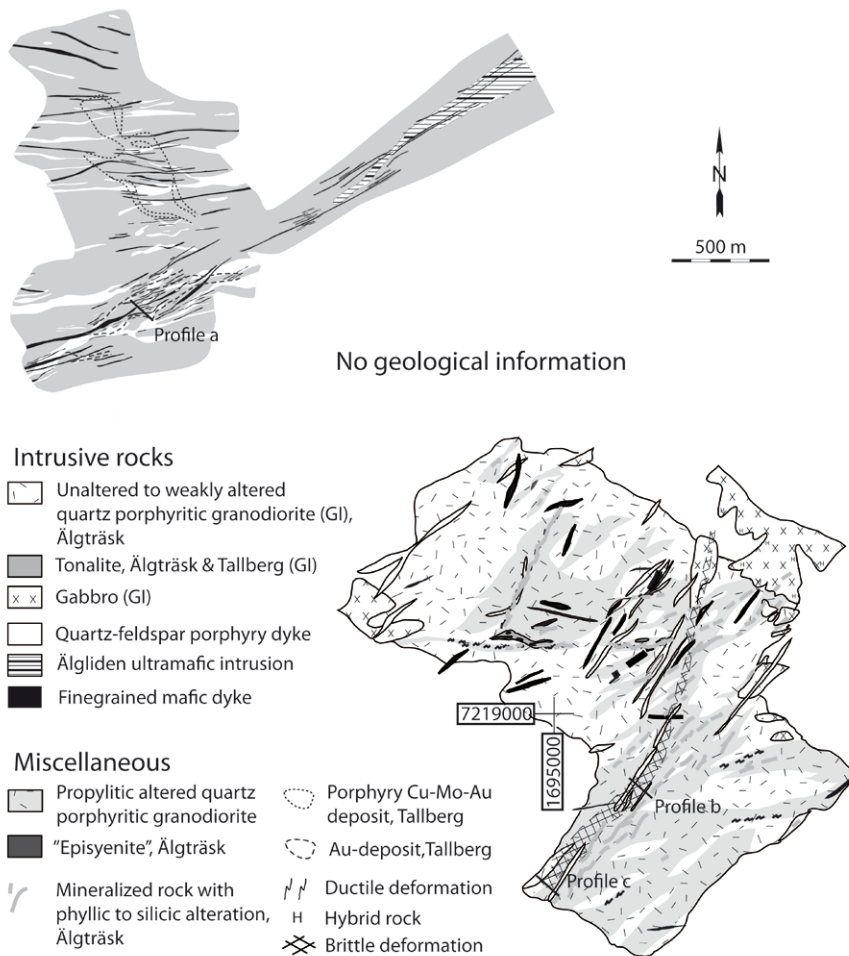


Fig. 1. Geological map of the Tallberg-Älgräsk area. Modified after Weihed & Schöberg 1991, Årebäck 2005.

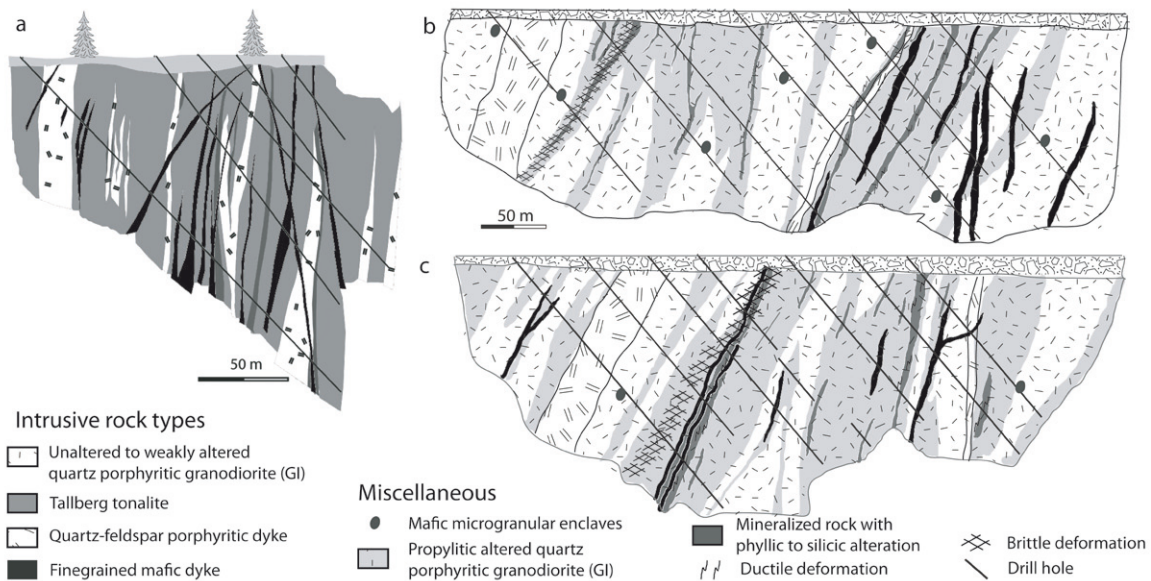


Fig. 2. Interpretations from drill core logging of the Tallberg-Älgräsk area. (a) Cross-section from the "gold-zone" in Tallberg. Locations for profiles shown in Fig. 1, location a. (b and c) Cross-section through the Älgräsk Au-deposit showing the steeply dipping mineralized zones crosscutting a porphyry dyke, crosscut by mafic dykes. Location shown in Fig. 1, location b and c.

The mineralising fluids at Älgträsk are suggested to have been channelled by structurally weak zones in the upper crust where deposition of sulphide minerals was followed by precious metals. Structural interpretations suggest that the Au-deposit in Älgträsk is hosted by D₂ and D₃ structures and thus is younger than the porphyry Cu-deposit in Tallberg. The mineralizing event(s) must have taken place before the emplacement of the mafic dykes, and before the tectonic event causing subsequent deformation of these dykes. The Älgträsk deposit shares many characteristics with both the shallow level hydrothermal and orogenic models, e.g. the alteration mineralogy, metal enrichment and structural control. The metal enrichment in Älgträsk (Au, Ag, Te, Zn, and Cu) and zonation (silicic, phyllic, propylitic) with a proximal addition of mainly Si and K and loss of Na and Ca are characteristic of epithermal deposits. Together with the style of mineralisation and associated alteration at the Älgträsk deposit, it resembles either intrusion related Au-systems or shallow level epithermal systems often developed above younger Phanerozoic porphyry Cu-deposits. Alternatively, ductile deformation took place during subsequent tectonic events, likely causing remobilization of sulphide minerals and precious metals, e.g. from a deeper lying porphyry style mineralisation, forming an orogenic style mineralisation.

References

- Årebäck, H., 2005: Geology and gold mineralisations in Älgträsk: results from 2004–2005 exploration. *New Boliden, Internal Exploration Report, 2005-18*, 38.
- Billström, K. & Weihed, P., 1996: Age and Provenance of Host Rocks and Ores in the Paleoproterozoic Skellefte District, northern Sweden. *Economic Geology* 91, 1054–1072.
- González Roldán, M.J., Allen, R.L., Donaire, T. & Pascual, E., 2006: Secuencia de Emplazamiento, Alteración Hidrotermal y Metamorfismo en el Complejo Intrusivo de Jörn, Distrito Minero de Skellefte, Norte de Suecia. *Geogaceta* 40, 115–118.
- González-Roldán, M.J., 2010: Mineralogy, Petrology and Geochemistry of syn-volcanic intrusions in the Skellefte mining district, Northern Sweden. *Unpublished Ph.D. thesis, University of Huelva, Spain*.
- Weihed, P. & Schöberg, H., 1991: Age of Porphyry-type deposits in the Skellefte District, northern Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholms Förhandlingar* 113, 289–294.
- Wilson, M.R., Sehlstedt, S., Claesson, L.-Å., Smellie, J.A.T., Aftalion, M., Hamilton, P.J. & Fallick, A.J., 1987: Jörn: an early proterozoic intrusive complex in a volcanic-arc environment, north Sweden. *Precambrian Research* 36, 201–225.

Rift-related, structurally controlled Zn-Pb breccia ores in the Lycksele–Storuman ore district (“Gold Line”), northern Sweden

KJELL BILLSTRÖM & CURT BROMAN

Introduction

A new target was identified in connection with prospecting work during the 1970-ties, when several gold occurrences were discovered in an early Proterozoic region west of the Skellefte (VMS) district. Subsequently, the term “Gold Line” was coined to decipher an approximately 40–50 km wide and well over one hundred km long zone trending NW–SE (Fig. 1). This elongated zone is situated between the Caledonian (0.5–0.4 Ga) margin in the west, where a number of economically important sandstone-hosted Zn-Pb ores are located, and the more easterly situated Early Proterozoic (1.9 Ga) Skellefte ore district (SOD). This gold-anomalous zone carries a range of different ore types, including orogenic gold occurrences, VMS deposits, U and Sn-W mineralisation, and the subject of this study; the Zn-Pb breccia-style deposits.

The origin of the Zn-Pb breccia ore type has remained uncertain, and for instance there was no attempt to genetically categorize the mineralisations at Svärträsk and Ersmarksberget in the recently published memoir of the Skellefte district and surrounding areas (Kathol & Weihed, 2005). It is noteworthy, however, that many of the salient features of MVT-type deposits (saline and low T ore fluids, presence of hydrocarbons, brecciation structures, Zn-Pb-F mineral assemblages) are present also in the current occurrences, although the depositional environment is clearly different. In the study area, ore-bearing structures have been observed to cut across deformation fabrics developed as part of the late-stage Svecofennian evolution which sets an upper limit for ore formation at ca. 1.8 Ga. On the other hand, the relatively short distance (7–20 km) to the Caledonian border could hypothetically indicate a temporal relationship with Caledonian deformation events that peaked at ≥ 0.4 Ga. Another hypothesis would relate Zn-Pb breccia occurrences to Permian rifting episodes known from e.g. the Oslo rift further to the south-west, or to older, late Proterozoic to early Cambrian rifting related to the opening of the Iapetus Ocean. The current investigation on a number of Zn-Pb breccia-style deposits has been focused to fluid inclusion and isotopic (Pb, Sr and Nd) analyses. Furthermore, the Rb-Sr dating method for direct dating of sphalerite has also been applied in the study.

Geological background

Four different Zn-Pb breccia occurrences (Ersmarksberget, Svärträsk, Gubbträsk and Lagbäcken) have been studied, and are all found in the northern part of the LSOD; Lycksele–Storuman ore district (Fig. 1). Some datings have been carried out on rocks within the LSOD (see Kathol and Weihed, 2005), and generally the bedrock formed in the ca. 1.96–1.8 Ga age range. Apart from the 1.8 Ga old granitoids (of the Revsund-, Sorsele- and Skellefte-Härnö suites, which have suffered only a weak metamorphic over-print), all lithologies have been subjected to amphibolite facies metamorphism. Basically, the geological situation is similar in all sub-areas; mineralized, brittle structures occur in Early Proterozoic greywackes and to a lesser extent in similarly aged volcanic rocks. Ore minerals comprise fracture fillings forming NE–SW to N–S trending zones that cross-cut ductile structures in rocks interpreted to be Svecofennian in age. Sphalerite and galena dominate with subordinate fluorite and calcite as gangue phases. Alteration is essentially totally lacking. As all studied occurrences have common geological features, they are considered to comprise a single ore type that represents a common ore-forming event.

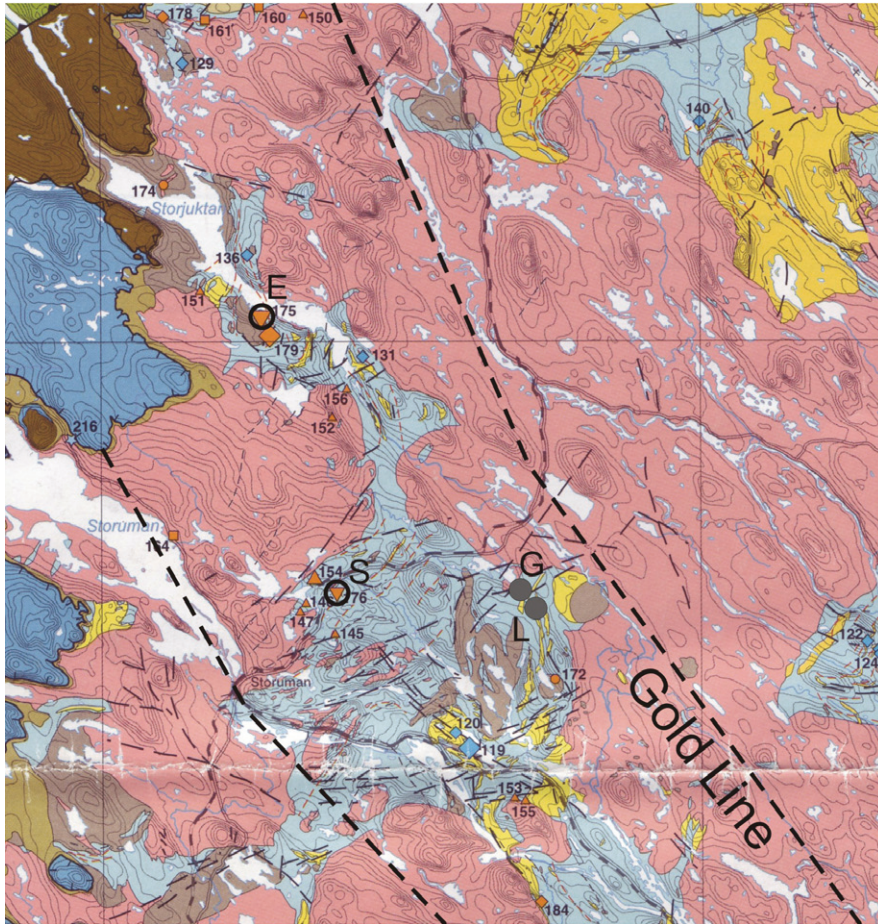


Fig. 1. Geological map of the study area (modified from the SGU Ba 57 map). Encircled localities mark the study objects; E = Ersmarksberget, S = Svårtträsk, G = Gubbträsk and L = Lagbäcken.

Analytical data

Several of the minerals present, like sphalerite, calcite and fluorite are well suited for the study of both fluid inclusions and isotopes. For the Rb-Sr dating of sphalerite, samples were thoroughly grinded and leached in a process resulting in both leachates (fluid inclusion waters) and residual fractions.

Fluid inclusions: For the fluid inclusion study drill core samples and hand specimens were selected from the mentioned occurrences. Microthermometric data were obtained from primary fluid inclusions in sphalerite, calcite and fluorite. The samples contain two types of fluid inclusions; two-phase aqueous liquid-vapour inclusions and hydrocarbon (petroleum) inclusions (Fig. 2). The hydrocarbon-bearing inclusions contain a fluid phase (identified by Raman spectroscopy as CH_4 , C_2H_6 and possibly minor aromatic C-H) and dark solid phases (bitumen) on their walls. The aqueous inclusions display homogenization temperatures (T_h to liquid) in the range 71° to 210°C ; inclusions in sphalerite have the lowest temperatures. Initial low first melting (T_{fm}) occurs in all aqueous inclusions at -70° to -60°C , pointing to a CaCl_2 -dominated composition. Ice melting temperatures (T_m) show a large spread from -15° to -49°C and correspond to salinities between 18 and 30 wt. % CaCl_2 . The higher salinity is typical in the first deposited dark Fe-rich sphalerite and the lower salinity in calcite not in direct contact with sphalerite. The inclusions indicate a mixing between two aqueous fluids; the very saline 30 wt. % CaCl_2 end member fluid of lower temperature ($\sim 100^\circ\text{C}$) and the 18 wt. % CaCl_2 with a higher temperature ($>150^\circ\text{C}$).

Pb isotopes: Pb isotope data were obtained from sphalerite (also analyzed for Rb-Sr), galena and gangue minerals. All of these samples show highly radiogenic and similar compositions (e.g. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 23.80$ –

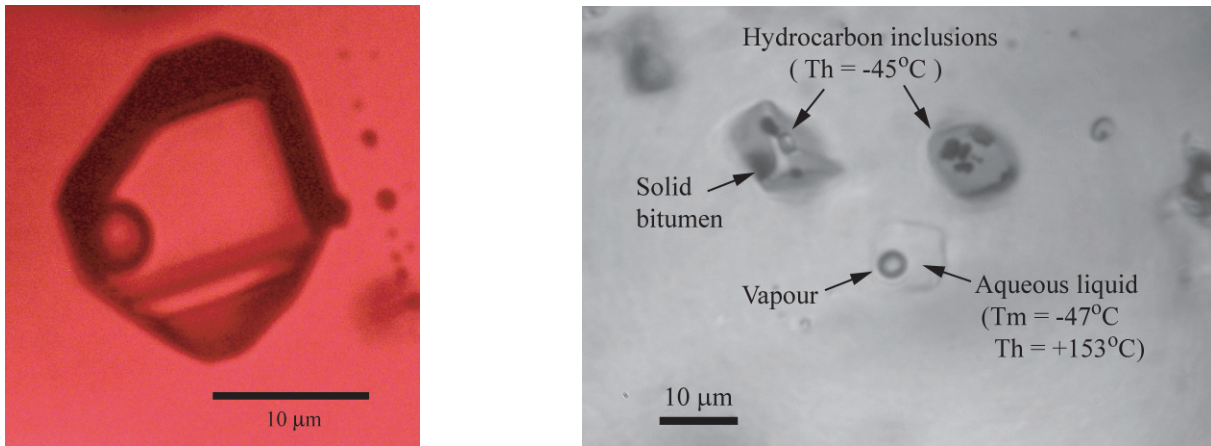


Fig. 2. Left photo shows ore forming fluid trapped as a two-phase (liquid and vapour) fluid inclusion in dark red sphaerulite. Right photo shows fluorite with typical coexisting hydrocarbon and aqueous (poorly visible due to a refractive index similar to that of fluorite) fluid inclusions.

23.95). As a whole, all present data (from different occurrences and from different minerals) fall on a single, flat-lying linear trend including available galena data from other sulphide-bearing veins, as well as from the sandstone-impregnation ore type (cf. Johansson & Rickard 1984).

(Rb-) Sr isotopes: Sr data were obtained from sphaerulite samples as part of the Rb-Sr dating effort, and from gangue minerals. For the latter, data are relatively homogeneous with present-day $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios between 0.7148–0.7198. However, the data pattern that shows up when Rb-Sr residuals (R) and leachates (L) data of sphaerulites are plotted (Fig. 3) is complex. Several features can be pointed out with relevance for the residual (R) data; (i) a number of samples exhibit very radiogenic $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios suggestive of unusually high Rb/Sr ratios in their structures, (ii) four sphaerulites tend to plot on a straight-line in Fig. 3, and if interpreted

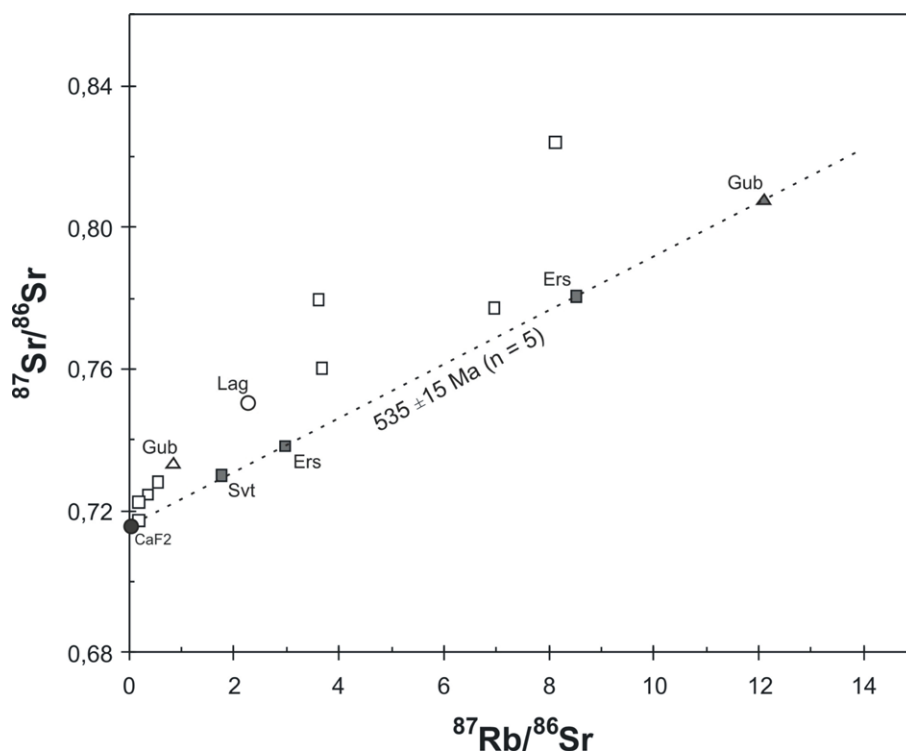


Fig. 3. Rb-Sr isochron diagram. Solid symbols denote (R) samples used in the isochron regression. Unfilled square symbols refer to sphaerulite samples from Svärträsk and Ersmarksberget; leachates (L) have $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ ratios below ca. 0.6, and residuals (R) have ratios exceeding 0.6.

as an isochron its slope corresponds to a 531 ± 21 Ma (MSWD = 2.5) age, (iii) the initial Sr isotope ratio calculated for samples defining the tentative sphalerite isochron is close to what is indicated from the suite of analyzed gangue minerals. By adding the least radiogenic gangue phase to the regression, the isochron age ($n=5$) equals 535 ± 15 Ma age (MSDW = 2.8), and (iv) those samples which do not fit the 535 Ma “isochron” appear to plot randomly in Figure 3.

Nd isotopes: The range in measured $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios obtained from three different occurrences is quite limited between 0.51146–0.51183. $\epsilon\text{-Nd}$ values have been calculated for two different times (535 and 420 Ma), supposed to be compatible with the most plausible ore genetic models. The respective set of $\epsilon\text{-Nd}$ values do not differ that much and point to relatively uniform values in the range -14 to -18 for the 420–535 Ma age span. Besides, depleted mantle model ages are in the range 1.6–3.5 Ga.

Discussion

Based on a range of geological evidence, both a Caledonian model (420 Ma) and an Iapetus rifting model (535 Ma) appear appropriate.

Fluid inclusion data: Fluid inclusion data provide evidence for the interplay between two fluids having different salinities and temperatures. Another observation is that there are no secondary fluid inclusions implying that no over-printing of primary isotopic characteristics is to be expected.

Pb-Pb data of ore minerals and associated gangue phases: Johansson & Rickard (1984) discussed the significance of radiogenic, Phanerozoic ore leads and suggested a two-stage model whereby 1.8 ± 0.15 Ga basement lead got involved in ore-forming processes at 0.4 ± 0.15 Ga. In general terms, this interpretation is applicable also to the data obtained for the Zn-Pb breccia occurrences, and both the Caledonian and the Iapetus rifting models are consistent with the nature of current Pb isotope data. It has to be remembered though that Zn-Pb breccia data are very uniform, and practically identical within error for the studied mineralisations. This puts constraints on the source of lead and we suggest lead was dominantly sourced from a single rock type that is suggested to be the Revsund granite which is the dominant bedrock lithology in the area.

ZnS datings and implications for the source of Sr in ore-forming solutions: The tentative isochron includes both gangue minerals and part of the sphalerites. The immediate conclusion is that Ca-rich fluids depositing the gangue minerals probably also precipitated the zinc sulphides. Therefore, we consider the ≥ 0.715 signature to approximate the strontium component in one of the fluids which is assumed to comprise marine, early Cambrian strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios close 0.709) being mixed with a more radiogenic source probably represented by Late Precambrian sedimentary rocks (rich in organic matter) that are now eroded away. The observed Rb-Sr pattern is interpreted to involve both a scattered population of samples (carrying a mixture of strontium from both fluid types) as well as samples plotting along linear trends (carrying strontium only from one fluid).

A comparison between the breccia-style Zn-Pb deposits and other occurrences in the Fennoscandian shield: We put forward the suggestion that the calcite vein-type of Johansson & Rickard (1984) can be considered to belong to the same class of mineralisations as the Zn-Pb breccia-type. Tectonic processes, involving faulting and magmatism and potentially capable to brecciate shallow parts of the crystalline basement, actually took place both at a Caledonian, and an Iapetus rifting, stage (see e.g. Alm & Sundblad, 2005; Lindström, 1967; Bergman, 1982). These evidence suggest that fluorite, now observed as a cement phase, was locally formed by the action of hydrothermal processes during a stage of compaction of the Cambrian sandstones.

Ore genesis: In the present paper, we advocate that a pre-500 Ma rifting event, associated with the opening of the Iapetus Ocean, is a viable hypothesis explaining the formation of breccia- (calcite-vein) type of Zn-Pb mineralization. It is quite possible that temporarily related alkaline magmatism (known from e.g. Fen and Alnön) may have served as an engine for driving hydrothermal cells leaching ore elements. Probably, mineral precipitation occurred closely after the deposition of overlying black shales of Middle to Late Cambrian origin.

Acknowledgements:

We are indebted to the staff at Lappland Goldminers AB, and Fredrik Grensman and Assen Simeonov from ScanMining.

References

- Alm, E., Sundblad, K. & Huhma, H., 2005: Sm-Nd isotope determinations of low-temperature fluorite-calcite-galena mineralization in the margins of the Fennoscandian Shield, *SKB Rapport R-05-66*
- Bergman L., 1982: Clastic dykes in the Åland islands, SW Finland and their origin. *Geological Survey of Finland, Bulletin 317*, 7–33.
- Johansson, Å. & Rickard, D.T., 1984: Isotopic composition of Phanerozoic ore leads from the Swedish segment of the Fennoscandian shield. *Mineralium Deposita 19*, 149–155.
- Kathol, B. & Weihed, P., 2005: Description of regional geological and geophysical maps of the Skellefte District and surrounding areas, *SGU Ba 57*, 197.
- Lindström, M., 1967: 'Funnel Grabens' and Early Paleozoic Tectonism in South Sweden. *Geological Society of America Bulletin 78*, 1137–1154.

Timing of migmatization in three separate tectonic domains, Svecokarelian orogen, south-eastern Sweden

MICHAEL B. STEPHENS & JENNY ANDERSSON

Regional tectonic framework

The Svecokarelian orogen comprises the major part of the Fennoscandian Shield, which is exposed in the northern part of Europe (Fig. 1) and forms one of the ancient continental nuclei on the planet Earth. The Svecokarelian orogen formed as a result of subduction and collisional processes along one or more active continental margins between 2.0 and 1.8 Ga (Nironen 1997, Lahtinen et al. 2008, Hermansson et al. 2008). Regional geological considerations suggest that the southernmost part of the orogen, exposed in south-eastern Sweden, consists of six different tectonic domains (Fig. 2). These domains can be distinguished on the basis of a combination of the timing of igneous activity with an active continental margin affinity and the character and intensity of the ductile strain (Hermansson et al. 2007, 2008, Stephens & Wahlgren 2008).

Domain 1 is dominated by calc-alkaline intrusive rocks, composed of quartz-rich felsic rock (granitoid) and subordinate dioritoid and gabbroid. Granite and quartz-poor felsic intrusive rock (syenitoid) are also present. All these rocks crystallized at 1.87–1.84 Ga. By contrast, domain 3 is dominated by calc-alkaline intrusive rocks that formed at 1.90–1.87 Ga. The younger igneous activity in domain 3, which formed between 1.87 Ga and 1.8 Ga, consists of alkali-calcic intrusive rocks, composed of granite, quartz-poor felsic rock (syenitoid) and subordinate dioritoid and gabbroid, as well as more homogeneous granite with or without pegmatite. Both domains are characterized structurally by regional-scale folding of rock units (Fig. 2) and, in general, constrictional ductile strain under variable but mainly amphibolite-facies metamorphic conditions.

In contrast to domains 1 and 3, domains 5 and 6 are dominated by alkali-calcic intrusive and associated volcanic rocks that formed around 1.8 Ga. The two domains differ on the basis of the character of the subordinate, older igneous activity and the character and intensity of the ductile strain in each domain. Alkali-calcic intrusive rocks, which formed at 1.87–1.84 Ga and show ductile deformation and metamorphism under amphibolite-facies metamorphic conditions, are restricted to domain 5. The ductile strain in the younger 1.8 Ga rocks in domain 5 only occurred along spatially restricted zones that formed under greenschist-facies metamorphic conditions. Calc-alkaline intrusive rocks composed of quartz-rich felsic rock (granitoid) and subordinate dioritoid and gabbroid, which crystallized at 1.83–1.82 Ga, are a volumetrically significant component in domain 6. Penetrative ductile strain under greenschist- or higher metamorphic conditions affected, in part, the 1.8 Ga rocks.

Domains 2 and 4 differ from the other domains by the common occurrence of broad belts or more spatially restricted zones of highly strained rocks, which dip steeply and strike west-north-west–east-south-east or north-west–south-east (Fig. 2). These structural features anastomose around tectonic lenses with lower ductile strain. Domains 2 and 4 contain a mixture of the rock units in the respective neighbouring domains as well as significant diatexitic migmatite.

An important attribute of the Svecokarelian orogen in at least domains 2, 3 and 4 is the low-*P* character of the metamorphism (see overview of relevant data in Stephens et al. 2009) and the occurrence of large areas that are affected by high-grade metamorphism and migmatization (Fig. 2). However, the boundaries between high-grade and lower-grade metamorphic rocks do not strictly follow the boundaries between domains with contrasting structural characteristics (Stephens et al. 2009 and Fig. 2).

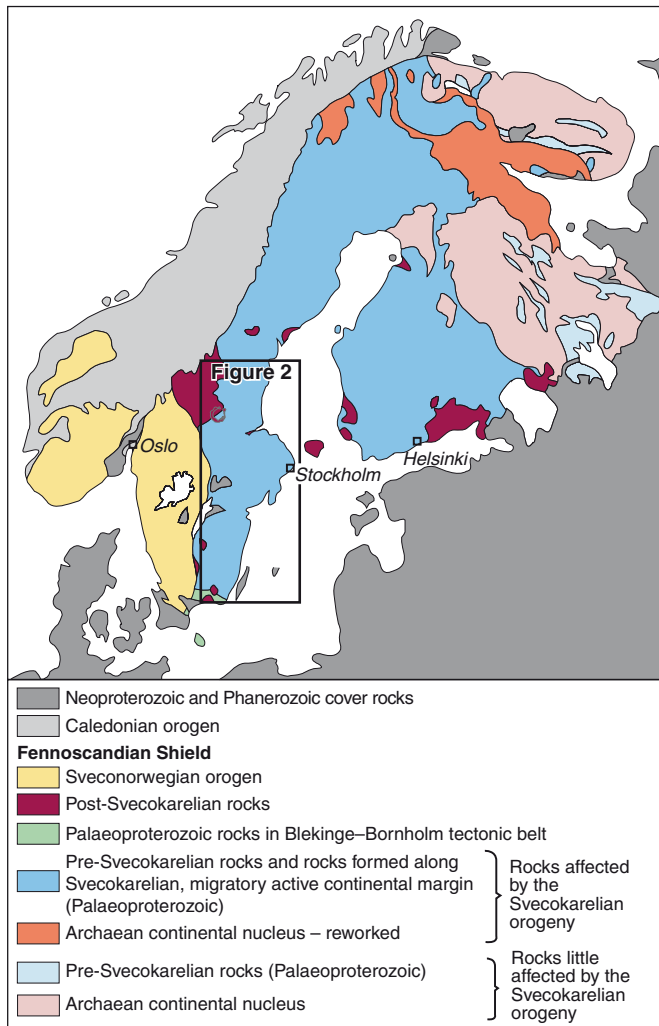


Fig. 1. Major geological units in the Fennoscandian Shield (modified after Koistinen et al. 2001).

Purpose of study

A challenge for our understanding of the regional geology and the mechanisms behind the evolution of this part of the shield is to better constrain the timing of the migmatitization in the context of the different tectonic domains. Few such data are currently available in this region (Andersson 2004, Andersson et al. 2006 and overview in Stephens et al. 2009). For this reason, an internal research project at the Geological Survey of Sweden (2009–2010) was designed firstly to constrain the timing of migmatization in domains 3, 4 and 5 and secondly to constrain the timing of ductile shear deformation at one of the localities.

A total of seven samples from six different localities were selected for U-Th-Pb in situ analyses of zircon. The analyses were carried out using the secondary ion mass spectrometry (SIMS) technique at the Swedish Museum of Natural History, Stockholm (NORDSIM facility). The zircon

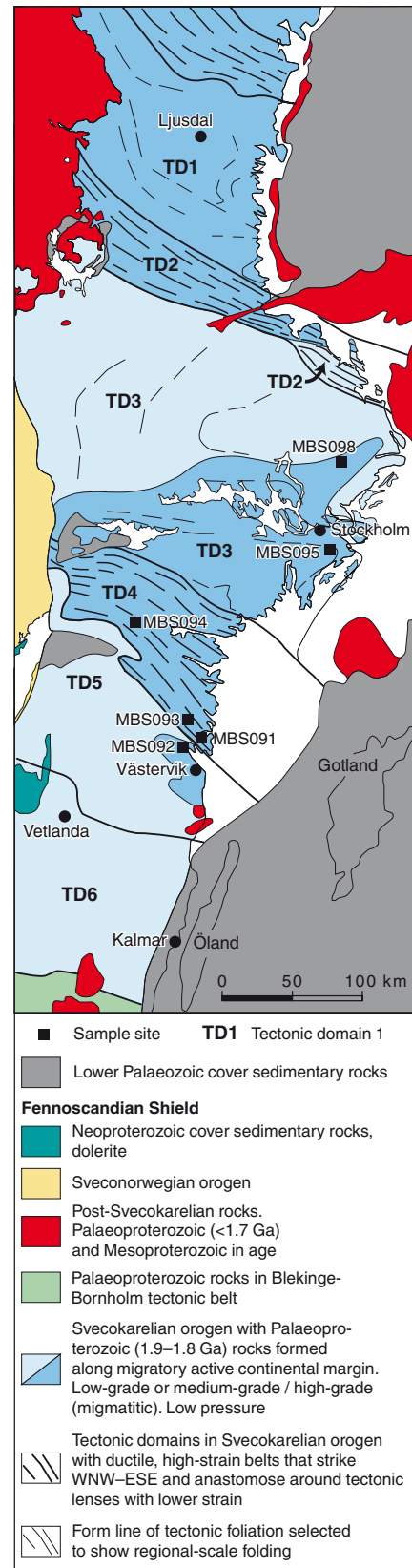


Fig. 2. Tectonic domains and boundary between high-grade (migmatitic) and lower-grade metamorphic rocks in the south-eastern part of Sweden (based on Stephens & Wahlgren 2008, Stephens et al. 2009, Wik et al. 2009).

specimens were prepared with care in order to access more the outer parts of the crystals, and the selection of analytical data was focused primarily on secondary, texturally young zircon domains. All analytical work was guided by backscatter electron (BSE) imaging of the studied zircon populations. A short description of the field relationships at each sample site and a summary of the obtained U-Th-Pb zircon data follow below.

Sample descriptions and results

All the geochronological data presented below refers to concordant $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages and the span in ages cited takes account of analytical uncertainties in the form of 2σ values.

Migmatitic paragneiss in tectonic domain 3

Two localities were sampled in tectonic domain 3. The first locality, south of Stockholm (MBS095 in Fig. 2), exposes a diatexitic paragneiss with folded granitic leucosome veins (sample MBS095A), and a structurally concordant, more homogenous body of garnet-bearing, lineated and metamorphosed leucogranite (sample MBS095D). The occurrence of leucosome along both the axial surface traces of mesoscopic folds and as folded entities suggests that the leucosome formed syntectonically with respect to the folding. An earlier attempt to evaluate the age of crystallization of sample MBS095D and the timing of migmatization at this outcrop (Stephens et al. 2009), using U-Pb analysis of multiple zircon and monazite grains and the thermal ionisation mass spectrometry (TIMS) technique, provided equivocal results.

Texturally old domains in zircon from the diatexitic paragneiss (sample MBS095A) are dated at 2.1 Ga (N=1) and 1.92–1.86 Ga (N=7), respectively. A texturally younger generation of zircon is dated at 1.84–1.83 Ga (N=10). This type of zircon also shows higher U content and, in most cases, a lower Th/U ratio (≤ 0.1) than the older zircon domains. The remaining analysed zircons are either discordant (N=2) or show a high uncertainty in the age (N=1). The analytical data do not indicate isotopic disturbance of the U-Pb-Th system in the analysed zircons after 1.83 Ga.

Zircon in the metamorphosed leucogranite (sample MBS095D) at the same outcrop provide similar results with older domains dated at 2.1 Ga (N=1) and 1.91–1.85 Ga (N=8), respectively, and a younger generation at 1.84–1.83 Ga (N=6). The remaining analysed zircons are discordant (N=2). The majority of the older analyses were acquired from texturally older domains, while the younger analyses come from texturally younger domains. Th/U ratios in the older zircons are variable but, in the younger zircon group, they are consistently lower than 0.1. The analytical data indicate no significant Pb-loss after 1.83 Ga.

The second locality investigated in tectonic domain 3, north of Stockholm (MBS098 in Fig. 2), also exposes migmatitic paragneiss with folded granitic leucosome veins (Fig. 3a). The majority of analysed zircons (N=9) in sample MBS098A fall in the age span 1.92–1.85 Ga. However, older zircon dated at 2.0 Ga (N=1) and younger zircons in the age span 1.84–1.81 Ga (N=2) are also present in this sample. The remaining analysed zircons are discordant (N=3). The younger zircons show low Th/U ratios and high U contents, but these values overlap with those obtained from the zircons in the domain defined by the majority of zircons.

The zircon U-Th-Pb data from the two localities of migmatized paragneiss with folded leucosome in tectonic domain 3 are more or less identical showing a minor component of older 2.1 Ga or 2.0 Ga xenocrystic core material, a major component of zircon domains that formed and/or were affected by metamorphism at 1.92–1.85 Ga, and a texturally younger, volumetrically minor component with an age span of 1.84–1.83 (–1.81) Ga. The latter is inferred to correspond to a phase of high-grade metamorphism and partial melting of the sedimentary rock protolith.

Migmatitic orthogneiss in tectonic domain 4

Three different rocks were sampled in tectonic domain 4 at three separate localities (MBS091, MBS093 and MBS094 in Fig. 2). These include:

- A garnet-bearing, granodioritic orthogneiss with some folded leucosome veins (sample MBS091A), partly with melanosome rims. The leucosome veins show a weak grain-shape fabric that is parallel to

the axial surface of the folds (Fig. 3b). A previous U-Pb (zircon) TIMS geochronological study has constrained the timing of crystallization of the igneous palaeosome at this locality to 1.87–1.85 Ma (Wik et al. 2005).

- A migmatitic andesitic to dacitic orthogneiss, stromatically layered with abundant, white, mm- to cm-wide veins (sample MBS093A; Fig. 3c).
- A coarse, pegmatitic leucosome in an augen-bearing metagranite (sample MBS094A). The latter was sampled in the so-called Finspång augen gneiss massif (Wikström and Aaro 1986). A previous U-Pb (zircon) SIMS geochronological study has constrained the timing of crystallization of the igneous palaeosome in the Finspång augen gneiss massif to 1.86–1.85 Ga (Andersson et al. 2006).

U-Pb data from both unaltered and altered igneous zircon domains in the sparsely veined granodioritic orthogneiss in sample MBS091A form a distinctive age group (N=17) at 1.88–1.87 Ga, very close to the inferred protolith age for the granodioritic orthogneiss (Wik et al. 2005). Analyses of two texturally younger domains with higher U contents and lower Th/U ratios yield $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages in the age span 1.84–1.82 Ga. A third zircon also inferred to be texturally younger yields a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age in the age span 1.87–1.84 Ga but shows a similar U content and Th/U ratio as the main group of analyses. The remaining analysed zircons are discordant (N=7). The analytical data do not indicate any substantial disturbance of the U-Th-Pb system after 1.82 Ga.

Texturally young, secondary zircon domains (N=11) in the leucosome-rich sample MBS093A provide an age of around 1.85 Ga. One analysis is distinctly younger at about 1.81–1.80 Ga. Except for this one analysis, the analytical data indicates no spread in ages indicative of post-crystallization isotopic disturbance but cluster tight at around 1.85 Ga. Texturally old zircon domains (N=4), interpreted as igneous core domains, are dated to 1.90–1.85 Ga. The remaining analysed zircons are discordant (N=2).

Zircons in the pegmatitic leucosome sample MBS094A (N=8) are dated at 1.86–1.85 Ga. This age is identical to the inferred protolith age for the granitic augen gneiss (Finspång augen gneiss massif) that forms the igneous palaeosome at the sample site (Andersson et al. 2006). One zircon analysis give a younger age at 1.83–1.82 Ga. This grain is not texturally or morphologically different from the other grains in the investigated zircon population. The remaining analysed zircons are discordant (N=5).

The zircon U-Th-Pb data from the three localities of migmatitic orthogneiss in tectonic domain 4 indicate the crystallization of older zircon domains at or around 1.88–1.87 Ga and younger zircon domains in the age span 1.86–1.85 (–1.82) Ga. The development of even younger, secondary zircon dated at 1.81–1.80 Ga has also been identified. The younger zircon domains are inferred to correspond to two different phases of high-grade metamorphism.

Leucogranite dyke along ductile shear zone in tectonic domain 5

A partly pegmatitic leucogranite dyke was sampled close to the northern tectonic boundary of domain 5 (MBS092 in Fig. 2), the Loftahammar-Linköping Deformation Zone (Beunk and Page 2001, Wik et al. 2005). The dyke intruded parallel and immediately adjacent to a ductile shear zone in the outcrop (Fig. 3d), which is dominated by a folded, augen-bearing metagranite, referred to as the Loftahammar granite (Gavelin 1904, Wik et al. 2005). Both the dyke and the ductile shear zone are oriented along the axial surface to a mesoscopic fold that rotates the grain-shape fabric in the augen-bearing metagranite. The ductile shear zone and the dyke occur along one of the limbs to this fold and are, in part, discordant to the grain-shape fabric in the metagranite. The dyke is itself partly affected by ductile deformation, including some folding, and is therefore inferred to be synkinematic with respect to the folding and ductile shearing along the fold limb. A previous U-Pb (zircon) TIMS geochronological study has constrained the timing of crystallization of the Loftahammar granite to 1.87–1.85 Ga (Wik et al. 2005).

Zircon domains in sample MBS092A (N=7) fall in the age span 1.85–1.84 Ga. The remaining analysed zircon is discordant. The 1.85–1.84 Ga age is slightly younger than the age of the host metagranite (Loftahammar granite) to which it shows an intrusive relationship (Fig. 3d). The new zircon data constrain ductile shear deformation close to the northern boundary of tectonic domain 5 to 1.85–1.84 Ga.

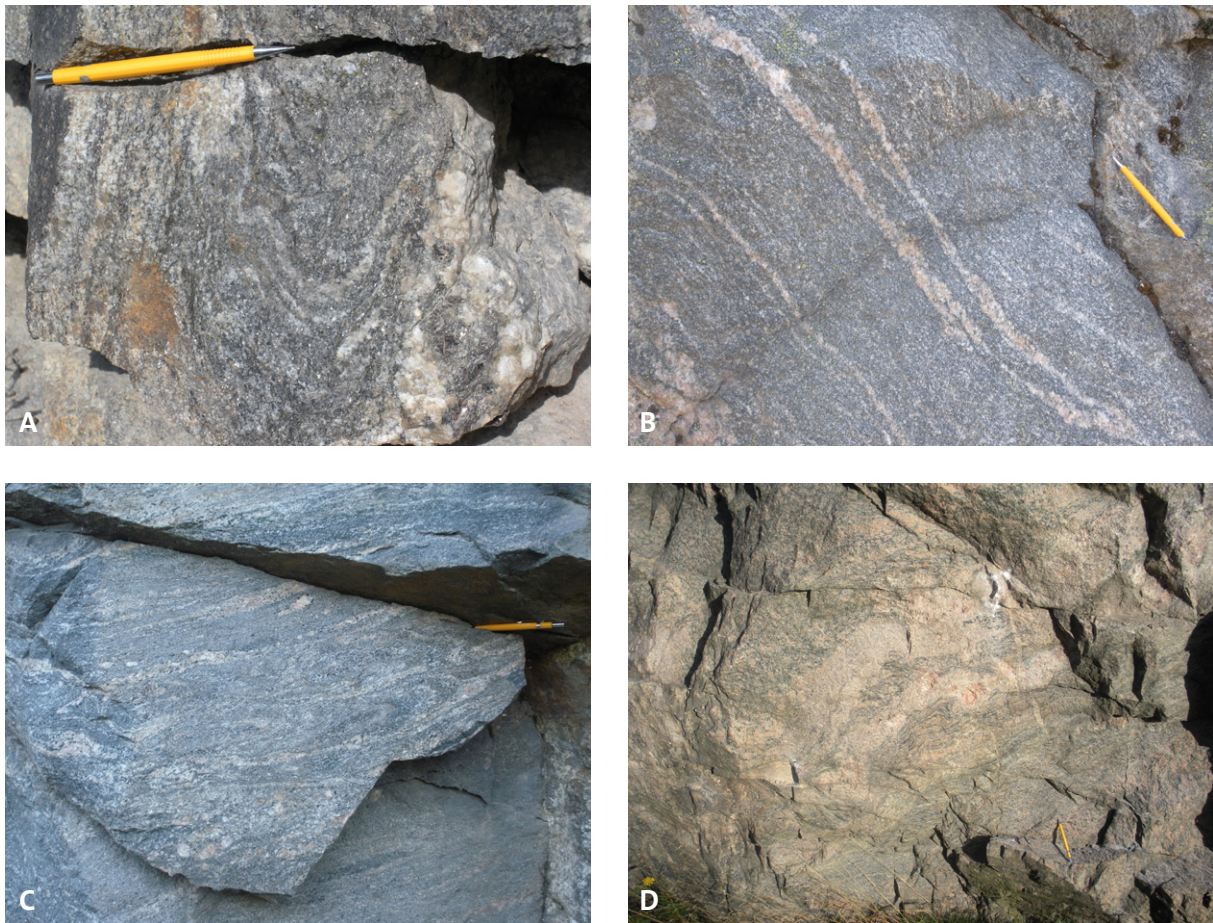


Fig. 3. Field appearance at four of the sample sites. Field pictures from site MBS095 are shown in Stephens et al. (2009, p. 258). **A.** Folded leucosome in migmatitic paragneiss with high ductile strain along the western limb (to the left) of the fold. Site of sample MBS098A, tectonic domain 3. **B.** Folded leucosome in granodioritic orthogneiss with weak grain-shape fabric in the leucosome veins parallel to the steeply dipping axial surface of the folds. Site of sample MBS091A, tectonic domain 4. **C.** Abundant stromatic leucosome in migmatitic orthogneiss. Site of sample MBS093A, tectonic domain 4. **D.** Partly pegmatitic leucogranite dykes oriented parallel and immediately adjacent to a ductile shear zone in augen-bearing metagranite (Loftahammar granite). The dykes are locally discordant to the grain-shape fabric in the host metagranite. The fabric is folded and transposed into the ductile shear zone. Site of sample MBS092A, tectonic domain 5.

Preliminary conclusions

The following preliminary conclusions for each tectonic domain can be made from the results of this geochronological study:

- The textural and isotopic complexity of the zircons from the paragneisses in tectonic domain 3 provides support to the field interpretation that they have a sedimentary origin. The main batch of inferred detrital zircon emanates from the Svecofennian bedrock that had formed and/or was affected by metamorphic processes at 1.92–1.85 Ga. Older detrital zircons with ages of 2.1 Ga and 2.0 Ga are also present in these samples. A high-grade metamorphic event accompanied by abundant partial melting in the paragneisses overprinted these rocks at 1.84–1.83(–1.81) Ga.
- The igneous protoliths of two of the orthogneisses in tectonic domain 4 (samples MBS091A and MBS093A) crystallized at or around 1.88–1.87 Ga. These rocks were later affected by high-grade metamorphism and migmatization at 1.85–1.82 Ga. There is also an indication of a younger metamorphic event at 1.81–1.80 Ga, similar to that recognized earlier in domain 4 by Andersson et al. (2006). The pegmatitic leucosome in the granitic Finspång augen gneiss (MBS094A), also in domain 4, formed at 1.86–1.85 Ga, more or less concurrent with igneous crystallization of the main granitic body.

- In the northern part of tectonic domain 5, close to the tectonic boundary to domain 4, injection of granitic material as synkinematic dykes took place along a ductile shear zone at 1.85–1.84 Ga.

It is apparent that at least one important phase of high-grade metamorphism and migmatization in tectonic domains 3 and 4 is constrained to the same time interval at 1.86–1.82 Ga. This phase was concurrent with ductile shearing close to the boundary between tectonic domains 4 and 5. A younger phase of high-grade metamorphism is also apparent in at least tectonic domain 4. The timing of migmatization in tectonic domains 3 and 4, as inferred from the zircon data from the high-grade rocks investigated in this study, is younger than the growth of metamorphic zircon rims at approximately 1.87–1.86 Ga in the northern part of tectonic domain 3 (Andersson 2004, Andersson et al. 2006). However, the current results from the paragneisses in tectonic domain 3 do not exclude the presence of an earlier metamorphic event (or events) at 1.92–1.85 Ga in the source region to these sedimentary rocks.

Further implications for the regional tectonic evolution in south-eastern Sweden, including the relationship between migmatization and the ductile strain in the bedrock, are currently under evaluation.

References

- Andersson, U.B., 2004: Age and P-T paths of metamorphism in the Bergslagen region. *Sveriges geologiska undersökning unpublished report 03-1025/97 (summary and appendices)*.
- Andersson, U.B., Högdahl, K., Sjöström, H. & Bergman, S., 2006: Multistage growth and reworking of the Palaeoproterozoic crust in the Bergslagen area, southern Sweden: evidence from U-Pb geochronology. *Geological Magazine* 143, 679–697.
- Beunk, F.F. & Page, L.M., 2001: Structural evolution of the accretional continental margin of the Paleoproterozoic Svecofennian orogen in southern Sweden. *Tectonophysics* 339, 67–92.
- Gavelin, A., 1904: Beskrifning till kartbladet Loftahammar. *Sveriges geologiska undersökning Aa 127*, 91 pp.
- Hermansson, T., Stephens, M.B., Corfu, F., Andersson, J. & Page, L., 2007: Penetrative ductile deformation and amphibolite-facies metamorphism prior to 1851 Ma in the western part of the Svecofennian orogen, Fennoscandian Shield. *Precambrian Research* 153, 29–45.
- Hermansson, T., Stephens, M.B., Corfu, F., Page, L.M. & Andersson, J., 2008: Migratory tectonic switching, western Svecofennian orogen, central Sweden: Constraints from U/Pb zircon and titanite geochronology. *Precambrian Research* 161, 250–278.
- Koistinen, T., Stephens, M.B., Bogatchev, V., Nordgulen, Ø., Wennerström, M. & Korhonen, J. 2001: *Geological map of the Fennoscandian Shield, scale 1 : 2 000 000*. Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and the North-West Department of Natural Resources of Russia.
- Lahtinen, R., Garde, A.A. & Melezhik, V.A., 2008: Paleoproterozoic evolution of Fennoscandia and Greenland. *Episodes* 31, 20–28.
- Nironen, M., 1997: The Svecofennian orogen: a tectonic model. *Precambrian Research* 86, 21–44.
- Stephens, M.B. & Wahlgren, C.-H., 2008: Bedrock evolution. In B. Söderbäck (ed.): Geological evolution, palaeoclimate and historical development of the Forsmark and Laxemar-Simpevarp areas. *Svensk Kärnbränslehantering AB R-08-19*, 25–88.
- Stephens, M.B., Ripa, M., Lundström, I., Persson, L., Bergman, T., Ahl, M., Wahlgren, C.-H., Persson, P.-O. & Wickström L., 2009: Synthesis of the bedrock geology in the Bergslagen region, Fennoscandian Shield, south-central Sweden. *Sveriges geologiska undersökning Ba 58*, 259 pp.
- Wik, N.-G., Bergström, U., Bruun, Å., Claeson, D., Jelinek, C., Juhojuntti, N., Keo, L., Lundqvist, L., Stephens, M.B., Sukotjo, S. & Wikman, H., 2005: Beskrivning till regional berggrundskarta över Kalmar län. *Sveriges geologiska undersökning Ba 66*, 50 pp.
- Wik, N.-G., Albrecht, L., Bergman, S., Kübler, L. & Sundberg, A., 2009: Malmer, industriella mineral och bergarter i Gävleborgs län. *Sveriges geologiska undersökning Rapporter och meddelanden 130*, 310 pp.
- Wikström, A. & Aaro, S. 1986: The Finnsång augen gneiss massif. Geology, geophysics and relationship to postorogenic granites. *Sveriges geologiska undersökning C 813*, 39 pp.

Koldioxidlagring i djupa akvifärer – möjligheter, risker och utvecklingsläge

MIKAEL ERLSTRÖM

Underjordisk lagring i djupa akvifärer

För ett tiotal år sedan var det inte många som hade kunnat föreställa sig att lagring av koldioxid i berggrunden skulle bli en av de mest omdiskuterade lösningarna till den globala uppvärmningen. Lagringsfrågan har resulterat i en mängd nya frågor och behov av geologisk kunskap. Den tekniska utvecklingen med avskiljning går snabbt framåt och nu ställs det stora krav på geologisk information om var man kan lagra.

Avskiljning och lagring av koldioxid (CCS, "Carbon Capture and Storage") är internationellt sett en av de mest omdiskuterade metoderna för att på kort sikt kunna begränsa den mänskliga påverkan på klimatet. Klimatforskarna i IPCC ("UN International panel on Climate Change") anser det klarlagt att ökad förbränning av fossila bränslen och utsläpp av växthusgaser, främst koldioxid är den huvudsakliga bakomliggande orsaken till den globala uppvärmningen.

Underjordisk lagring i djupa akvifärer bedöms som det mest intressanta alternativet. Framför allt beror detta på att dessa har en stor utbredning och förekommer i nära anslutning till utsläppskällorna. De bedöms ha en potential att kunna ta emot mer än 1 000 Gt CO₂. Tillsammans med lagring i tömda gas- och oljefält finns en total bedömd lagringskapacitet på mer än 1 900 Gt CO₂ i denna typ av berggrund. Som jämförelse resulterade förbränningen av fossila bränslen på jorden under 2005 i ett utsläpp av 6–8 Gt CO₂ i atmosfären. Många av de pågående forsknings- och pilotprojekten med lagring av koldioxid i djupa akvifärer har initierats i anslutning till utvinning av olja och gas. Hittills har i storleksordningen 40 Mt CO₂ injicerats och lagrats i samband med EOR. Årligen injiceras ca 4 Mt CO₂ i olika saltvattenförande akvifärer. Runt om i världen pågår ett 40-tal projekt med lagring av koldioxid varav ca 15 av dessa är i djupa akvifärer.

Grundläggande geologiska krav

För att hålla lagrad koldioxid på plats krävs först och främst en tät bergart som täcker akvifären, s.k. takbergart eller "caprock". Förutom takbergart måste underliggande akvifär vara tillräckligt porös, genomsläpplig (permeabel) och ha en tjocklek och utbredning som möjliggör kostnadseffektiv injicering och lagring av koldioxid. En tumregel är att akvifären ska vara minst 10 m tjock, ha en porositet på minst 15 % och en permeabilitet på minst 100 mD. Dessutom bör akvifären ha en möjlighet att lagra minst 100 Mt CO₂. För att få en effektiv lagring eftersträvas att koldioxiden lagras i superkritiskt "flytande" tillstånd (>31°C, 73,6 bar) vilket medför att lagringsakvifären måste ligga på minst 800 m djup.

Det finns ett antal egenskaper som ska uppfyllas för att lagringsformationen (akvifären) och överlagrande täta formationer ska kunna klassificeras som lämpliga för lagring av koldioxid.

Dessa kan delas in i:

- Akvifärens och takbergartens geometriska och strukturella egenskaper innefattar utbredning, mäktighet och begränsningar samt vertikal och horisontell uppbyggnad.
- Fysikaliska egenskaper innefattande porositet, permeabilitet, kapillärtryck och formationsstryck.
- Kemiska egenskaper och mineralogisk uppbyggnad (formationsvatten och bergarter).

Risker

Den största risken med lagring är att koldioxiden tränger upp till markytan genom sprickor, förkastningar och borrhål. Andra risker är att gasen trycker upp salt grundvatten i grundare färskvattenmagasin samt att upplösta tungmetaller p.g.a. lågt pH kan följa med högre upp tillsammans med läckande koldioxid.

I FN:s IPCC Special Report (2005) behandlas frågan om ett CO₂-lagers förmåga att kvarhålla koldioxiden under lång period. Det är beroende på de geologiska platsspecifika förhållandena och vilka ingenjörsmässiga lösningar som valts dels för injiceringssystemet och dels vid avveckling/förslutning av brunnar. Med en kvalitetssäkrad design, drift och övervakning bedöms ett CO₂-lager inte läcka i någon större omfattning med utgångspunkt från nedanstående branschbedömning:

Med tiden kommer även en stor del av koldioxiden gått i lösning och mineraliserats i akvifären vilket gör att risken för läckage minskar med tiden.

Förutsättningar i Sverige

Jämfört med Danmark, Norge och många andra europeiska länder har Sverige generellt mycket sämre förutsättningar till lagring av koldioxid i djupa akvifärer. Djupa akvifärer som uppfyller de grundläggande kraven finns i södra Östersjön, sydvästra Skåne och södra Kattegatt.

En preliminär bedömning är att de kambriska sandstenslagren i södra Östersjön har egenskaper som uppfyller baskraven för koldioxidlagring. Förekomst, nettosand, djup, tryck, temperatur och mineralogi är relativt väl kända och fördelaktiga ur lagringshänseende. I våra grannländer Lettland och Litauen har sandstenen bedömts som lämplig för lagring bl.a. eftersom den är reservoarbergart för olja och gas.

De djupa akvifärerna i sydvästra Skåne har i samband med olika borrningar och tester för geotermisk energiproduktion visat sig ha mycket goda egenskaper. Motsvarande akvifärer på Själland används för naturgaslagring vilket visar på deras lämplighet.

Även i södra Kattegatt förekommer djupt liggande akvifärer som kan vara lämpliga. Här finns även en antiklinal struktur som kan vara lämplig som lagringsplats i fall denna är slutet och tät.

Vad krävs för att bättre bedöma de svenska lagringsmöjligheterna?

Hittills utförda studier har baserats på befintliga sammanställningar av berggrundens uppbyggnad. Mycket av informationen är dessutom koncentrerad till potentiella reservoarbergarter (akvifärer), däremot är berggrundsavsnitt som överlagrar akvifärerna inte alls undersökta i samma omfattning.

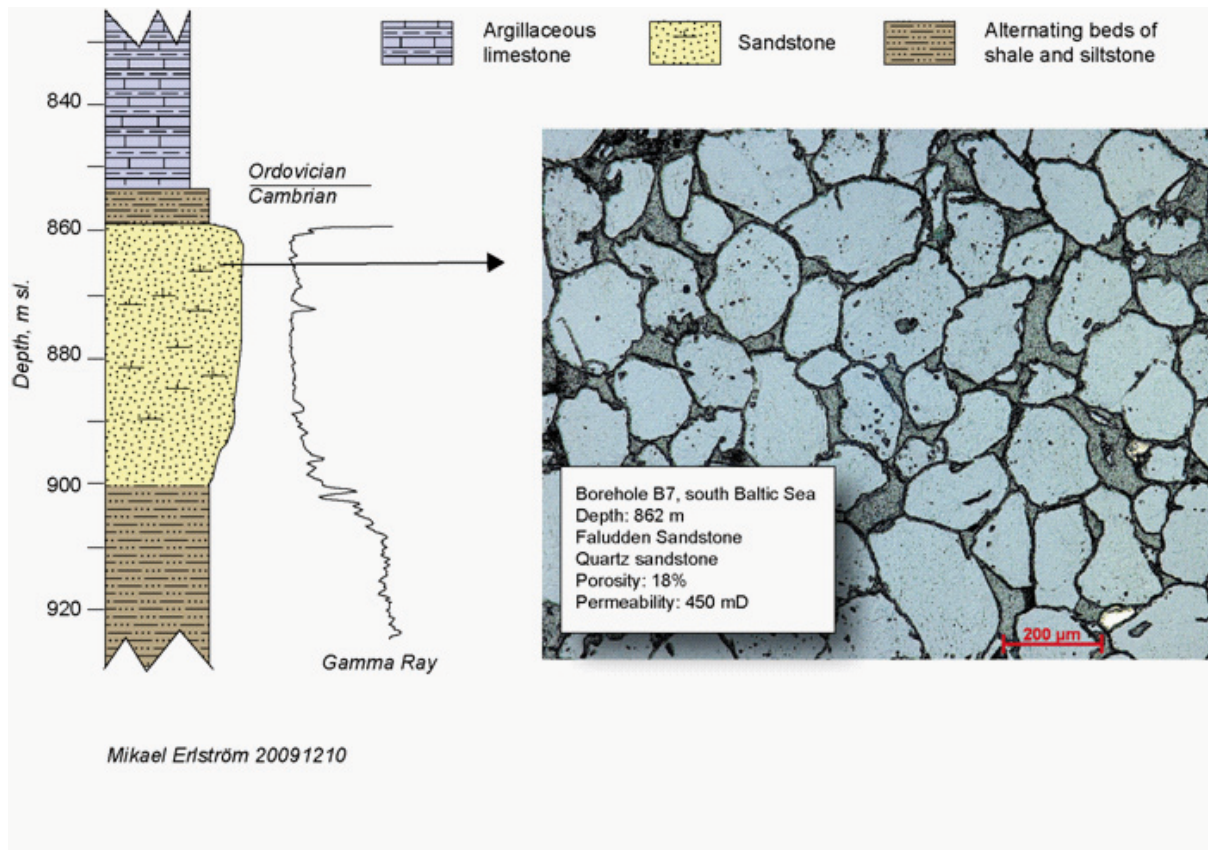
I dessa studier har det inte funnits utrymme till bearbetning av underlagsdata i någon större omfattning. För att öka tillförlitligheten i de bedömningar som gjorts bör det göras en omtolkning av framför allt de seismiska mätningarna. Det kommer även att behövas nya rådata, först och främst borrhärdar från takbergart och akvifär i olika områden. Borrning av undersökningshål på södra Gotland och i sydvästra Skåne med syfte att samla in data och kärnmaterial för analyser av både akvifären och takbergarternas egenskaper utifrån frågeställningar rörande koldioxidlagring kommer att bli nödvändiga.

För att få ett bättre bedömningsunderlag av vad som finns och vad som saknas har SGU påbörjat en utredning om de geologiska förutsättningarna för eventuell lagring av koldioxid i svensk berggrund. Målsättningen med studien är framför allt att ta fram information som kan användas som underlag till fördjupade utvärderingar av möjligheterna till lagring av koldioxid i djupa akvifärer i Sverige.

I studien ingår en övergripande beskrivning av grundläggande urvalskriterier (djup, temperatur, porositet, permeabilitet, volym, utbredning, struktur, kemi, "caprock" m.m.) av geologiska formationer och potentiella akvifärer. I studien ingår även en genomgång av tillgängliga data från respektive område (seismik, borrningar, prover, analyser) samt identifiering av kompletterande data för att bättre kvantifiera och kvalitetsbedöma de olika områdena.

Pågående forskning vid SGU

SGU deltar som en av 19 olika organisationer i ett EU-finansierat forskningsprojekt "MUSTANG" ("A Multiple Space and Time scale Approach for the quantification of deep saline for CO₂ storaGe") som koordineras av Uppsala universitet. Projektet har som övergripande mål att ta fram riktlinjer, metoder och undersökningsmetodik för karakterisering av djupa akvifärer med hänseende till långsiktig koldioxidlagring. I projektet som pågår till 2013 ingår 6 olika platser med olika geologiska förhållanden där olika försök och modelleringar ska utföras. Dessa är bl.a. Helez i Israel, Valcele i Rumänien, Hertzberg i Tyskland, Maguelone i Frankrike och Malmö i Sverige. I Malmö finns två djupa brunnar som borrhärdar för geotermi och som nu E.ON, som ingår som industrirepresentant i projektet, har för avsikt att använda för forskning kring CCS. SGUs roll i projektet är att leda och samordna arbetet med en geologisk karaktärisering av de olika platserna och ta fram en mall för vilken typ av information som ska ingå.



Faluddensandsten från södra Östersjön. En porös och permeabel akvifär. Lämplig för lagring?

Mapping thermal conductivity of the Swedish bedrock

GERHARD SCHWARZ, ANDREA FÖRSTER, MATTIAS GÖRANSSON & BO THUNHOLM

Energy for heating purposes has become a matter of debate during the last decades owing to increasing energy prices, its availability and the debate on climate change. Using the shallow sub-surface down to some hundred meters as a heat exchanger for heating as well as cooling purposes, i.e., geo-energy ('bergvärme') for larger units has become more and more attractive. In Sweden, at present energy extracted from the shallow sub-surface covers about 2% of the country's total energy consumption. More than 200 000 wells to extract geo-energy have been reported to SGU's well record section since 1980. This accounts for about 50% of all the reported drilled wells. About 20% of small houses have a ground heating system installed, supplied from normally one drill hole. The number of larger units used for commercial purposes is estimated to be some thousands and increasing by some hundreds per year.

The efficiency of energy wells strongly depends on thermal conductivity of the host rock where the heat is exchanged. This is related, e.g., to the mineralogical composition and structure of the rock, its permeability and water content. But even radiogenic heat generation, heat flow and temperature gradient are of importance. Therefore, installing and optimizing ground heat systems, especially larger ones for industrial purposes is in need to know more about thermal properties of the sub-surface. Here, we aim on providing available thermal properties of the Swedish bedrock to the public.

Thermal conductivity of rock can be calculated theoretically from its mineral content (e.g., Sundberg et al. 1985), i.e., from the geometrical mean of thermal conductivity of the individual minerals weighted by their volume content. For mapping this parameter we take advantage of existing data of the Swedish bedrock to be found in the SGU databases. We have used data from mineralogical (modal data, cf. Fig.1), geochemical (normative data) as well XRD analysis of ordinary rock samples to calculate thermal conductivity. In parallel, we have measured thermal conductivity on selected samples in the laboratory, using the method of thermal conductivity scanning (Popov et al., 1999).

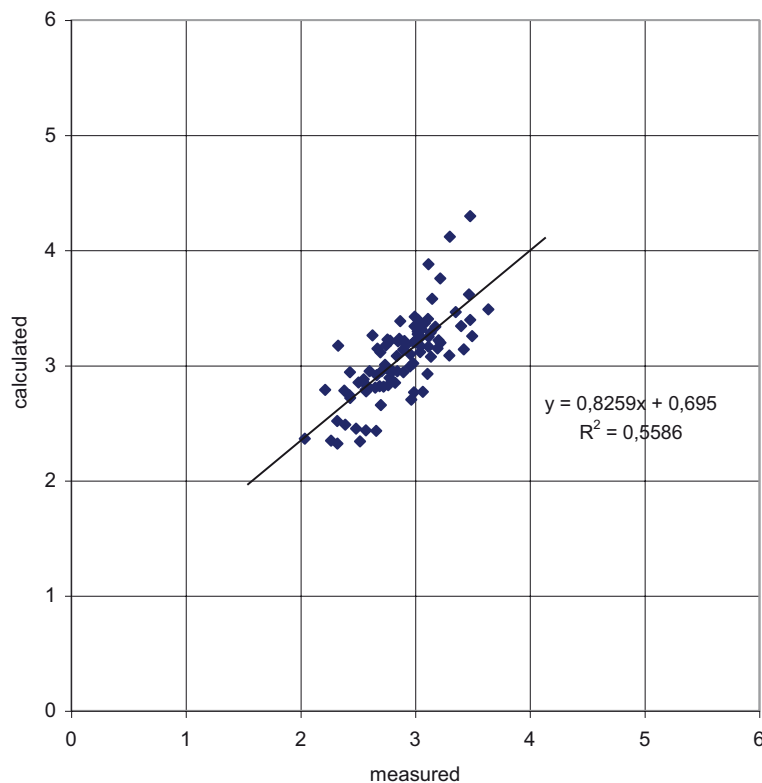


Fig. 1. Thermal conductivity of rock specimen from the Göteborg area, modal – vs. measured data (102 samples). A larger variety in rock samples should improve regression statistics. Modal data seem to slightly overestimate thermal conductivity, compared to data measured in the laboratory.

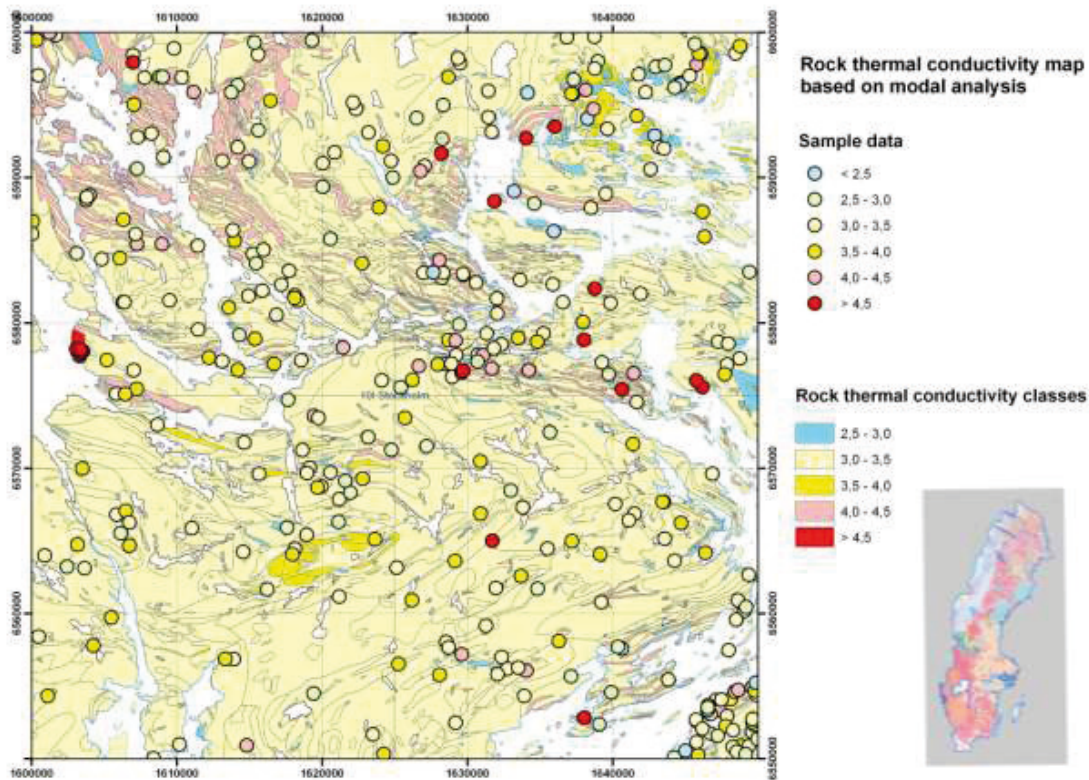


Fig. 2. Map of thermal conductivity of the bedrock in the Greater Stockholm area (50 by 50 km²), derived from analysis of modal data (dots) and based on the geological map (SGU Ba 60, 2001). Thermal conductivity (in W/(K m)) is grouped in 4 classes and transferred to known geological units.

When comparing measured and calculated values, we have analysed significant differences in the data obtained. Normatively calculated mineral contents turned out not to be suitable for calculating rock thermal conductivity. Values obtained are overestimated by about 10% compared to other data. Modal data available were used to compile thermal conductivity of the bedrock as maps for the areas of Greater Stockholm in central Sweden (Fig. 2) and of Göteborg at the west coast.

Extracting heat from the ground needs to recharge it. At shallow depth, heat is mostly recharged from the outside, i.e., by solar radiation and with enhanced thermal conductivity of the bedrock improving this recharge. Heat generated at larger crustal depth is radiogenic. About 98% of the heat produced in crustal rocks is due to the decay of the elements uranium (U), thorium (Th) and potassium (K). Their content, calculated from measuring gamma radiation at the ground or in the air, is used to estimate heat generation of the bedrock (e.g., Rybach 1976, Lindén et al. 1983). Using available data of SGU databases we have compiled a map of radiogenic heat production all over Sweden which clearly reflects known geology.

In concluding, we have shown that thermal conductivity of rocks can be derived from modal and XRD data, but is biased when using the normatively calculated mineral content. As a pilot study, data were compiled in map form for Greater Stockholm. Improvements in the installation of ground heat systems can be achieved when considering thermal conductivity of the bedrock and other physical data of the sub-surface, like, e.g., permeability.

We would like to thank our colleagues at SGU, namely Martin Ahl, Thomas Eliasson, Mehrdad Bastani, Erik Jonsson, and Sven Snäll for valuable support in this project.

References

- Lindén, A., Meli, O. & Mellander, H., 1983: Rapport TF 8402, *Sveriges Geologiska AB*.
- Popov, Y.A., Pribnow, D.F.C., Sass, J.H., Williams, C.F. & Burkhardt, H., 1999: Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. *Geothermics* 28, 253–276.
- Rybach, L., 1973: *Radioactive heat production*. Wiley, N.Y.
- Schön, J.H., 2004: *Physical Properties of Rocks*. Elsevier, Amsterdam.
- Sundberg, J., Thunholm, B. & Johnson, J., 1985: Värmeöverförande egenskaper i svensk berggrund. Byggnadsforskningsrådet R97, Stockholm.

”Möjligheter att utveckla SGUs grundvattennät med stöd av modellberäkningar – Så möter vi behoven av en utökad nivåövervakning”

Bo THUNHOLM, GUSTAV SUNDÉN & MAGDALENA THORSBRINK

Grundvattennätet vid SGU är ett nationellt observationsnät för övervakning av grundvattennivåer. Dess främsta syfte är att utgöra ett referenssystem som ska återspegla grundvattennivåns naturliga variation under opåverkade förhållanden. Mätningarna har utförts sedan slutet av 60-talet och sker huvudsakligen manuellt 2 ggr/månad vid 330 stationer i olika geologiska typmiljöer runt om i Sverige. Som referens kan de uppmätta nivåerna användas i många olika sammanhang för att utröna om en förändring i grundvattennivå har naturliga orsaker eller om förändringen beror av mänsklig påverkan genom t.ex. betydande grundvattenuttag.

Sedan en längre tid har det vid SGU funnits ambitioner att förstärka Grundvattennätet, dels genom att tillföra ytterligare observationspunkter, men också genom att påbörja beräkningar av grundvattennivåer utifrån metrologiska data. I tidigare internfinansierade FoU-projekt Johnson (1993) studerades om det med meteorologiska data var möjligt att med tillräckligt stor noggrannhet simulera naturliga variationer i grundvattennivån i ytliga jordlager. I och med införandet av EG:s ramdirektiv för vatten har behovet av ökade referensmöjligheter nu accentuerats. Detsamma gäller för arbetet med Miljömålet grundvatten av god kvalitet. Dessa behov är en del av bakgrunden till detta arbete. En annan del var strävan att implementera de erfarenheter och lärdomar som genererats i de tre på varandra följande projekt som drivits av Allan Rodhe vid Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala universitet tillsammans med projektmedarbetare vid SMHI. I dessa av SGU finansierade FoU-projekt har man utvecklat en modell för framtagande av uppgifter på grundvattenbildningen i svenska typjordar (Rodhe, 2006), samt en modell för beräkning av grundvattennivåer ur nederbörds- och temperaturdata (Rodhe 2008 och 2009). Genomgående brukades inom dessa delprojekt tillämpningar på HBV-modellen. För beräkningen av grundvattennivå användes förutom den beräknade grundvattenbildningen parametrar för recession, s.k. recessionskoefficient, och den effektiva porositeten. Recessionskoefficienten motsvarar den fördröjande/dämpande effekt som magasinsegenskaperna har på grundvattennivåns avsänkning och den effektiva porositeten beskriver hur stor volym i ett jordlager som består av naturligt dränerbart vatten.

För utvecklingen av grundvattennätets möjligheter till utbyggnad genom modellerade grundvattennivåer genom ovan beskrivna modell var ambitionen i detta FoU att se om man kan finna ett praktiskt sätt att bedöma vilka värden som gäller för dessa tre parametrar i olika miljöer givet hur geologin och topografin ser ut.

Inom ramen för FoU-projektet har Gustav Sundén genomfört sitt examensarbete där syftet har varit att utifrån tillgänglig nivådata från SGUs grundvattennät beräkna värden på recessionskoefficienten, samt att få en förståelse hur denna varierar inom och mellan olika platser. Vidare har sambandet mellan olika hydrogeologiska faktorer och recessionskoefficienten studerats för att få en bild av hur dessa inverkar på varandra. Med kunskap om sambanden mellan de hydrogeologiska faktorerna och recessionskoefficienterna har sedan möjligheten att på plats kunna bestämma denna koefficient med kunskap om endast områdets geologi, jordart och jordmäktighet samt topografi utvärderats.

För att studera kopplingen mellan recessionskoefficienten och de hydrogeologiska faktorerna har värden på recessionskoefficienten beräknats med hjälp av tre olika metoder för 103 stationer i SGUs grundvattennät. Från dessa stationer har hydrogeologiska faktorer tagits fram som sedan använts för att undersöka deras inverkan på recessionskoefficienten. De hydrogeologiska faktorerna har varit topografi, jordart och storleken på den omättade zonen i jordlagren. Faktorn topografi beskriver i detta projekt om stationen ligger i inströmnings-/utströmningsområde, på en vattendelare eller i intermediär zon.

Metod 1 för beräkning av recessionskoefficienten baseras på en tidigare undersökning om recessionshastigheter i olika jordar av Olin (1995) där man plottar recessionshastigheten mot grundvattennivån. I metod 2 plottas två på varandra följande grundvattennivåer vilka ifrån man sedan kan beräkna recessionshastigheten (Langbein 1938). I metod 3 beräknas recessionskoefficienten utifrån en semi-logaritmisk plott där den logaritmerade grundvattennivån plottas mot tiden (Barnes 1939).

Resultaten visade att ett visst samband fanns mellan recessionskoefficienten och de hydrogeologiska faktorerna men att styrkan i sambandet skilde sig mycket mellan metoderna. Den hydrogeologiska faktorn

jordart visade att dess variation signifikant påverkar recessionskoefficientens variation i samtliga metoder. I metod 2 och 3 visade dessutom faktorn ”omättad zon medel” signifikanta resultat. Denna faktor beskriver medelavståndet från markytan till grundvattenytan (Sundén 2009).

Ambitionen i projektet har varit att finna tydliga samband mellan geologiska faktorer och på vilket sätt grundvattennivåerna avklingar. Denna studie visade att ett visst samband fanns men att detta var alldeles för svagt för att kunna dra några slutsatser om hur recessionskoefficienterna varierar med geologin. Detta beror på att recessionskoefficienterna är extremt platsspecifika. Istället måste man göra en platsspecifik kalibrering av recessionskoefficienten med stöd av en uppmätt nivåserie för att möjliggöra en modellering av grundvattennivåer utifrån meteorologiska data.

Planen framåt är att studera möjligheten att modellera fram nivåserier för dels stationer där nivåserier helt avslutats, och dels för stationer där manuella mätningar sker i dagsläget men där man vill ersätta mätningarna med modellerade nivåer. För att kunna modellera nivåserier för dessa platser med den metod som tillämpats i denna studie krävs det dock att grundvattenmagasinen är linjära, dvs. grundvattennivån har en exponentiell avsänkning. Möjligheten att modellera även icke linjära grundvattenmagasin kräver en ny metodutveckling. Förutom SGUs eget arbete med metodutveckling av grundvattenmodeller följs även SMHIs modellarbete med S-HYPE och möjligheterna att i den vidareutveckla modellering av grundvattennivåer. SGU hjälper också till med kunskapsstöd och dataunderlag i den övriga utvecklingen av S-HYPE.

Referenser

- Barnes, B.S., 1939: The Structure of discharge recession curves. *Trans. Am. Geophys. Union*, 20, 721–725.
- Johnson, J., 1992/93: Utveckling av metodik för simulering och prognos av grundvattennivåer. *Delrapport av SGU-finansierat internt FoU-projekt (konto: 5107)*.
- Langbein, W.B., 1938: Some channel-storage studies and their application to the determination of infiltration. *Trans. Am. Geophys. Union*, 19, 435–445.
- Olin, M., 1995: Estimation of Base Level for an Aquifer from recession rates of groundwater levels, *Hydrogeology Journal*, v. 3, no. 2.
- Rodhe, A., Lindström, G., Rosberg, J. & Pers, C., 2006: Grundvattenbildning i svenska typjordar – översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell. *Uppsala Univ., Dep. Earth Sciences, Hydrology Report Series A No. 66*.
- Rodhe, A., Lindström, G. & Dahné, J., 2008: Grundvattenbildning i svenska typjordarmetodutveckling av en vattenbalansmodell. *Uppsala Univ., Dep. Earth Sciences, Hydrology Reportseries A No. 71*.
- Rodhe, A., Lindström, G. & Dahné, J., 2009: Grundvattennivåer i ett förändrat klimat. *Uppsala Univ., Dep. Earth Sciences, Hydrology Report Series A No. 72*.
- Sundén, G., 2009: Hydrogeologiska faktorer påverkan på grundvattennivåns avklingning. *Examensarbete vid institutionen för geovetenskaper, ISSN 1650-6553 Nr 182*.

Grundvattennivåer i slutna akviferer i Sverige

– Analys av grundvattennätets data med avseende på bedömning av maximala grundvattennivåer i lerområden vid geotekniska stabilitetsutredningar

HÅKAN PERSSON & KARIN LUNDSTRÖM

Grundvatten spelar en avgörande roll för många geotekniska problemställningar. Sjunkande grundvattennivåer kan orsaka sättningar, medan höga nivåer kan göra slänter instabila och orsaka skred. Bedömning av såväl minimala som maximala grundvattennivåer är svåra att göra och brist på långa mätserier av grundvattennivåer är ofta en av orsakerna till detta. SGUs *Grundvattennätet* innehåller dock ett, för Sverige, unikt underlag av långa mätserier i ett stort antal grundvattenrör, vilket kan vara användbart för bedömning av extrema nivåer.

Det huvudsakliga syftet med den aktuella studien har varit att öka förståelsen för grundvattenfluktuationer i slutna akviferer i Sverige och deras beroende av yttre omständigheter som klimat, hydrogeologi och topografi. Vidare har syftet varit, att förbättra möjligheten för prognostisering av maximala grundvattennivåer utifrån ett fåtal mätningar. För dessa ändamål har undersökningarna i den aktuella studien till stor del fokuserats på grundvattnets variationsbredd, årstidsberoende samt nivåfördelning i Grundvattennätet mätstationer i slutna akviferer.

Resultaten har bl.a. visat på att grundvattennivåerna i de studerade områdena vanligtvis ligger någon meter under markytan, samt har en årlig variationsbredd omkring en meter. Såväl för nivån som för variationsbredden finns dock en spridning på ett par meter mellan de undersökta grundvattenrören. Vidare visade en variansanalys av vilka aspekter som påverkar den årliga variationsbredden mest, bl.a. att klassning av grundvattenrören i olika geografiska regioner såväl som i olika geologiska/topografiska typområden gav en signifikant skillnad i variationsbredd. I figur 1 framgår att variationsbredden är avsevärt större i region Öst än i övriga regioner, medan det i figur 2 framgår att variationsbredden i typområdet Flickig lerterräng är lägre än i övriga områden.

En integration av den aktuella studiens resultat i de metoder för prognostisering av maximala grundvattennivåer som används vid geotekniska utredningar bedöms vara möjlig, och även kunna förbättra precisionen i dessa.

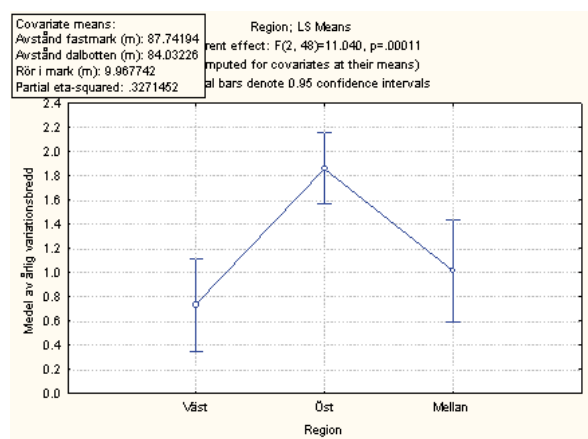


Fig. 1.

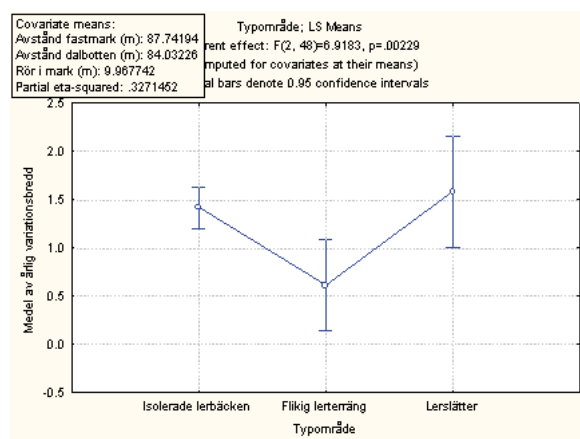


Fig. 2.

Rumslig modellering av grundvattenrörelse och nivå

Bo THUNHOLM, HELENA WHITLOCK, JOSEF KÄLLGÅRDEN & ANNIKA LINDBLAD

Arbeten med grundvattenmodeller vid SGU har hittills varit begränsade till enstaka projekt med avgränsade syften och hypoteser. En av projektets hypoteser var att grundvattenmodeller ska kunna användas som ett stöd i den löpande verksamheten, främst den hydrogeologiska karteringen men även inom arbeten med vattenförvaltningen och som stöd vid fastställande av skyddsområden m.m. Syftet har varit att

- testa möjligheterna att använda grundvattenmodeller som ett stöd inom hydrogeologisk kartering, främst angående möjligheter att avgränsa tillrinningsområden samt identifiera vattendelare och andra hydrauliska gränser, samt
- undersöka möjligheter att använda olika modellverktyg för att utifrån varierande underlagsinformation bygga upp grundvattenmodeller

Huvuddelen av modellarbetet, som utfördes med FE-flow, har fokuserats på två geografiska områden; Stockholmsåsen med omgivningarna och Svärdsjöåsen. Vid arbetet med Stockholmsåsen fanns stora mängder med data tillgängligt och modellstudierna kunde fokusera på att verifiera inom karteringen bedömda vattendelare och tillrinningsområden. Modellarbetet vid Svärdsjöåsen utfördes i samband med pågående kartering med relativt begränsad information.

De hydrauliska gränserna i Stockholmsåsen som bedömts i samband med karteringen visade sig i många fall stämma väl överens med grundvattenmodellen. I vissa fall skilde sig de hydrauliska gränserna vilket delvis kan bero på den förenklade konceptuella modellen som används för att bygga upp den numeriska modellen (fig. 1).

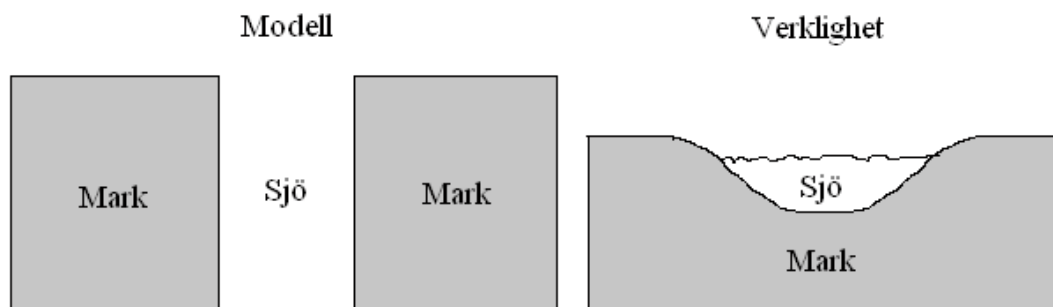


Fig. 1. Jämförelse mellan modellens uppbyggnad (vänster) jämfört med verkligheten (höger).

Beräknade tillrinningsområden till Stockholmsåsen skilde sig delvis från bedömningarna i karteringen (fig. 2). För att förklara skillnaderna behövs sannolikt fördjupade studier som inte ryms inom detta projekt. Skillnaderna visar dock att grundvattenmodeller är värdefulla redskap för att bidra till avgränsningar av tillrinningsområden.

I det inledande skedet av karteringen av Svärdsjöåsen valdes några begränsade delar ut för arbetet med FE-flow. Data från utförda undersökningar tillfördes modellen och resultaten pekade på vilka delar av åsen som borde prioriteras i den fortsatta karteringen. Ett exempel på detta finns i figur 3 där osäkerheter och egendomligheter i modellens flödesberäkningar pekar på ökat behov av karteringsinsatser.

Grundvattenmodeller kan användas som ett stöd inom hydrogeologisk kartering och andra verksamheter. Möjlighet finns exempelvis att börja använda en grundvattenmodell med befintliga data inom det område som ska karteras. Resultaten av modellarbetet kan peka på vilka delar av området som kan behöva prioriteras och vilka typer av fältarbeten som behöver utföras. Resultaten från fortsatta fältarbeten kan därefter tillföras modellen. Modellen utvecklas vidare och samverkar med fältinsatserna i en iterativ process utan någon de-

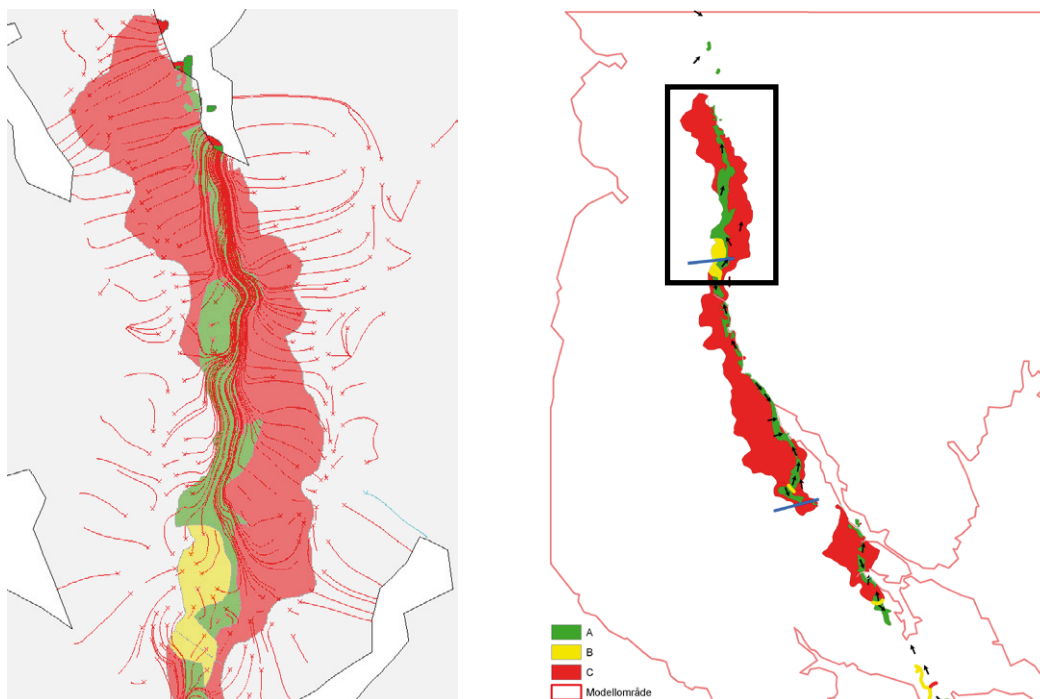


Fig. 2. Det modellerade tillrinningsområdets utbredning väst om åsen sammanfaller i stort med det karterade, däremot är det betydligt större nordost om åsen, men sammanfaller längre söderut med det karterade tillrinningsområdet. I den gula ytan (B) visar partikelspårningen att vattendelaren korsar åsen.

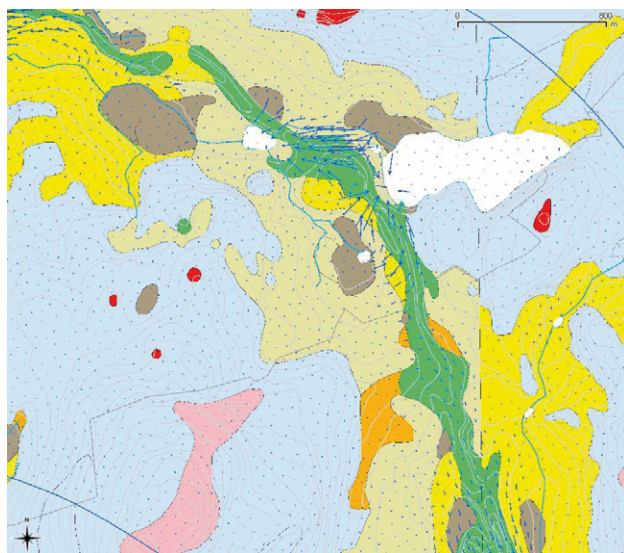


Fig. 3. Områden med stora skillnader i flöden pekar på behov av fortsatta undersökningar.

finitiv slutprodukt. Detta arbetssätt kan redan i dagsläget tillämpas inom grundvattenkarteringen. Det bör också noteras att en upprättad grundvattenmodell kan användas för olika typer av lokala frågeställningar, exempelvis etablering av övervakningsplatser, studier av föroreningsspredning m.m. Vilka modellverktyg som är mest lämpade varierar beroende på vilken typ av topografi och hydrogeologi som är aktuell. Resultaten av det här projektet pekar på att modeller baserade på finita element är mer lämpade för kuperade områden med varierande lagerföljder. I områden med "mjukare" topografi och tydligare lagerföljder kan dock modeller baserade på finita differens-metoden vara fullt användbara.

Grundvattnets kemiska tillstånd i Sverige – bearbetning och presentation

LENA MAXE

Inledning

Grundvatten används i Sverige idag som dricksvatten av ca 1,2 miljoner människor med egen brunn. Knappt en tredjedel använder vatten ur jordlagren (främst grävda brunnar) medan resten har bergborrhade brunnar. Det är emellertid stora regionala skillnader. Det uppskattas att ungefär lika många människor har dricksvatten från enskilda brunnar vid fritidsbostad. Eftersom vattnet oftast används utan rening så är vattnets kvalitet viktig. Det kan emellertid beräknas att vattnet i ungefär var fjärde brunn är otjänligt som dricksvatten. Ofta är den mikrobiologiska kvaliteten undermålig men det är också vanligt att vattnets kemiska kvalitet inte uppfyller Socialstyrelsens riktvärden. I det förra fallet står förklaringen till föroreningen att söka i brister i brunnens utförande eller att avloppsvatten förorenar brunnen. Detta förekommer främst i grävda brunnar. Grävda brunnar är också mer drabbade av nitrathaltigt vatten som kan vara en förorening från jordbruk eller avlopp. Vad avser andra kemiska parametrar som medför att vattnet klassas som otjänligt så är dessa vanligtvis av geologiskt ursprung.

I detta projekt har vattenanalyser i SGUs databaser utnyttjats i kombination med andra datakällor vad avser geologi och markanvändning. Syftet har varit att uppdatera den undersökning som gjordes på 1990-talet och att genom att fler vattenanalyser nu finns tillgängliga förfinas bilden av förekomsten av olika ämnen i grundvattnet. Projektet har samordnats med arbetet att ta fram nya bedömningsgrunder för grundvattnet. En annan ambition har varit att ge en kvantitativ uppfattning av hur vanligt problem med för höga halter av olika ämnen är¹.

Metod

Under de senaste åren har ett stort antal grundvattenanalyser tillkommit genom det tillsynsprojekt avseende enskild grundvattenförsörjning som Socialstyrelsen genomfört i samarbete med SGU². Befintliga analyser och de som tillkommer har granskats för att så långt möjligt säkerställa att de är homogena vad avser enhet etc. Till analysen finns viss kringinformation, typ av vattentäkt, vattenrening etc. De som har känt vattenbehandling har uteslutits. Till vattenanalysen har sedan kopplats information från SGUs databaser, främst berggrundsgeologi, respektive databaser som SGU förfogar över t.ex. markanvändningstyp. För de flesta av brunnarna har koordinater bestämts utgående från fastighetsbeteckning vilket leder till viss spatiell osäkerhet. Förutom enskilda brunnar ingår i vissa bearbetningar även information från miljöövervakningen samt kommunala vattentäkter.

Huvuddelen av GIS-bearbetningarna har gjorts med hjälp av Arc-GIS-systemet. Från den punktvisa informationen (vattenanalyser) så har interpolerade Sverigekartor framställts för grundvatten i jord respektive berg. Vid interpolationen har en metod som bygger på att en punkts betydelse avtar med avståndet från punkten (Inverse Distance Weighting) använts. Klassindelningen i kartan har i de flesta fall anpassats till den indelning i tillståndsklasser som används i bedömningsgrunderna.

En indelning av punkterna efter bergart har prövats. I de fall berggrundsinformation i lokal skala finns tillgänglig har denna använts i första hand (23 117 punkter), i andra hand har regional information använts (14 800 punkter). I sista hand och som stödinformation har databasen över Fennoskandien (668 punkter) använts. I några fall så har en och samma bergarter indelats beroende på ålder. Ett exempel är yngre och äldre graniter. Vattenkemiinformationen visade sig efter viss redigering representera 362 olika bergarter. Yngre och äldre granit, granodiorit, gnejsgranit, metagråvacka, gnejsgranodiorit, gnejsgranitoid och felsisk metavulkanit finns alla vid fler än 1000 provlokaler medan många av bergarterna finns endast vid ett fåtal av provlokaler, t.ex. finns 134 av bergarterna endast vid 4 eller färre lokaler. Med stöd av den befintliga bergartsgruppsindelningen har en ny indelning efter grundvattenkemiska utgångspunkter utarbetats.

Antal vattenanalyser	Bergartsgrupp i SGUs databas								Totalt
	Basisk intrusiv-bergart	Basisk vulkanisk bergart	Diabas	Omvandlad bergart	Sedimentär bergart	Sedimentär karbonat-bergart	Sur till intermediär intrusiv-bergart	Sur till intermediär vulkanisk bergart	
Ny bergartsgrupp									
Basisk bergart	1 115	390	283						1 788
Gnejsgranit, granodiorit							12 930		12 930
Granit; yngre							7 309		7 309
Granit; äldre							1 799	38	1 837
Metavulkanit								1 470	1 470
Omvandlad bergart				1 511					1 511
Sedimentär; fjäll					299				299
Sedimentär; alunskiffer					108				108
Sedimentär; gammal					2 277	1			2 278
Sedimentär; gråvacka					3 266				3 266
Sedimentär karbonatbergart					251	1 118			1 369
Sedimentär; yngre					1 246				1 246
Sur till intermediär bergart							1 892	1 268	3 160
Totalt	1 115	390	283	1 511	7 447	1 119	23 930	2 776	38 571

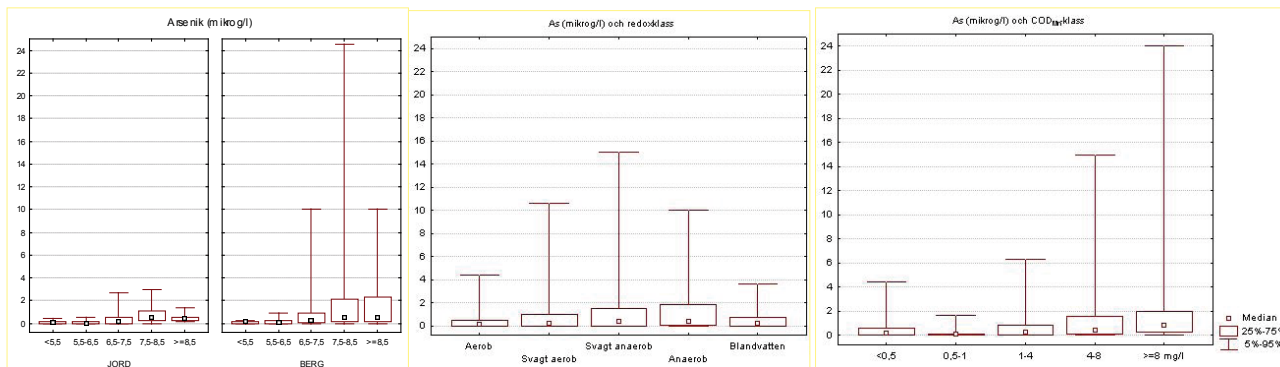
Inom områden som på den interpolerade kartan över en viss vattenkemisk parameter faller i en viss klass kommer inte alla punkter ha samma vattenkvalitet. I själva verket så är den spatiella variationen betydande även på korta avstånd. För att bättre kunna visa detta och för att det ska vara möjligt att förstå vad det betyder att ett område t.ex. faller i den högsta klassen så redovisas även fördelningen av provpunkter i olika klasser för varje kartklass. Detta ger också möjlighet att beräkna hur många som t.ex. har halter över gränsen för "otjänligt" respektive "tjänligt med anmärkning". För att detta ska vara möjligt används även resultat från Socialstyrelsens miljömålsenkät vad avser dricksvatten (Miljöhälsorapporten 2009). Från de enkäter som genomförts finns uppgifter om typ av vattenförsörjning från drygt 10 000 personer med egen brunn. Genom att använda information om det är en grävd eller borrhärd brunn respektive läget för dessa personers brunnar extraheras vilken kartklass brunnen faller inom (med avseende på viss parameter), sen används fördelningen av tillståndsklasser inom den aktuella kartklassen för att beräkna hur sannolikt det är att brunnsvattnet överstiger ett givet riktvärde för parametern. Slutligen så används den länsvisa informationen om hur många som har grävd respektive borrhärd brunn i varje län samt en faktor för att inkludera personer i alla åldrar för att beräkna hur många personer i varje län som har för höga halter i dricksvattnet. Länsvärdena summeras till ett riksvärde. Denna beräkning gäller de som använder vattnet vid permanentboende.

Exempel på resultat

Höga arsenikhalter i grundvattnet beror oftast på att arsenik som finns naturligt i jordlager och berggrund antingen i mineralform eller adsorberat till fasta faser frigörs. För att arsenik ska frigöras och nå höga koncentrationer i grundvattnet behöver dessutom de vattenkemiska förhållandena, främst pH och redox, tillåta detta.

Arsenik i halter över riktvärdet 10 µg/l förekommer i dricksvatten framförallt från bergborrhärdade brunnar. Arsenik frigörs under neutrala eller basiska förhållanden och vid något anaeroba förhållanden. Motsvarande skillnad kan ses om materialet delas in efter alkalinitetsklasser. Arsenikhalter över 5 µg/l inte har påträffats vid alkalinitetsvärden under 30 mg/l och att det är även sällsynt med halter över 1 µg/l vid så låg alkalinitet. I detta material förefaller det också finnas en koppling till vattnets s.k. oxiderbarhet eller COD_{Mn}-värde. Detta värde avspeglar vanligtvis vattnets innehåll av organiska ämnen men kan också påverkas av andra oxiderbara ämnen.

Redoxförhållandena har bedömts utifrån vattnets koncentration av järn, mangan och sulfat (enligt metod i Bedömningsgrunderna). Mycket låga arsenikhalter (<1 µg/l) är något vanligare vid aeroba (syrerika) förhållanden och andelen minskar med ökande grad av anaerobi. Det är emellertid inte så stor skillnad. Eftersom anaeroba vatten oftast förekommer i djupare grundvatten är i regel pH-värdet och alkaliniteten också hög



Arsenik i grundvatten i jord respektive berg vid olika pH-värden

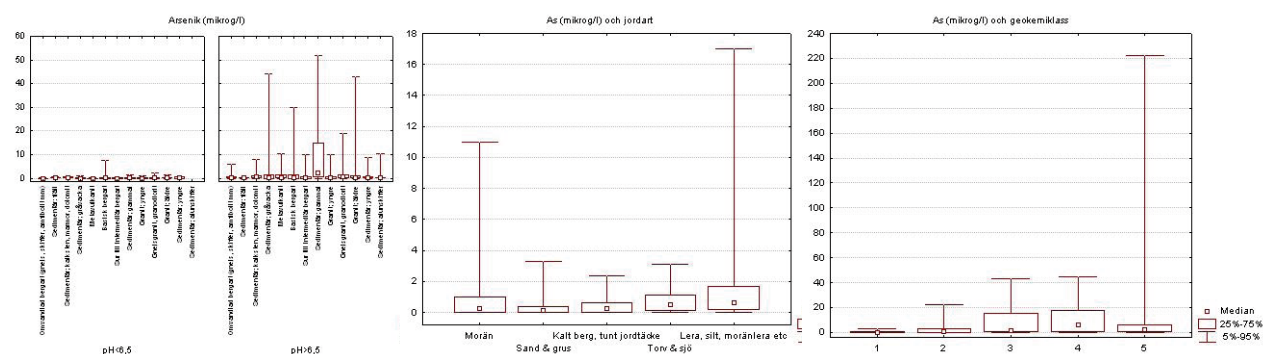
Arsenik i grundvatten vid olika redoxförhållanden

Arsenik i grundvatten vid olika mängd löst organiska ämnen (oxiderbarhet)

vilket ger en samverkande effekt. Det bör observeras att endast ett fåtal brunnar har klassats till redoxklass 4 (starkt anaeroba vatten). Blandvatten – dvs. vatten som bedömts inte vara i redoxjämvikt – verkar ha den lägsta risken för arsenikhalt över gränsvärdet.

Även om arsenik förmodligen förekommer i alla Sveriges bergarter så är halterna högre i vissa bergarter. I vilken utsträckning en viss bergart medför ökade halter i grundvattnet beror förutom de vattenkemiska förhållandena även på hur arseniken förekommer i bergarten bl.a. vilket mineral det är och hur exponerat det är för grundvattnets rörelse. I många fall kanske det inte är den huvudsakliga bergarten som ger höga halter i grundvattnet, det kan också röra sig om mindre inslag av en annan bergart eller sprickmineraliseringar. Det är känt att arsenik i grundvatten ofta frigörs från att ha suttit adsorberat på järnutfällningar³.

Denna sammanställning visar att grundvattnet i områden med äldre sedimentära bergarter och gråvackor ofta har förhöjda arsenikhalter vilket stämmer med tidigare studier⁴. En närmare granskning visar att fältspatkvartsit, fältspatkvartsit till glimmerskiffer, fältspatkvartsit till pelitisk paragnejs och argillit står för en stor andel av de höga arsenikvärdena. Metavulkaniter har ofta också bedömts ge höga arsenikhalter men har vid denna genomgång hamnat i mellanriskgruppen vilket ger att risken skulle vara ungefär lika stor som för granodioriter och gnejsgraniter och yngre sedimentära bergarter, kalkbergarter och basiska bergarter. Vad det gäller de basiska bergarterna är det de få analyserna från brunnar i andesit, basalt och eventuellt också diabas som bidragit med höga arsenikhalter.



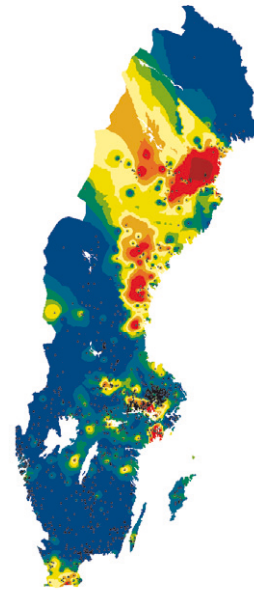
Arsenik i grundvatten vid olika berggrundsklasser uppdelat på pH-värden under resp över 6,5

Arsenik i grundvatten vid olika jordartsklasser

Arsenik i grundvatten vid olika geokemisklasser. Indelning efter arsenikhalt i moränen

De allra högsta halterna i grundvattnet återfinns i områden där geokemiska undersökningar påvisat hög halt i moränen. Däremot spelar typ av jordart mindre roll även om halterna tycks vara lägre i områden med tunna jordlager eller grovkorniga jordar.

I figuren visas den interpolerade kartan för arsenik i berggrundvatten. Det kan ses att det finns för få punkter i Norrlands inland för att få en korrekt kartbild (borde maskas bort). Totalt sett omfattar den högsta klassen (rött) knappt 4 % av Sverige, motsvarande för jordgrundvatten är ca 0,5 %. Av tabellen nedan framgår vad de olika kartklasserna motsvarar. Det framgår att i de gröna klasserna så finns enstaka bergbrunnar med halter över 10 µg/l att i de gula områdena något fler medan halten överskrider i 29 % av brunnarna i de orangea och i 67 % av brunnarna i de röda områdena.



Kartklasser	Andel analyser med olika arsenikhalt i de olika kartklasserna					summa
	<1	1–2	2–5	5–10	>=10 µg/l	
Blåa	0,93	0,05	0,01	0,00	0,00	1
Gröna	0,40	0,39	0,19	0,01	0,01	1
Gula	0,32	0,15	0,44	0,07	0,02	1
Orangea	0,19	0,11	0,16	0,25	0,29	1
Röda	0,10	0,03	0,12	0,09	0,67	1

Diskussion

I detta exempel visas några av resultaten från projektet. Arsenik valdes som exempel men många andra ämnen har studerats.

Riskerna för att arsenik i berggrund och jordlager ska lösas ut till grundvattnet kan bero på en rad faktorer om samvarierar i viss utsträckning. Med ökande djup, längre flödesvägar och ökande uppehållstid i grundvattnet ökar pH och alkalinitet medan redoxpotentialen sjunker. Med de längre och djupare flödesvägarna så ökar också sannolikheten för att arsenik i jordlager och berggrund ska påträffas samtidigt som de kemiska förutsättningarna för att arsenik ska gå i lösning ökar.

Beräkningarna visar att i storleksordningen 20000 personer med egen brunn har arsenikhalter i brunnsvattnet över riktvärdet. Motsvarande problem kan förutsättas finnas även vid fritidsboende. Metoden som använts vid beräkningarna är beroende av att en tillräckligt bra interpolerad karta kan tas fram. Säkerheten i uppskattningarna av antalet personer med otjänligt brunnsvatten kommer öka när fler analyser finns tillgängliga.

- 1) Socialstyrelsen & Karolinska institutet. 2009. Miljöhälsorapport 2009
- 2) Socialstyrelsen. 2008. Dricksvatten från enskilda vattentäkter. Ett nationellt tillsynsprojekt 2007
- 3) Smedley, P.L. & Kinniburgh, D.G. 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Applied Geochemistry 17 (2002) 517-568
- 4) Ek B.-M., Thunholm B., Östergren I., Falk R. & Mjönes L. 2008. Naturligt radioaktiva ämnen, arsenik och andra metaller i dricksvatten från enskilda brunnar. SSI rapport 2008:15. Rapport från Statens strålskyddsinstitut. Strålskyddsinstitutet (SSI) och Sveriges geologiska undersökning (SGU).

Table 1. Concentrations of As(III), As(V) (in g/L) and the ratio in bore-wells (BW) and in wetland springs WS). Figures are in µg/L for As(III) and As(V).

Sample	Source	As(III)	As(tot)	As(III)/As(tot)
VB-5	BW	319	298	1.09
VB-22	BW	0.25	12.9	0.02
VB-56	BW	0.8	12.9	0.12
VB-57	BW	24.3	24.2	1.00
VB-59	BW	1.2	6.1	0.20
VB-60	BW	18.1	178	0.10
VB-61	BW	49.2	201	0.24
VB-201	WS	68	70	0.97
VB-202	WS	49	50	0.98
VB-205	WS	51	64	0.80
VB-206	WS	34	40	0.85
VB-215	WS	10	31	0.32

The As concentrations in the wetland springs were strongly correlated to the iron concentrations ($r^2 = 0.83$). The dissolved iron precipitated in the springs, drains and streams re-adsorbed most of the As (Gustafsson & Bhattacharya, 2007). Some wetland plants like *Equisetum* spp. had elevated As concentrations (Brooks *et al.*, 1981). In most bore-wells the higher As concentrations were associated with moderately elevated sulfate concentrations hinting to the possible effect of sulfide oxidation (Mukherjee *et al.*, 2008). There were also bore-wells which showed a mix of water where both ferric reduction and sulfide oxidation could be mobilizing the As. In the hard rock terrain the bore-wells can draw water from several fracture zones and water pumped can be in disequilibrium. There were quite a few samples with high nitrate concentrations, none of which had elevated As concentrations. Possibly the nitrate raised the redox level, stabilizing ferric hydroxides acting as adsorbents for As. There was as expected a clear reverse relationship between nitrate and dissolved iron.

The absence of As in concentrations higher than 10 µg/L in dug wells is probably associated with the large adsorption capacity of the B-horizon in the acidic podzolic soils in well drained sites of the terrain (Gustafsson & Jacks 1995). Groundwater in till was 7 µg/L in a site where the B-horizon content of As was 260 mg/kg. The pH of the B-horizon is typically around 5.

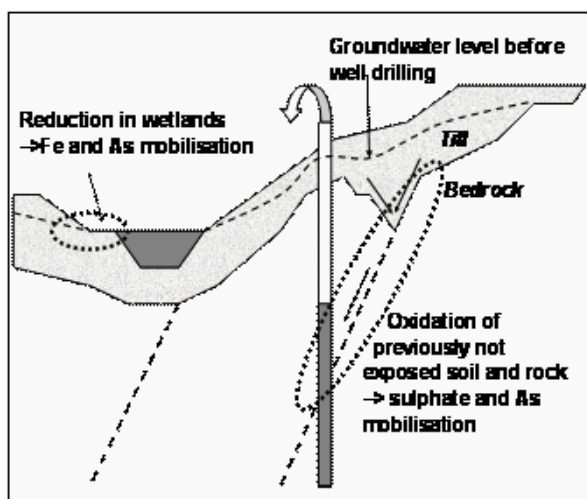


Fig. 2. Mechanisms of arsenic mobilization into wetland springs and seepages and into bore-well groundwater.

Two main mechanisms for mobilizing the As in the Västerbotten region namely, ferric reduction and release of adsorbed As notably seen in wetlands and sulfide oxidation mostly observed in bore-wells (Fig. 2). There are possibly some bore-wells with mixed mobilization. A few bore-wells may have recharge areas in low-lying areas with inflow of reduced groundwater.

References

- Andersson, M. & Lax, K., 2000: Metals in part of Västerbotten, Västergötland, Halland and Scania. *Geological Survey of Sweden Gk 2*.
- Brooks, R.R., Holzbecker, J. & Ryan, D.E., 1981: Horsetails (*Equisetum*) as indicator of gold mineralization. *J. Geochem. Expl. 16*, 21–26.
- Dumas, H., 1985: Sedimentary litho-facies in the central part of the Skellefte district. Unpublished report, *Luleå Technical University*.
- Gustafsson, J.-P. & Jacks, G., 1995: Arsenic geochemistry in forested soil profiles as revealed by solid-phase studies. *Appl. Gechem. 10*, 307–315.
- Gustafsson, J.-P. & Bhattacharya, P., 2007: Geochemical modelling of arsenic adsorption to oxide surfaces. *Trace metals and other contaminants in the environment 9*, 159–206.
- Lax, K. & Selinus, O., 2005: Geochemical mapping at the Geol. Survey of Sweden. *Geochem. Explor. Environ. Anal. 5*, 311–320.
- Mukherjee, A., Bhattacharya, P., Savage, K., Foster, K. & Bundschuh, J., 2008: Distribution of geogenic arsenic in hydrologic systems: Controls and challenges. *J. Cont. Hydrol. 99*, 1–7.
- Svensson, U., 1980: Geochemical investigation of minor elements of the principal Precambrian rocks of Västerbotten county, Sweden. *Geological Survey of Sweden C 764*. 79 pp.

Accounting of Black Carbon (BC) in the Swedish Marine Sediments

ÖRJAN GUSTAFSSON, LAURA SANCHEZ-GARCIA, MARTIN KRUSÁ & INGEMAR CATO

Black Carbon (BC) is the highly condensed carbonaceous particles formed from incomplete combustion of biomass and fossil fuel. It is becoming apparent that BC occupies central roles in several important processes in the geosphere, including:

1. Recalcitrant BC sequestered in sediments may be a net sink for carbon from the fast bio-atmospheric cycle and a source for the long-term geological carbon cycle. It may hence constitute a net sink in the national carbon budget
2. In aquatic sediment systems, the geospatial distribution of some prioritized organic pollutants appears governed by strong sorption to BC. Pollutants sorbed to BC in sediments may hence not be directly bio-available/toxic and this may be taken into account in assessment of sediment quality.

This SGU-funded project provides a first quantification of the BC inventory and burial fluxes in the Swedish EEZ sediments budget. Based on analysis of 120 samples from the SGU marine sediment database (MARP), now constituting the single largest database of BC in any continental shelf system, it was found that BC concentrations (avg. 2.44 mg/gdw) and BC:TOC (avg. 0.047) are here in the upper end of what has been found on other continental shelf regimes. The data population was pooled into ten previously established marine provinces and the inventory in the surface mixed layer and burial fluxes for accumulating bottoms were calculated based on sediment geophysical and geochemical properties from SGU, this project, and the literature. The highest concentrations and inventories were found in the W. Gotland Sea, presumably affected both by major population centers and long-range transport from the continent. The total burial flux of BC in the Swedish EEZ is on the order of 280 kton/yr. This national BC-based carbon sink can be compared with an estimate of the global BC emissions of 4 000–22 000 kton/yr and is of the same magnitude as an earlier estimate of the annual BC flux through the seven largest Arctic rivers combined of 200 kton/yr. The flux per area is on average 1.3 (mg/cm² yr), which demonstrates that the Baltic Sea is under heavy BC pressure compared to most other previously investigated marine regimes.

The BC data also offered the possibility to evaluate whether these combustion particles govern the geospatial distribution of pyrogenic PAHs in Swedish marine sediments. The relationship between PAHs and BC could not be explained by linear correlation, which generated weak regression coefficients ($r^2=0.04$, $p<0.10$). Instead, a non-necessarily-linear relationship was surmised from the stronger correlations measured by the non-parametric Spearman correlation coefficient (r_s) for BC (0.54, $p<0.01$) than for TOC (0.40, $p<0.01$), versus both the total and individual PAHs. The results from this field study, involving an order of magnitude more observation than any previous sediment study, represent a field manifestation of the relevance of the non-linear adsorption processes on the environmental distribution of planar aromatic pollutants. The implication of a strong association of PAHs in Swedish (and likely other) marine sediments is that the total PAH concentration is a poor measure of sediment quality. The risk for ecotoxicological response is lowered due to the decreased bioavailability.

Controlled source RMT (RMT med kontrollerad källa)

LAUST B. PEDERSEN, LARS DYNESIUS, JULIANE HÜBERT & MEHRDAD BASTANI

Introduction

The electromagnetic (EM) geophysical methods have shown a great potential in imaging underground geological structures. Models of electrical resistivity show its depth variation along profiles (2D) or as depth sections in grids (3D) where data were collected. The primary EM signal (EM waves) penetrates into the ground and the secondary EM signal (electric and magnetic field components) caused by the currents induced in the conducting earth materials is registered at the surface. For a homogeneous half space the depth penetration, Δ , is proportional to the square root of the ratio between the ground resistivity and the signal frequency. The EM methods used in this project are the controlled source/radio magnetotelluric (CS/RMT). The signal frequency is in the range 1–250 kHz. The lower frequency range (1–12.5 kHz) belongs to the CSMT and the higher range (14–250 kHz) to the RMT method. In the CSMT method the location, frequency, and signal strength of the transmitter can be controlled by the operator. In the RMT method the signal sources are the strong distant radio transmitters. Bastani (2001) presents the details of the EnviroMT instrument that we utilized for the CSRMT data acquisition. The transmitter used in the EnviroMT is a double horizontal magnetic dipole that is controlled remotely from the observation point (Fig. 1) by using radio modems. The EnviroMT system has been used in various geological/geophysical surveys. Linde and Pedersen (2004) show an application of RMT method in characterization of fractures in a granitic rock in Sweden. Pedersen et al. (2005) give an example of CSRMT measurements in underground water exploration in an area close to the city of Uppsala. In an environmental study Sohlenius et al. (2009) used the RMT data to detect and map the sulfidic clays in Sweden.



Fig. 1. The EnviroMT data acquisition system at the observation point and the double magnetic dipole source.

Plane wave criteria and near-field effect

For the data processing and modeling of MT data (e.g. RMT or CSMT) a plane EM wave assumption is usually made. This means that the observation point must be sufficiently far from the signal source (at least $\geq 5\Delta$) so that the plane wave or “*far-field*” assumption is fulfilled. Assuming a fixed source-observation point distance the “*near-field*” effect can arise because of the relatively large penetration depth of the generated fields. Bastani et al. (2009) present results from a mineral prospecting survey using the CSRMT method to delineate the hydrothermal stock work copper deposits in Iran. In this paper they interpret a conductor at a depth of 40–50 m in the 2D resistivity model as an artifact caused by the “*near-field*” effect. They assign this effect to the short distance between the observation points along the measuring line and the transmitter. One way to circumvent the problem is to increase the source-receiver separation. For a horizontal magnetic dipole source the signal strength drops with the cubic power of distance and hence increasing the distance causes a dramatic drop of the signal to noise ratio (S/N). Under typical Swedish conditions of crystalline

bedrock with high electrical resistivity the maximum depth of penetration is limited by the maximum transmitter-receiver distance rather than by the skin depth of the EM waves.

A new electric dipole source for deep investigations

Following the previous experiences we concluded that a new type of source is needed in order to obtain greater penetration depths. The only practical solution is the use of an electric dipole source. The range of such a signal can easily reach 10 km (Li et al., 2000). The configuration of the electrodes should be in two perpendicular lines (usually N–S & E–W), either in a cross or in an L-shape with a dipole distance of at least 150–200 m to simulate two different polarization directions. Each electrode point is a set of interconnected metal stair steps to get a large contact surface to the ground (Fig. 2). The electrodes are buried, saltwater can be added in dry conditions. Depending on local geological conditions the injected current can vary from one site to another. A site is considered to be acceptable if the injected current is in the order of several Amperes.

A 480V three phase gasoline generator mounted on a trailer, drives the transmitter that can deliver up to 3 kW power. A frequency generator secures a monochromatic signal at the desired frequency between 1 and 10 kHz. Due to the high voltage and power of the source it is important to take necessary safety precautions at the transmitter site. The electrode locations must be fully visible from the transmitter, enclosed and marked with a warning sign. One person as operator is needed to guard the source system at all times and if necessary instantly shut it down with an emergency switch on the transmitter. The current is injected first along the N–S dipole and then along the E–W one, generating two different polarizations of the fields. Figure 4 shows the spectrum of a 3.2 kHz signal recorded at ~3 km distance. Since transmitter and receiver are connected by radio communication, a mostly automated procedure enables fast data production. Only the polarization switching has to be done manually.



Fig. 2. Metallic stair steps as electrodes.



Fig. 3. Repeater antenna.

Communication

With the new electric dipole transmitter, the distance to the receiver can be increased up to 4-5 km. If the set-up is in a typical Swedish condition, with forest and topography, the coverage of the radio modems used with the magnetic dipole is not sufficient, not even with improved antennas. We have investigated and tested different communication alternatives for example the mobile broadband technique. We found that the most

flexible and reliable solution was the use of a new radio modem that operates in the VHF band at 150 MHz with a maximum output of 5 W for the carrier power. Another useful feature of the radio modem is that it can act as a repeater in a network configuration (see Fig. 3). This is of importance in an area with difficult communication conditions. Here, the repeater is placed at a higher elevation between the electric dipole source and the EnviroMT receiver, where it repeats the control commands from the receiver to the frequency generator at the source. At the transmitter site the radio modem displays the strength of the received signal from the receiver site and thus the operator can easily judge whether a repeater station is necessary or not.

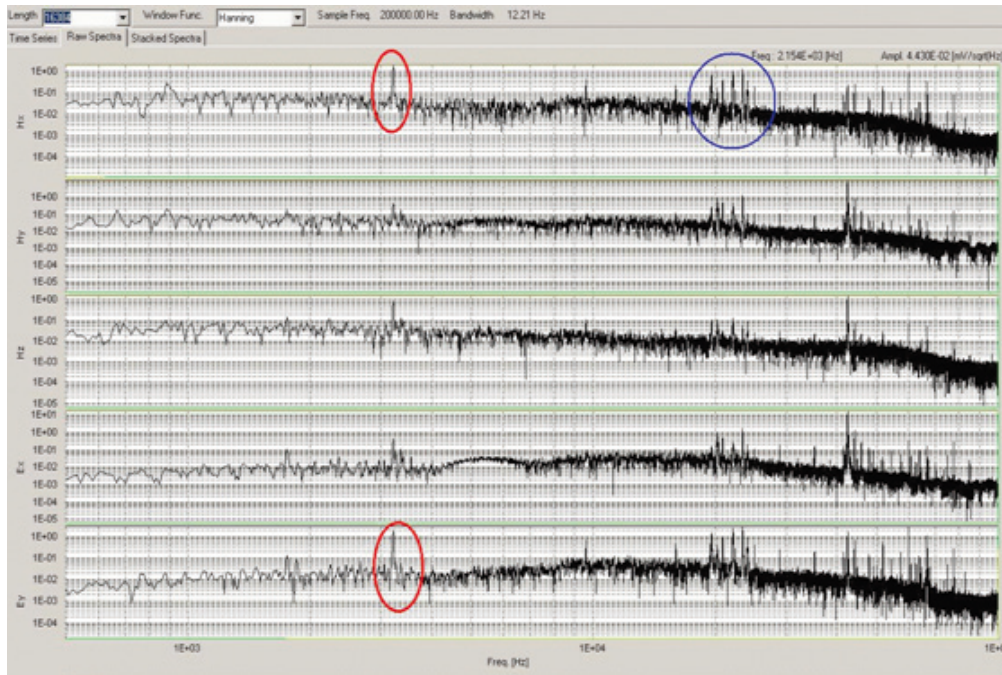


Fig. 4 Spectrum of the five field components recorded in the test area (top to bottom: H_x , H_y , H_z – magnetic fields & E_x and E_y – electric fields), in red: the signal of the electric dipole at 3.2 kHz in EW polarization, in blue: peaks in the VLF band

The radio modem antennas used are of type ground plane (GP). At the transmitter site the antenna is mounted on an eight meter air pressured controlled telescopic mast, mounted on the car. The repeater site has another eight meter telescopic mast and at the receiver site an antenna is mounted on a one meter aluminum tube.

Test measurements

First field tests over an old ore body in Ramhäll, Alunda demonstrate the possibilities of using the electric dipole transmitter in typical Swedish conditions. One dipole could be installed along a wet ditch which resulted an injected current of 4.5 A. The second dipole was aligned with a road with the injected current of 1.8 A. The source – receiver distance was 3.5 km and a repeater antenna was installed 1.5 km away from the transmitter. A very good radio communication was reached and the transmitter was easily controlled from the receiver site. Figure 5 shows an example of the acquired data as the variation of apparent resistivity and phase versus frequency. This can be considered as a depth scale (higher frequencies being related to shallower structures). The transition between the RMT and CSMT bands is smooth, although the error bars in the CSMT data are higher. This was due to a missing phase lock between transmitter and receiver. The quality of the results strictly depends on the stability of the receiver-transmitter clock systems. The necessary accuracy will be achieved by using GPS clocks for phase locking of the receiver sample clock and the transmitter frequency generator. This will be fixed for future measurements.

A complete measurement campaign is planned for May 2010 in the area of Hallandsåsen, Southern Sweden, where previous experiments with the magnetic dipole source were conducted that can act as a reference for data collected with the new electric dipole source.

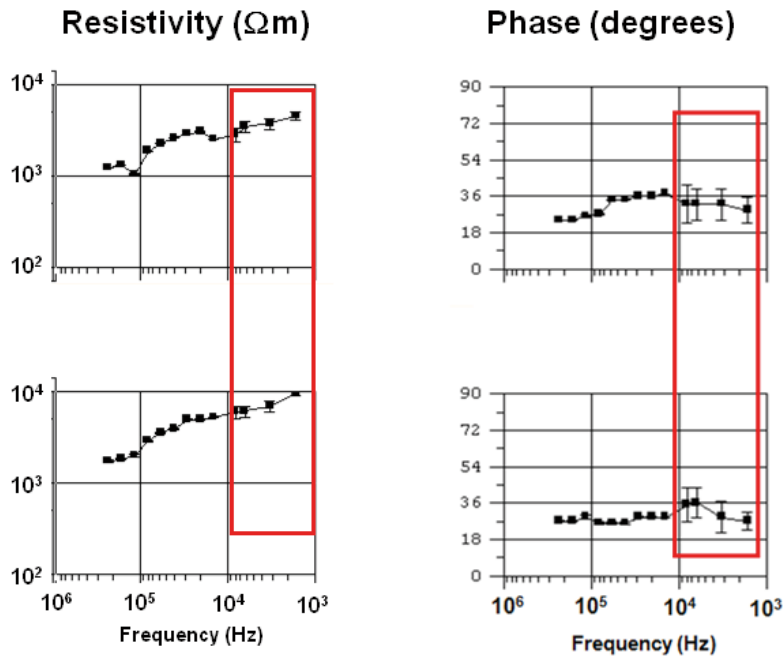


Fig. 5. Example transfer function, in red marked the frequency range covered by the controlled source method

Conclusions

The new concept of using an electric dipole source was tested in practice. The source installation is time consuming but due to the longer range with one source location several profiles can be measured. The presence of at least one person at the source location is indispensable due to security reasons. The use of the new radio communication technique with a repeater option provides the automatic feature of the interaction between the receiver-transmitter for longer distances. This provides greater penetration depth and thus the concept can be used in many shallow to intermediate geophysical surveys, e.g. environmental and mineral prospecting applications.

References

- Bastani, M., 2001: EnviroMT - A New Controlled Source/Radio Magnetotelluric System. Ph. D. thesis. *Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* 32.
- Li, X., Oskooi, B. & L.B. Pedersen, 2000: Inversion of controlled-source tensor magnetotelluric data for a layered earth with azimuthal anisotropy. *Geophysics* 65, 452–464.
- Linde, N., & L.B. Pedersen, 2004: Characterization of a fractured granite using radio magnetotelluric (RMT) data. *Geophysics* 69, 1155–1165.
- Pedersen, L.B., Bastani, M. & Dynesius L., 2005: Ground water exploration using combined controlled source and radiomagnetotelluric techniques. *Geophysics* 70, G8–G15.
- Sohlenius, G., Bastani, M., Persson, L. & Lax, K., 2009: On the recognition of areas with problematic sulphidic sediments using multi-disciplinary data. *Environmental Geology* 56, 973–984.

Modelling and interpretation based on data from joint geophysical measurements – application to SGU’s groundwater surveys

NIKLAS JUHOJUNTTI, MEHRDAD BASTANI, LENA PERSSON & JOCHEN KAMM

Introduction

By combining several geophysical methods instead of only performing one type of measurement, it is possible to better characterize the subsurface, as the methods are sensitive to different physical properties and have different characteristics in terms of depth resolution. The aim of our project has been to develop interpretation methods and to build expertise within the area of joint measurements, with particular emphasis on applications for the groundwater investigations which are regularly carried out by SGU. A common example of joint measurements found in the literature is the combination of refraction seismic measurements and electrical resistivity measurements, the latter often called DC measurements. The refraction seismic method is often used for determining depths to various interfaces, in shallow surveys these can be the groundwater table or the bedrock surface. However, there are situations when this method fails, such as when the seismic velocity does not increase with depth or when there is an insufficient contrast in the seismic velocity at an interface. This can be the case for a clay layer in a sandy sequence. However, clay layers are often detected through DC (and electromagnetic) measurements, as these are generally good electrical conductors. It would thus seem reasonable to combine the strengths of the two methods: the normally strong constraints on the boundary depths from the refraction seismic method and the ability of the DC method to detect good electrical conductors. The test sites for our project all contain such conductive layers.

Currently much research is focused on interpretation of joint geophysical measurements. For example, Gallardo and Meju (2004) describe joint modeling of DC and refraction seismic data for investigating lithological banding in near-surface unconsolidated sediments. Linde et al. (2006) present joint modelling of GPR and DC data acquired in two crossing boreholes for estimating hydrological characteristics of the vadose zone in a sandstone aquifer.

Within the project we have carried out joint geophysical measurements at three sites: 1) at a test-site for water infiltration at Mogetorp near Örebro, 2) across the old gravel pit in Sunnersta south of Uppsala and 3) at Uddeholm (the study at Uddeholm was partly financed by the SGU project “Östra Värmland lokal, jord”). At Sunnersta we have also drilled in order to calibrate the geophysical models (the term drilling is used throughout this text, although penetration test is perhaps a more correct term for many of these investigations). Below we discuss some results from our measurements. We also mention ongoing work to perform joint inversion using refraction seismic and DC data.

Case studies

The three test sites are considered representative of the environments normally encountered in SGU’s groundwater surveys. Sand and gravel sediments dominate at the Sunnersta and Mogetorp sites, and at both sites there is a rather thick water-bearing layer and a large depth to the bedrock. Clay units are present at both sites. At the Uddeholm site we have no drill-holes, however, we interpret the sediments to be more fine-grained than at the previous sites. From the initial refraction seismic measurements at this site it was unclear whether a water-saturated layer was present or not, and this uncertainty was the reason for including the site in the study by also acquiring DC data which could potentially be used to detect a water-bearing electrically conductive layer. In this text we focus on the sites at Sunnersta and Mogetorp.

Sunnersta

At Sunnersta (Fig. 1) we have acquired refraction seismic, DC and RMT data (RMT denotes radio-magneto telluric, see e.g. Bastani 2001). As mentioned above, we have also drilled at the site. The groundwater table is very shallow, located only about 2 meters below the surface at the centre of the gravel pit. The water-

bearing layer is clearly visible in the geophysical models (Fig. 2). In the seismic measurements it appears as a layer with a velocity significantly different from the velocity in the overlying dry layer and the underlying bedrock, a situation which is typical for this type of environment. In the DC and the RMT measurements it appears as a low-resistivity layer ($<400 \Omega\text{m}$). In general, the interface depths given by the geophysical models agree well with the drilling results, although the shallow high-resistivity region shown by the DC measurements extends somewhat into the water-saturated layer. This is partly due to the smoothing nature of the modelling technique used. The DC measurements show low resistivity at the eastern end of the profile, interpreted as due to clay sediments close to the Fyris river. This clay unit is not clearly resolved in the seismic model, although it should be noted that the unit is located at the end of the profile where the seismic data resolution is rather poor.



Fig. 1. Aerial photo of the gravel pit in Sunnersta. The location of the geophysical measurements shown in Fig. 2 is marked with a red line and the green stars show drill-hole locations.

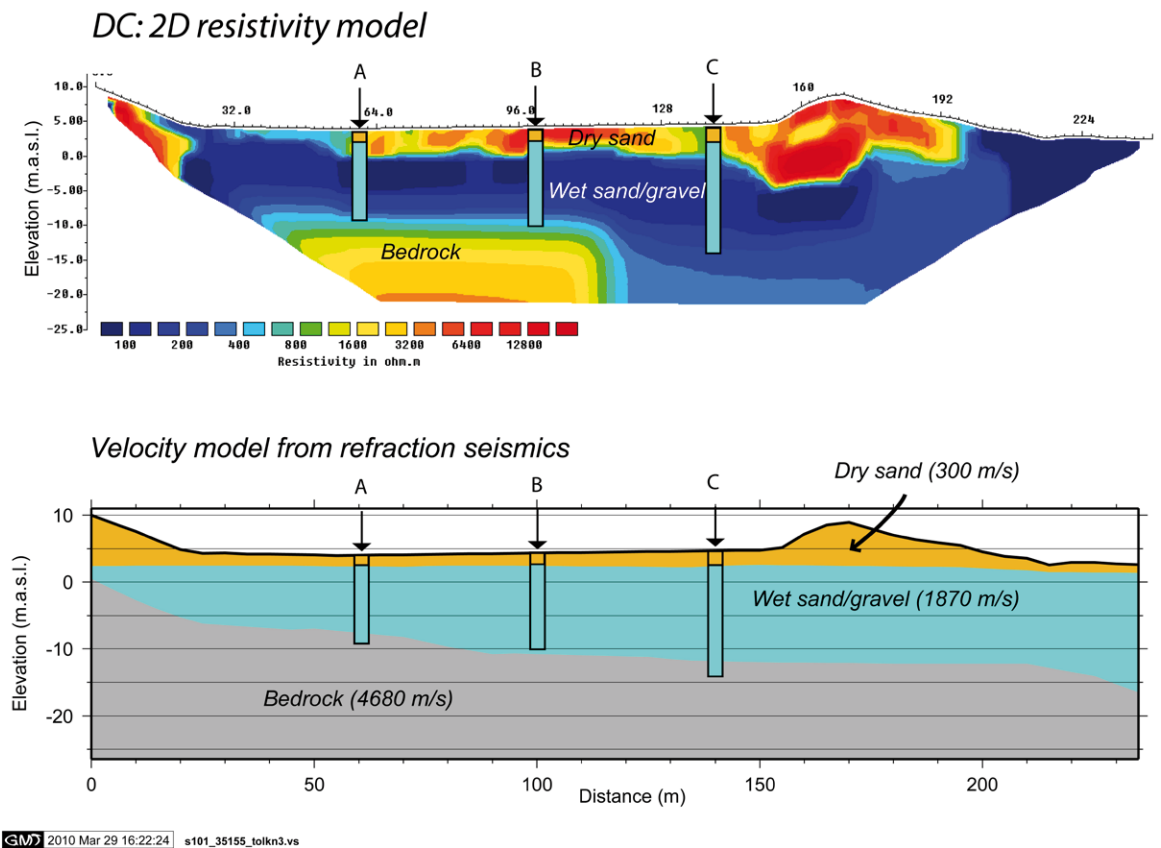


Fig. 2. Results from geophysical measurements at Sunnersta (see Fig. 1). The upper image shows a resistivity depth section based on DC measurements, the lower image a velocity model based on seismic refraction measurements. At ca. 170 m the profile crosses a small road.

Mogetorp

At Mogetorp a large sand and gravel formation was investigated. There are plans to use it as a groundwater supply for Örebro and to infiltrate water from a nearby river in order to increase the capacity. Unfortunately, thin clay lenses act as barriers for the infiltration. An important objective of the geophysical measurements was to test whether it was possible to detect and map the extent of these clay lenses. Therefore many geophysical methods have been tested at the Mogetorp site. Within this project we have used EM methods (RMT and Slingram) with a good lateral resolution, DC measurements (with a good vertical resolution) and seismic measurements. Seismic and GPR measurements have previously been performed by SGU, and there are many shallow drill-holes at the site.

In Figure 3 some results from the RMT and DC measurement are shown. The resistivity section from the DC measurements shows a layer with very high resistivity ($>10\,000\ \Omega\text{m}$) at the top, corresponding to dry sand and gravel. Below the groundwater table the resistivity is significantly lower ($<2000\ \Omega\text{m}$). The DC measurements indicate a discontinuity in the groundwater table at 120 m along the profile, an observation which is supported by drilling. Around 100 m a thin low-resistivity ($<200\ \Omega\text{m}$) layer is found that likely corresponds to a clay lens observed in one drillhole (x0601). The RMT measurements do not clearly show the shallow high-resistivity layer due to low resolution near the surface. However, the depth penetration is better for the RMT measurements than for the DC measurements (with the electrode separation used). The clay lens around 100 m is also identified in the RMT measurements, but not resolved as clearly as in the DC case. The resistivity variations within the sand and gravel deposit ($500\text{--}10\,000\ \Omega\text{m}$), as shown by both DC and RMT measurements, can be caused by variations in the composition and water content. At 180–240 m an extensive clay formation is present, clearly visible as a low-resistivity unit in the DC and EM models.

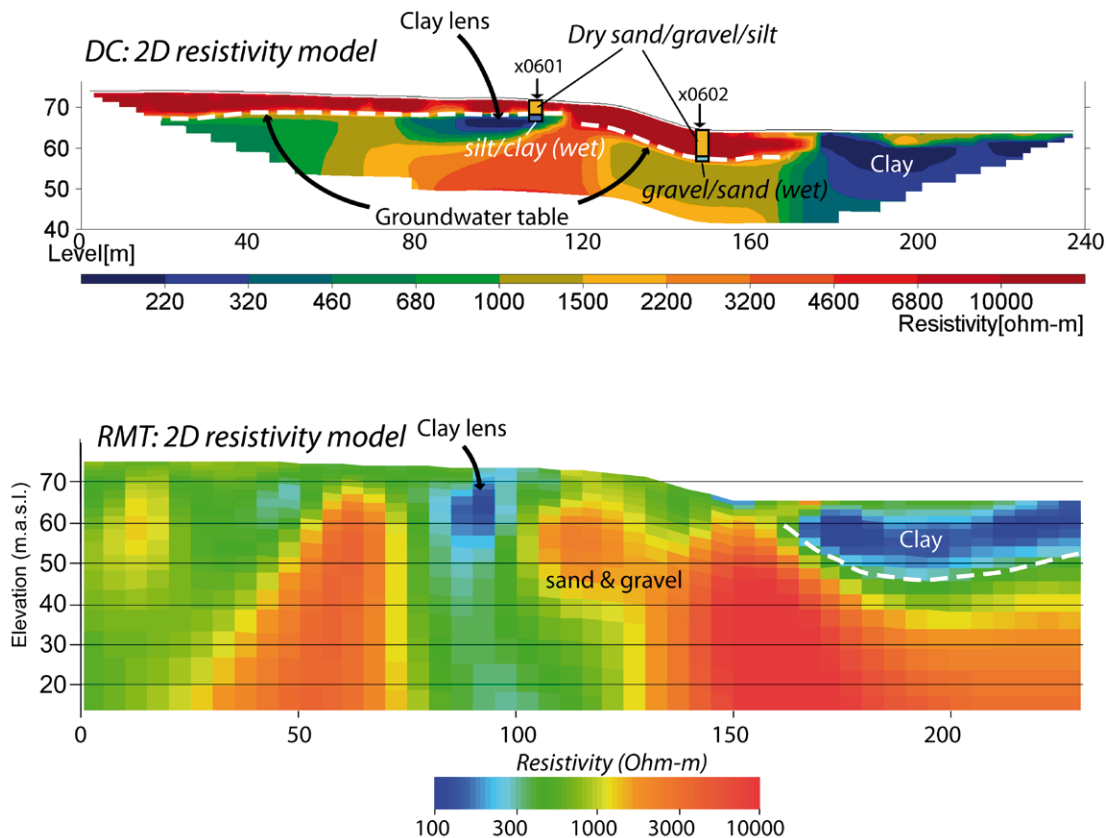


Fig. 3. Resistivity sections from DC (above) and RMT (below) measurements at the Mogetorp site. The sampling distance was 10 meters for the RMT measurements and for the DC measurements an electrode spacing of 2 meters was used. Results from two shallow drill-holes are also shown.

The seismic measurements performed within the project were focused on detecting reflections from thin clay lenses. Although it was not possible to generate signal with sufficiently high frequency to achieve this goal, a refraction interpretation of the data indicates strong lateral variations in the groundwater surface, and possibly multiple groundwater tables. This interpretation is also supported by a previous refraction survey at the site. The older refraction survey (specifically designed for this purpose) shows a bedrock depth varying between 40 to 50 m along the profile, slightly shallower than in a nearby deep drillhole. It should also be noted that the seismic data acquired within this project have been used in a surface-wave study conducted by personnel at Ramboll in Denmark.

Joint inversion of refraction seismic and resistivity data

The models above are all based on separate inversion/modelling of data from each geophysical method. Within the project we are also developing program code (in Matlab) for actual joint inversion of different types of geophysical data, a rather complicated work still in progress. The term joint inversion refers to the construction of a subsurface model with a response that simultaneously fits several types of measured data in some optimal sense. We have chosen to work with data from refraction seismic and DC measurements, although we believe that it would be quite easy to include data from other methods, such as from gravity or RMT measurements. There are several important sub-results from this work, such as the implementation of 2D forward modelling for DC data.

We use an implementation based on models with a few layers (typically three), with sharp transitions in the model parameters at the layer boundaries and smooth lateral variations within the layers. Such a model may better represent the subsurface in the type of environments normally encountered than does the smoothly varying grid models often used for these types of studies. There are a number of publications showing the application of sharp-boundary inversion on data from one type of measurement (e.g. Auken and Christiansen, 2004), however, we have not seen examples showing application of the sharp-boundary approach to the joint inversion case.

References

- Auken, E. & Christiansen, A.V., 2004: Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data. *Geophysics*, 69, 752–761.
- Bastani, M., 2001: EnviroMT – A New Controlled Source/Radio Magnetotelluric System. Ph.D. thesis. *Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* 32.
- Gallardo, L.A. & Meju, M.A., 2004: Joint two-dimensional DC resistivity and seismic travel time inversion with cross-gradient constraints. *J. Geophys. Res.* 109:B03311, doi: 10.1029/2003JB002716.
- Linde, N., Binley, A., Tryggvason, A., Pedersen, L. & Reil, A., 2006: Improved hydrogeophysical characterization using joint inversion of cross-hole electrical resistance and ground-penetrating radar traveltimes data. *Water Resour. Res.* 42:W12404, doi:10.1029/2006WR005131.

Detection and mapping of quick clays using CSRMT measurements

LENA PERSSON & MEHRDAD BASTANI

Introduction

This study shows the results of a research project that is collaboration between Geological survey of Sweden, the Norwegian Geotechnical Institute (NGI) and Engineering Geophysics Research Unit at the University College Dublin (UCD). Our part in the project was to carry out Controlled Source/ Radio MagnetoTelluric measurements (CSRMT) at Smørgrav, Øvre Eiker, southwest of Oslo. More details about this project can be found in (Pfaffhuber and Rømoen, 2009). The main objective of this work was to study the feasibility of using the CSRMT method to model the electrical properties of the quick clays and their vertical and lateral extents in the area.

The quick clay can be described as highly sensitive marine clay which has been deposited during the last glacial period. Due to post-glacial heaving these areas are now above sea level and consequently exposed to groundwater and percolating surface water which can lead to a reduction in pore water salinity. The structure of the marine clays is kept stable by the salt in the pore water. When the salt leaches, the bindings between the clay minerals weaken, and as a result the clay becomes sensitive.

Previous works has shown that it is possible to identify areas containing quick clay using electrical resistivity measurements (Solberg et al. 2008 and Lundström et. al. 2009). The reduction of pore water salinity will cause an increase in electrical resistivity in the quick clays. Intact, unleached marine clays show resistivities in the range 1–10 Ωm while quick clay shows slightly higher resistivity from 10 to 80 Ωm (Solberg et. al. 2008).

The CSRMT method

In the CSRMT method, electromagnetic (EM) signals in the frequency range from 1-250 kHz are utilized. In the high frequency band (12–250 kHz) distant radio transmitters are the signal source and in the low-frequency band (1–12.5 kHz) we make use of a double horizontal magnetic dipole source that can be remotely controlled from the receiver site. Two horizontal components of the electric field and three components of the magnetic field of the EM signal are measured. The horizontal components of the electric and magnetic fields are related by the earth electric transfer function, namely impedance tensor that is directly proportional to the resistivity of the ground. The signal at lower frequencies penetrates deeper into the ground and the variation of resistivity with depth can then be determined. The CSRMT data were acquired with the EnviroMT system, developed at Uppsala University (Bastani 2001). The EnviroMT system and the transmitter setup are shown in figure 1.

The Smørgrav research site

The measurements were carried out at Smørgrav site that is located approximately 65 km southwest of Oslo. Detailed geotechnical investigations by NGI have shown the existence of quick clay in the area. Several geophysical techniques have been utilized at the site as well as RCPT (resistivity cone penetration test).

A 330 m long CSRMT profile was measured on the arable field. The profile starts near a small river and ends up close to a farm. The double magnetic dipole transmitter was set up 300 m from the middle of the profile (fig. 2). Data were acquired with a sampling distance of 10 m. The selected frequencies in the controlled source were 2, 4, 8, 10 and 12.5 kHz. In the RMT frequency range we were able to use the signal from 24 to 34 radio transmitters depending on the time of measurement during the day. With this configuration the time spent at each station was about 15 minutes.

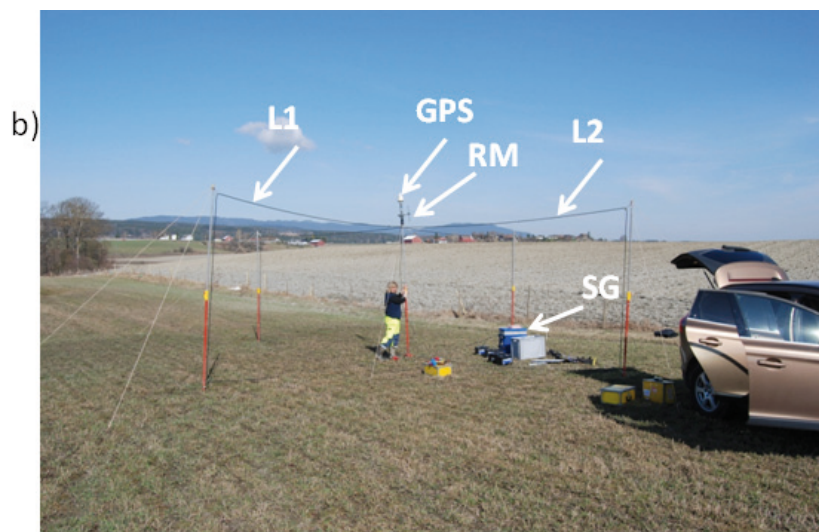
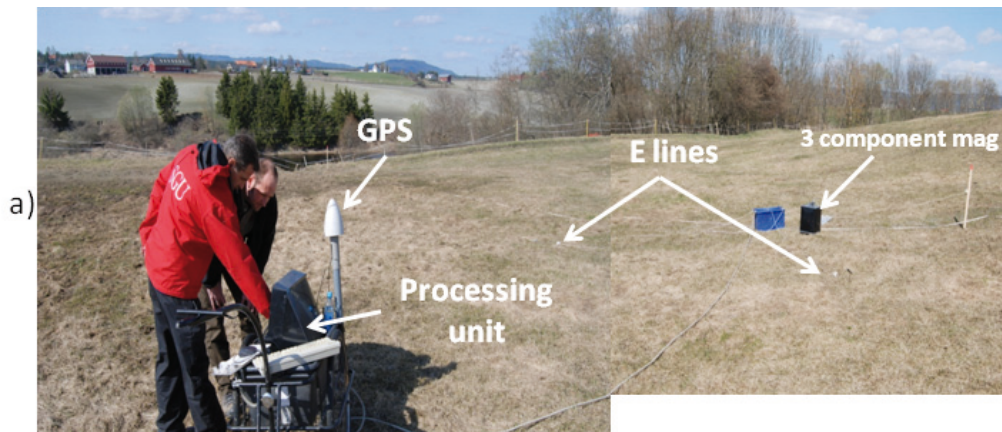


Fig. 1. a) At one of the receiver sites along line 1 where the electric lines, magnetometer, GPS antenna and the processing unit are shown. b) Transmitter setup showing GPS, transmitter loops (L1 & L2), radio modem antenna (RM) for remote controlling of the source from the receiver site and the HP signal generator (SG).

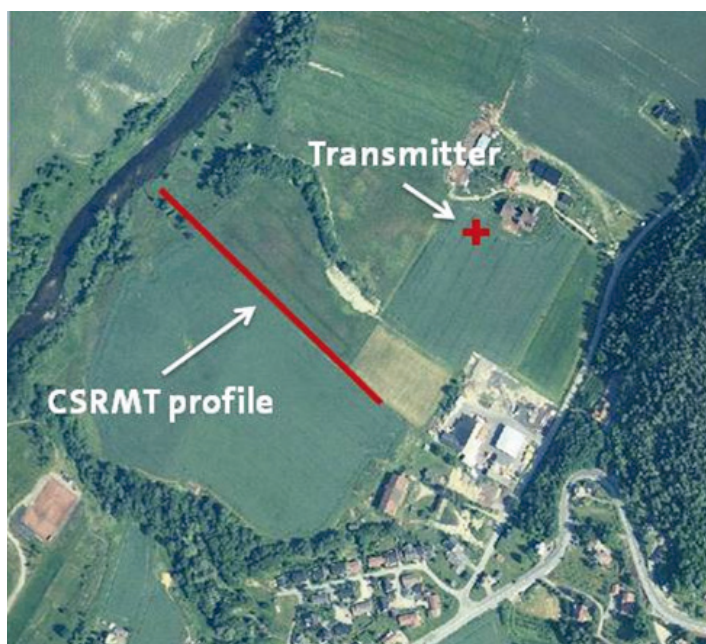


Fig. 2. Location of the CSRMT profile and the double dipole transmitter at Smørgrav. Note that the length of profile is 330 m.

2D-modelling

For the modeling of the CSRMT data we used the REBOCC code modified by Thomas Kalscheuer (Kalscheuer et al., 2008). The inversion method used is of Occam type and is based on the smoothing regularization. An error floor of 0.06% on the apparent resistivity and 0.03 radians on the phase are used to reduce overweighting of the data with small errors. A set of blocks with fixed widths and thicknesses are established and the program inverts for the resistivity of the blocks. The thickness of the blocks increases logarithmically with depth due to the fact that the resolution of the electromagnetic methods decays logarithmically with depth.

A joint Transverse Electric (TE) and Transverse Magnetic (TM) mode data inversion was carried out. The TE data represent the system of currents flowing in the strike direction and the TM data the currents flowing in the plane normal to the strike. The TE data maps the good conductors in the plane perpendicular to the profile and the TM maps the resistivity variations along the profile plane.

Results

The results from the 2D inversion are shown in figure 3. The resistivity model shown here is only based on the RMT data (14.1- 250 kHz). A larger depth penetration is achieved if we include the lower frequencies in the CSMT band. The model shows a large variation in resistivity both vertically and laterally. The thin moderate resistive layer (thickness < 2m) at the top may correspond to dry soil. Between 80–180 m along the profile we see a layer with medium resistivity (10–80 Ωm) at a depth down to almost 20 m that may indicate the presence of quick clay. Lower resistivities (3–8 Ωm) are found at depth closer to the river (0–80 m) and also below the quick clay layer. This zone indicates unleached marine clay. This result is also in agreement with the geotechnical data that indicated the extent of quick clay at the site. Further up along the profile the resistivities increase to 100–300 Ωm indicating coarser sediments like sandy moraine.

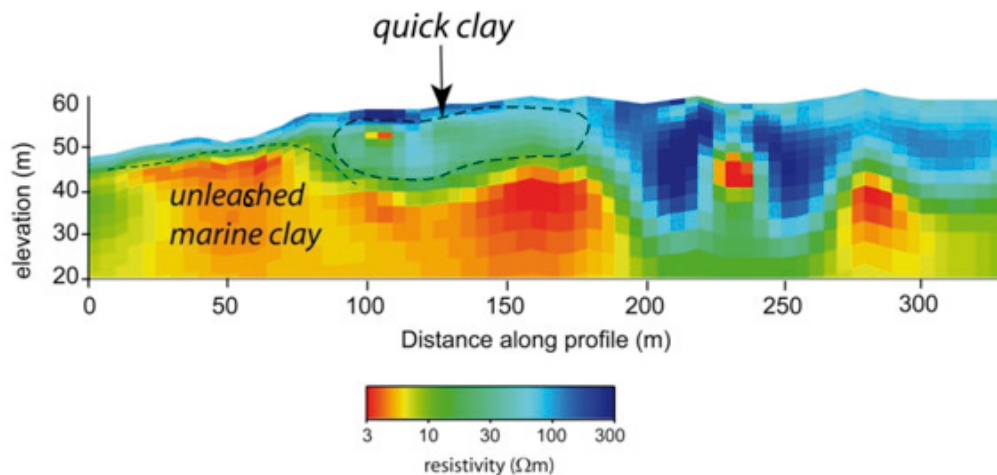


Fig. 3. The results of 2D inversion of RMT TE+TM data along the profile at Smørgrav.

The low resistivity zone below the thick resistive layer (at distances >250 m) is a particular resistivity structure resolved by the RMT method. According to the results found from the modeling of refraction seismic data the gneissic bedrock with a velocity of about 4 km/s is resolved at this location. Inversion of the CSRMT data has shown that in the ending parts of the profile a very conductive zone at depth exists. We have checked the existing geological information and based on the Norwegian Geological Survey (NGU) alum-shales exist in this area. Therefore the low resistivity structure at depth can be caused by the alum-shales.

Conclusions

Geophysical measurements of the electrical resistivity can be used to identify areas with quick clay. They need however to be calibrated by geotechnical information. However, initial resistivity measurements/models can be a good reference to minimize the cost for the geotechnical samplings.

There is a good correlation between the resistivity model obtained from CSRMT data and the RCPT soundings at the test site. The results from the CSRMT measurements are also in good agreement with the results obtained from other geophysical techniques such as refraction seismic and DC-resistivity measurements carried out along the same profile. The low resistivity zones ($<10 \Omega\text{m}$) correspond to the unleached marine clays. The intermediate resistivity ($10\text{--}80 \Omega\text{m}$) probably indicates the quick clays. The bedrock has a high resistivity $> 300 \Omega\text{m}$. The depth penetration of the CSRMT method is considerably larger compared to the other methods used in the study and the data can be used to model thickness of the conductive unleached marine clay as well as the structures in the deformed bedrock.

References:

- Bastani, M., 2001: EnviroMT – A New Controlled Source/Radio Magnetotelluric System Ph.D. thesis. *Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* 32.
- Kalscheuer, T, L.B. Pedersen & W. Siripunvaraporn, 2008: Radiomagnetotelluric two-dimensional forward and inverse modelling accounting for displacement currents. *Geophysics Journal International*, 175, 486–514.
- Lundström, K., Larsson, R. & Dahlin, T., 2009: Mapping of quick clay formations using geotechnical and geophysical methods. *Landslides*, v 6, n 1, 1–15.
- Pfaffhuber, A.A. & Rømoen, M., 2009: Multi-method Quick Clay mapping at Smørgrav, Øvre Eiker. *Norwegian Geotechnical Institute, Report: 20091013-00-24-R*.
- Solberg, I.L., Ronning, J.S., Dalsegg, E., Hansen, L., Rokoengen, K. & Sandven, R., 2008: Resistivity measurements as a tool for outlining quick clay extent and valley-fill stratigraphy: a feasibility study from Buvika, Central Norway. *Canadian Geotechnical Journal*, 45, 210–225.

Modifiering och optimering av MFR mjukvara för flygmätning, FoU projekt 35192

MATS WEDMARK, SÖREN BYSTRÖM, MEHRDAD BASTANI, LARS DYNESIUS & MICHAEL SCHIESCHKE

Abstract

Under de senaste åren har Uppsala universitet (UU) tillsammans med SGU utvecklat ett nytt elektromagnetisk (EM) multifrekvens mottagare instrument (MFR) som bygger på RMT-principen. Detta har under ett antal år använts framgångsrikt vid mätningar på marken. Den stora skillnaden mot det system som idag används av flygmätningen på SGU, är att man på ett bättre sätt kan få fram hur elektriskt ledande strukturer fördelar sig på djupet. Detta uppnås genom att man använder information från alla tillgängliga radiosändare i LF- och VLF-banden (10–250 kHz). Bestämning av märgelstenens laterala utbredning på Gotland och kartläggning av sulfidhaltiga jordar är aktuella exempel på lyckade tillämpningar av metoden.

MFR principen och data bearbetning

MFR-systemet samplar det magnetiska fältet i tre riktningar med 500 kHz och 24 bitars upplösning. Data sparas kontinuerligt undan som tidsserier på en extern PC med en hastighet av ca 6 Mb/s. Totalt samlas ca 80 Gb data in för ett normalt flygpass. Ur tidsserierna genomförs en "Fast Fourier transformation" och sorteras användbara sändare genom att beräkna signal brus förhållandet. Markens respons återspeglas i tipporn som beror på de magnetiska komponenterna:

$$H_z = [A(\omega)B(\omega)] \begin{bmatrix} H_x(\omega) \\ H_y(\omega) \end{bmatrix}$$

Där A och B är tippervektorns komponenter och H den magnetiska vektorn för en frekvens. Om transferfunktionen kan antas vara konstant i ett frekvensband, kan den komplexa tipporn beräknas för valfritt subband:

$$A(\omega) = \frac{\sum_{i=1}^n S_{11}^i \times \sum_{i=1}^n S_{23}^i - \sum_{i=1}^n S_{21}^i \times \sum_{i=1}^n S_{13}^i}{\sum_{i=1}^n S_{11}^i \times \sum_{i=1}^n S_{22}^i - \sum_{i=1}^n S_{21}^i \times \sum_{i=1}^n S_{12}^i}$$

Där $S_{i,j}$ är auto/cross power av kanalerna i, j. Med denna "band-tipper" kan medelresistiviteten i bandets djupintervall (se fig. 1) beräknas. Mjukvara för att effektivisera testmätningarna och göra de första momen-

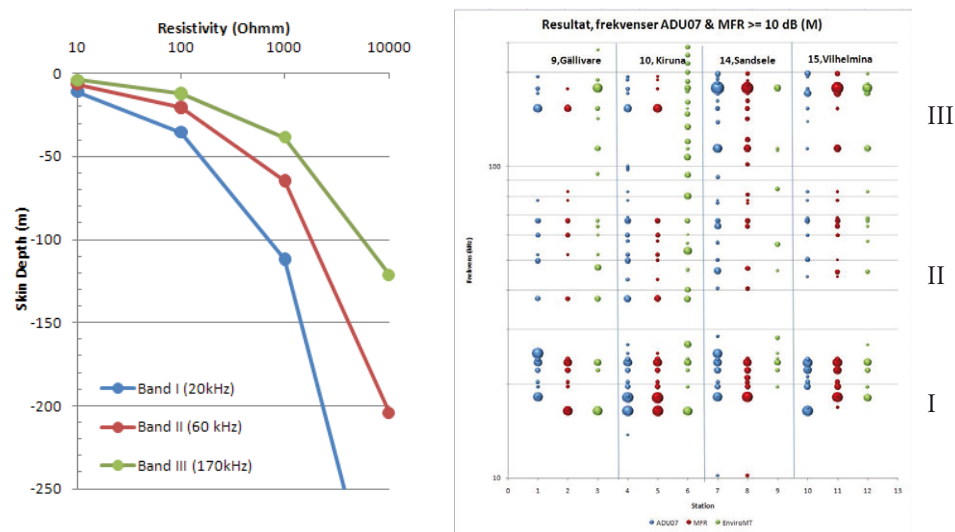


Fig. 1. Tv. EM-vågens teoretiska nedträngningsdjup i mark med olika elektrisk ledningsförmåga och dess frekvensberoende. Bilden visar "djupseendet" för tre olika frekvensband i intervallet 10 till 200 kHz. Exempel på tillgängliga sändare i resp. band ses i bilden t.h.

ten av bearbetningen finns idag i sådant skick att de är lätt implementerbara. Det andra steget, att ta fram ett produktionsmässigt dataflöde i flygets bearbetningsmiljö Oasis montaj har inte tagits då de begränsade resurserna fokuserats på att lösa de problem som framkommit under projektets gång.

Testmätningar och EM brus

Under hösten 2007 gjordes tester med systemet monterat i mätflygplanet över ett område nära Falun som tidigare undersökts med flera EM-metoder (slinggram, VLF och TEM). Resultaten visade att data var starkt påverkat av EM-bruset som skapades av flygplanet samt SGUs övriga instrument. Bruset från flyplanets generator höjde bakgrunds-nivån betydligt så att ingen förstärkning användes. SGUs mätsystem skapade en EM signal med en basfrekvens på 27,9 kHz. Signalen hade jämna och ojämna harmonier (55,8 kHz, 83,7 kHz, ...) som ligger i det mätband och innehåller de viktigaste radiosignalerna, dvs. 10–250 kHz. En ny metodik utvecklades för att identifiera och filtrera bort det mesta av brus-signalen men data hade fortfarande låg signalamplitud på grund av den låga förstärkningen.

För att kunna bemästra brusproblemet kontaktade vi (Lars Dynesius från Uppsala universitet & Mehrdad Bastani från SGU) ett tysk företag som heter Metronix GmbH. Företaget har lång erfarenhet av att tillverka EM-instrument och magnetometersensorer. De lånade oss sitt instrument, ADU07, för att utvärdera det i en ganska kort flygtestmätning. Instrumentet används för markmätning i ett ganska brett frekvensband. Under 2008 utvecklade vi en helt ny programvara för att kunna bearbeta de stora volymer insamlade data som produceras (ca: 80 GB per flygpass) vid ADU07. Resultaten blev mycket bra och stämmer väl överens med SGUs flygdata i det s.k. VLF-bandet. Det konstaterades även att magnetometern stördes av MFR-antennen, vilket gjorde att en ny noskåpa beställdes till flygplanet för montering av magnetometern.

Under vintern 2009 gjordes en inventering av befintliga VLF- och LF-sändare i de områden som flygmätningar kommer att utföras de närmaste åren. Detta gjordes för att säkerställa metodens tillämpbarhet i dessa områden. Generellt är det betydligt större utbud av tillgängliga sändare i södra än i norra Sverige. Mätlokalerna visas i figur 1. Inventeringen tog totalt fem dagar att genomföra.

För att kunna beräkna Tipper behövs minst två sändare i varje frekvensband. Dessa mätningar visar att det är troligt att ett tillräckligt antal sändare finns att tillgå även i dessa områden (fig. 2).

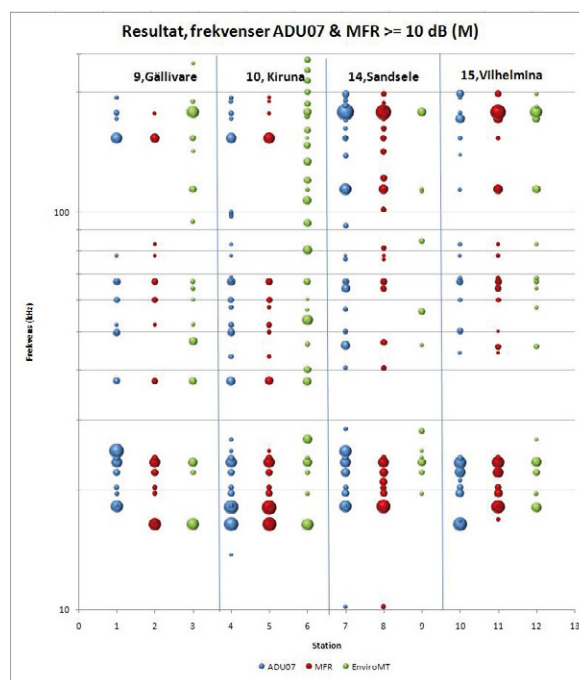
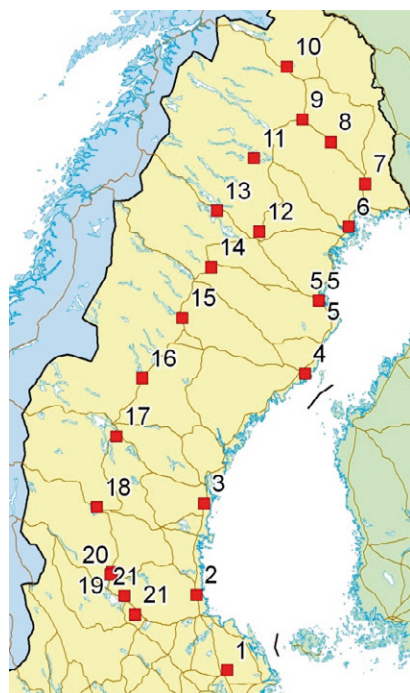


Fig. 2. T.v. Mätplatser för inventering av befintliga sändare. T.h. Resultat från ett urval av mätstationerna. Vertikala skalan visar frekvensen logaritmiskt. Storleken på bubblan är proportionell mot S/N-ratio. Värderna mindre än 10 dB är bortsorterade.

Med hänsyn till de lovande resultaten från inventeringen lånades ADU07 för att genomföra en test tillsammans med SGUs ordinarie mätsystem i full drift. I den nya testen användes en ny laptop för uppstart och datainsamling införskaffades under våren (fig. 3).

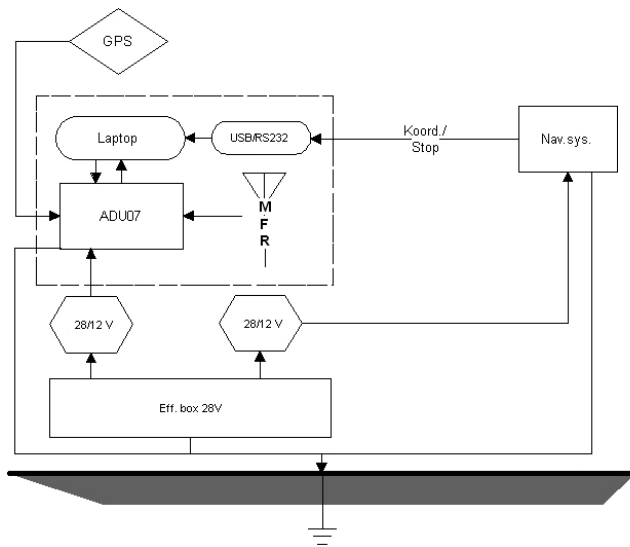


Fig. 3. Systemskiss som schematiskt visar mätuppställning under testerna våren 2009. Streckad linje avskärmar MFR-systemet.

Datainsamling gjordes på en lös USB-disk. I samband med kalibrering av spektrometern gjordes en test av systemet i luften med både batteridrift och DC/DC converter. Ett filter konstruerades till DC/DC convertern för att minska störningar från dess switchfrekvenser med harmonier. Efter testmätningarna var intentionen att låta MFR-systemet vara med under de reguljära flygmätningarna över Boden i en testperiod. För att möjliggöra detta flyttades VLF-antennen till noskonen. När data analyserades efter de första testerna, framträdde en ny variant av brusmatta som senare visade sig vara genererad internt av USB/RS232 konverteraren mellan navigeringssystemet och laptopen. För att inte riskera SGUs kartering i området avbröts testerna. Uli Matzander på Metronix kontaktades för en systematisk genomgång av brusproblematiken i slutet av oktober. Testerna gjordes i en hangar på Rörbergs flygplats (Gävle) och dessa visade att den analoga jorden på ADU07 var en nyckel för att lösa stora delar av brusproblematiken (fig. 4). Till dessa tester hade

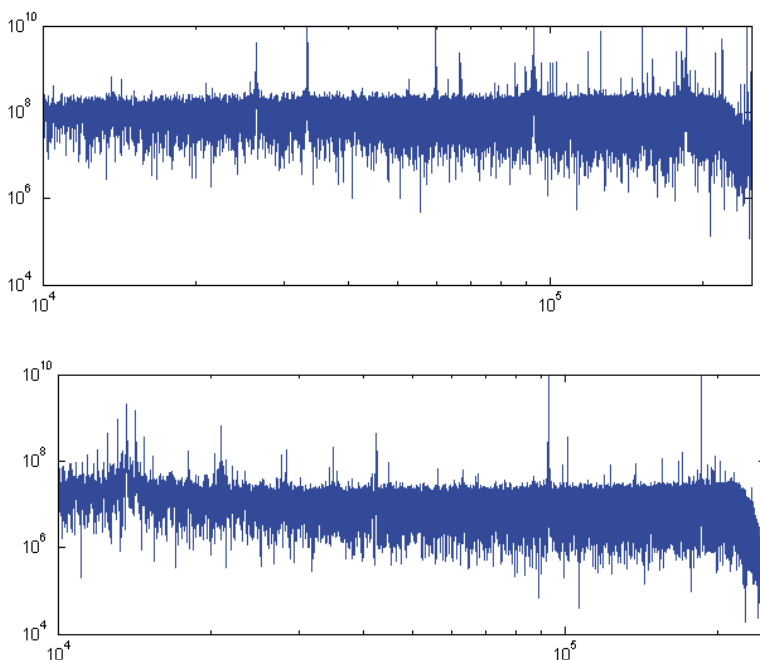


Fig. 4. Spektra av Hz-komponenten från två av testmätningarna i oktober 2009. Överst: Spektra med analoga jorden på ADU07 ojordad. Nederst: Spektra med analoga jorden på ADU07 jordad och en markant minskning av både grundbrus och brusfrekvenser. Samma tendens ses i alla tre komponenterna

även ny mjukvara tagits fram (gjordes av Michael Schieschke) för att snabbare kunna avgöra kvaliteten på mätningarna, vilket avsevärt underlättade kvalitetskontrollen.

En kort flygtest gjordes för att verifiera markttesterna. Även i luften visar data att grundbruset reducerats kraftigt (fig. 5).

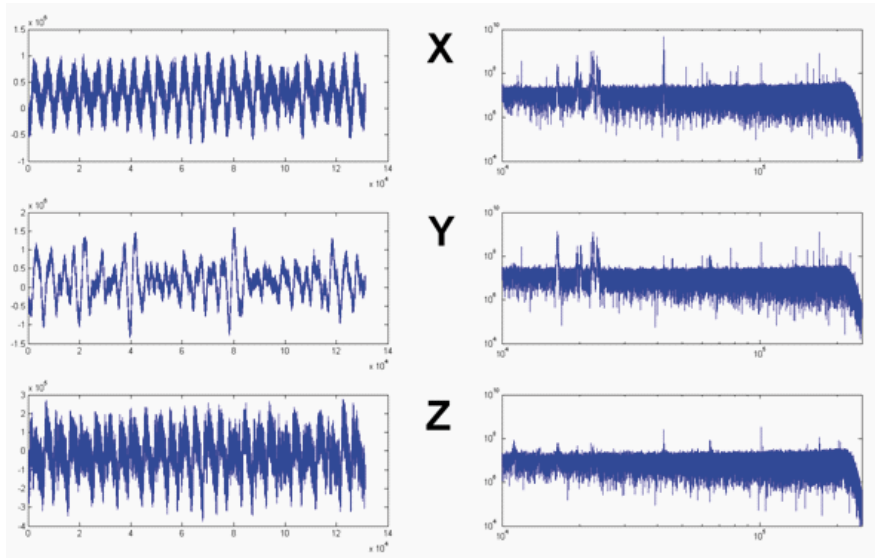


Fig. 5. T.v. tidsserie från flygtest och t.h. spektra från flygtest motsvarande 250 ms mättid.

När data bearbetats framträdde ännu en helt oväntad felvariant. Data tydde på att samples tappats någonstans på vägen (fig. 6). Instrumentet är konstruerat på så sätt att datainsamlingen görs kontinuerligt sedan inspelningen satts i gång till dess att den avslutas. Detta får som konsekvens att om data från en kanal förloaras någon gång under mätning, kommer alla efterföljande mätpunkter att ligga ur fas, vilket i sin tur innebär oanvändbara data. Ett sätt att komma runt detta är att göra sekventiella mätningar. En sådan modifikation är nödvändig och fullt möjlig enligt Metronix.

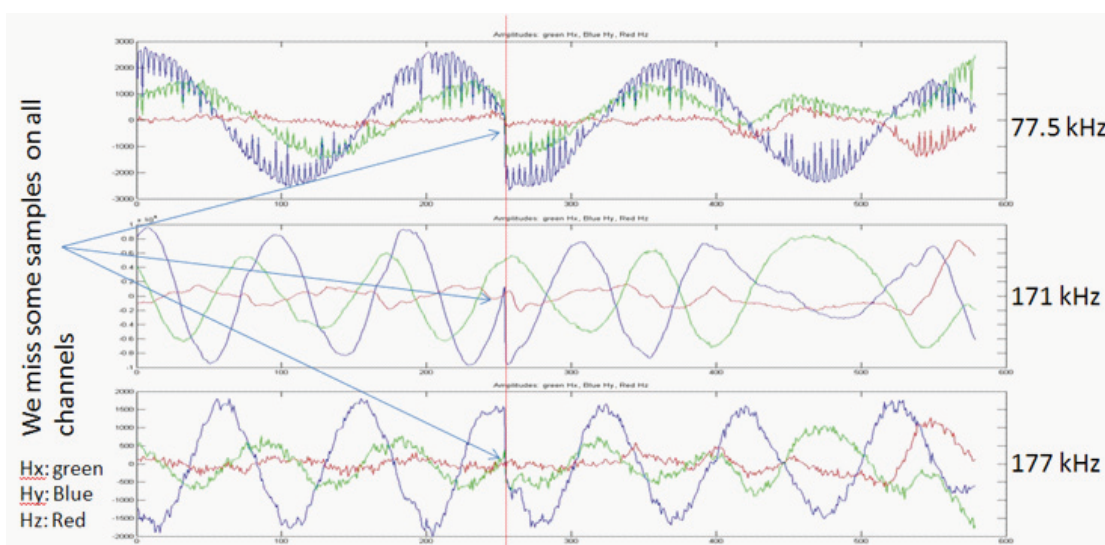


Fig. 6. Amplituden för tre frekvenser. En tydlig fasförskjutning p.g.a. tappade data syns i samtliga.

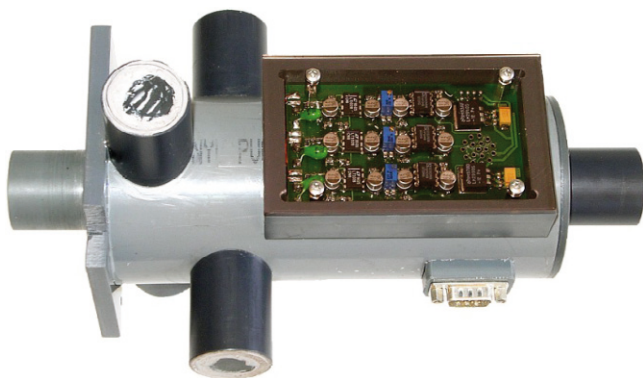


Fig. 7. MFR-antenn innan modifiering med tre ortogonala antennkomponenter och förstärkningselektronik.

Figur 7 visar MFR-antennen. Ett problem som var känt sedan tidigare var MFR-antennens frekvensberoende överhörning. Under våren 2009 gjordes en kalibreringsmätning för att möjliggöra kompensering för detta. För att minska överhörningen ansågs att ny konstruktion av antennen var nödvändig. Under vintern 2010 har UU arbetat fram en ny lösning som förhoppningsvis kommer att minska överhörningen och därmed förbättra kvaliteten på mätdata. De första testerna utvärderas i skrivande stund.

Slutsatser

En inventering av tillgängliga sändare i VLF-LF-bandet visar att det är troligt att ett tillräckligt antal sändare finns för att mätmetoden skall vara användbar även i de norra delarna av Sverige. Det gör att MFR-instrumentet på sikt kan ersätta det befintliga VLF-instrument i flygplanet. Ett antal praktiska problem återstår att lösa med instrumentet, såsom överhörning i antennen och brister i dataflödet. Att projektets budget minskades från ansökta ca 250 timmar per person till ca 60 har i hög grad påverkat möjligheterna att göra grundliga tester och nödvändig utveckling av systemet.

Forskning avseende hållbar utveckling i stadsmiljön fokus på geofrågor – GEOINFRA

BJÖRN SELLBERG, FORMAS

Sammanfattning

Urbaniseringen är sedan länge ett faktum. Städerna breder ut sig över bra odlingsmark, instabila markområden, sjöbottnar samt över grönytor vid stadsförtätning. I ökad omfattning blir städerna sårbara system. De kan lätt utsättas för ras, skred och översvämningar. Trafiken ökar. Miljöproblemen är omfattande och rör hälsa, avfallshantering, ren luft och rent vatten. En strukturerad planering av natur- och energiresurser är nödvändig. Frågor om markanvändning är centrala för utveckling av infrastruktur, byggverksamhet och industriell aktivitet. I tätortsområden finns uppenbara trender att idag bygga på höjden. Eftersom det endast finns begränsade ytor för expansion kommer underjordsbyggandet att kraftigt öka. Vår berggrund och undermark kommer att i allt högre grad utnyttjas för transporter, förråds- och lagringsutrymmen, parkeringsplatser och garage mm. Det är redan en verklighet i vissa städer i Sverige och i många andra länder.

Undermarksbyggande i stadsmiljö kännetecknas av hög grad av komplexitet, som ställer mycket stora krav på tekniskt kunnande och erfarenheter för projektering och genomförande. Ett flertal problemområden finns och går i varandra; som vatten, förstärkning, dränering, underhåll, logistik, utbildning och livscykelkostnader. Den planerade stora infrastrukturella utbyggnaden runt Stockholm – förbifart Stockholm för 28 miljarder – ställer stora och nya krav på ny kunskap som man fått genom forskning bl.a. för att om möjligt minska oförutsedda extra kostnader som kan uppkomma på grund av bristande kännedom om geoförhållanden och annat som kan uppkomma i så stora projekt. Forskningssatsningar inom hållbar utveckling i stadsmiljön med inriktning mot geofrågor inför framtida utveckling inom infrastruktur har sålunda ett tydligt samhällsekonomiskt intresse.

Den 9 december 2009 träffades ett 30-tal forskare, industrirepresentanter och företrädare från det nybildade Bygguniversitetet, myndighetsföreträdare från forskningsfinansiärer och transportverk, på forskningsrådet Formas för att diskutera forskningsbehovet avseende hållbar utveckling i stadsmiljön med fokus på geofrågor – **GEOINFRA**.

En arbetsgrupp med representanter från Formas, SBUF, SGU, SGI och BeFo hade förberett workshopen. Formas var initiativtagare och sammankallande till workshopen. Formas hade under våren 2009 diskuterat behovet av georelaterad forskning med arbetsgruppens organisationer. I workshopen diskuterades angelägenhetsområden, relevanta forskningsmiljöer, möjliga finansiärer mm. Det diskuterades att skapa ett kraftfullt och långsiktigt **GEOINFRA** – forskningsprogram med ett brett stöd av flera finansiärer. Fem breda forskningsområden i ett långsiktigt program samt insatser för kunskapsförsörjning och erfarenhetsåterföring föreslås. En breddning av kretsen finansiärer eftersträvas i den föreslagna fortsättningen av arbetet att bedrivas våren 2010 – sommaren 2011. Denna fortsättning föreslås starta med ett möte med tänkta finansiärer i maj 2010. Vi föreslår ett sexårigt forskningsprogram med en utlysning hösten 2010 med projektstart våren 2011.

Diskussionerna under workshopen var dynamiska och många förslag och synpunkter kom fram. Man enades om att det är ett stort behov av breda och uthålliga forsknings- och utvecklingsaktiviteter den närmaste tiden. Trots värdefulla insatser i flera tidigare FoU program behövs nu intensifierad och uthållig FoU bl.a. för att undvika stora extrakostnader – som beror på bristande kunskapsunderlag – vid den stora infrastrukturutbyggnad, som har påbörjats och kommer att fortsätta i stor omfattning.

Insatserna bör vara betydligt större och uthålligare – program som löper över en längre tid - än vad som tidigare har förekommit. Forskningsprogrammen har övergripande fokus på **hållbar utveckling och klimat – anpassning, hänsyn och minskning av växthusgaser**. Viktiga frågor är följande rubriker:

Vatten dess samspel med berg och jord

Säkerhet och prognoser innefattande bl a riskanalys, arbetsmiljö, förundersökningsmetodik

Drift och underhåll

Effektivitet – här i en mycket vid bemärkelse, som innefattar många undergrupper, se text nedan.
Logistik och materialförsörjning

Allt är inte forskning! Exempel på problem där kunskap finns men inte används diskuterades också. Detta relateras till nedanstående punkt

Kunskapsförsörjning och **erfarenhetsåterföring** i vid mening

Programmet föreslås bestå av tre faser; uppbyggnadsfas (de första år 1–år 1,5) , fulldriftsfas (de mellersta 3–3,5 åren) och avvecklingsfas (de sista 1–1,5 åren) .