Bergslagen, etapp 1

Regional strukturanalys i Bergslagen – från lineament till skjuvzon

Stefan Luth & Stefan Bergman

april 2020

SGU-rapport 2020:13



SGU Sveriges geologiska undersökning

Omslagsbild: Fältfotografier av plastiska strukturer inom West Bergslagen Boundary Zone vid sjön Usken. Motsvarar figur 13 i rapporten. Fotograf: Stefan Luth

Title in English: Regional structural analysis in Bergslagen, Sweden: From lineament to shear zone (in Swedish)

Författare: Stefan Luth och Stefan Bergman Granskad av: Magnus Ripa Ansvarig enhetschef: Ildikó Antal Lundin

Redaktör: Lina Rönnåsen

Sveriges geologiska undersökning Box 670, 751 28 Uppsala tel: 018-17 90 00 e-post: sgu@sgu.se

www.sgu.se

INNEHÅLL

Sammanfattning	.4
Summary	.4
Inledning	.4
Berggrundsgeologisk översikt, historisk utveckling	.5
Regional strukturanalys	.6
Lineament och deformationszoner	.6
Indelning i strukturella domäner	.9
Mätningar av plastiska och spröda strukturer, sammanslagna plottar per domän	.9
Tolkningar och relationer mellan lineament och strukturer1	0
Osäkerheter1	1
Kinematisk analys1	1
Korrelation mellan sprickorientering och litologi1	3
Fältarbetsresultat och lokal analys1	15
Observerade lineament i hällskala1	5
Sekvens av sprickmineralfyllningar1	15
Spröd reaktivering av äldre strukturer1	15
West Bergslagen Boundary Zone – en NO-SV-strykande deformationszon1	8
Kolsvaområdet – ett NV-SO-ligt deformationszonssystem2	23
Dannemoraområdet – NO-SV- och N-S-strykande deformationszoner2	25
Den NV-strykande Singödeformationszonen (SDZ)2	26
Den NO- till NNO-strykande Österbybruk-Skyttorpzonen (ÖSZ) och Gimozonen (GZ).2	27
Flackt sydoststupande zone r 2	27
Hebyområdet – NO-SV- och O-V-strykande deformationszoner	30
Slutsatser	33
Referenser	34

SAMMANFATTNING

I denna rapport presenterar vi resultat från en strukturgeologisk analys av geofysiska och topografiska lineament, samt data från en stor mängd fältobservationer i Bergslagsregionen (t.ex. Stephens m.fl. 2009). Regionen har delats in i sex strukturella domäner huvudsakligen baserat på lineamentmönstret. Vidare presenteras resultat från fältstudier av fyra enskilda deformationszoner. Resultaten ger en bättre förståelse av den för Bergslagsregionen typiska, komplexa tredimensionella uppbyggnaden och kinematiken för enskilda zoner. Geofysiska data, tolkningar och data från fältobservationer kan beställas från SGUs kundtjänst, se www.sgu.se.

Nyckelord: förkastningsanalys, strukturgeologi, krustal deformation, Bergslagen, Sverige, geofysiska lineament, regionalgeologi, fältobservationer

SUMMARY

In this report we present the results from a structural geological analysis of the Bergslagen region (e.g. Stephens et al. 2009) using geophysical and topographic lineaments as well as data from a large number of field observations. Based primarily on the spatial pattern of the lineaments, the region has been subdivided into six structural domains. Furthermore, the results from four local field studies targeting individual deformation zones are presented and provide a better understanding of the complex 3D architecture and kinematics of individual fault systems typical for the Bergslagen region. The geophysical datasets, interpretations as well as field observation data can be ordered by contacting SGU's customer service at www.sgu.se.

Key words: fault analysis, structural geology, crustal deformation, Bergslagen, Sweden, geophysical lineaments, regional geology, field observations

INLEDNING

Deformationszoner (förkastningar och skjuvzoner) skapar förutsättningar för uppkomsten av mineraliseringar eftersom de vanligen har en porositet och permeabilitet som underlättar hydrotermala lösningars flöde i berggrunden och därmed ökar möjligheten för lösningarna att extrahera, transportera och avsätta metaller. Vidare är det viktigt att ha kunskap om var deformationszoner finns, vilken geometri de har och hur deras rörelsehistoria ser ut för att kunna rekonstruera berggrundens geometri före deformationen.

Berggrund som påverkats av deformationszoner är i de flesta fall mekaniskt svagare och mer lättvittrad än opåverkad berggrund, vilket gör att den sammanfaller med svackor i terrängen och endast i sällsynta fall är observerbar i häll. Däremot framträder deformationszoner av samma orsak som lineament (linjära tråg) i höjddatamodeller. Då en deformationszons magnetiska eller elektromagnetiska egenskaper skiljer sig från sidobergets kan den synas som ett lineament i magnetiska anomali- respektive resistivitetsdata. Detaljerade undersökningar av magnetiska lineament i Forsmarksområdet av Svensk Kärnbränslehantering AB visar att de sammanfaller med förhöjd sprickfrekvens, omvandling (oxidering, hematitisering) och minskad magnetisk susceptibilitet (SKB 2006, Petersson m.fl. 2007a, b, Stephens m.fl. 2007). Det förekommer dock även lineament som orsakas av lågmagnetiska granitgångar.

Då det tidigare har saknats en homogen och tillräckligt detaljerad modell av deformationszonerna i Bergslagsregionen har en sådan nyligen tagits fram vid SGU och finns att se i SGUs kartvisare, www.sgu.se. Koordinater anges i SWEREF99 TM.

Berggrundsgeologisk översikt, historisk utveckling

Berggrunden i Bergslagsregionen bildades och genomgick i varierande grad deformation och metamorfos under den svekokarelska orogenesen för ca 1,9 till 1,8 Ga sedan (Stephens m.fl. 2009). Längst i väster deformerades berggrunden även under den svekonorvegiska orogenesen för ca 1,0 till 0,9 Ga sedan. Den strukturella uppbyggnaden av Bergslagsregionen och den tidigare utvecklingen under plastiska till spröd-plastiska förhållanden sammanfattas av exempelvis Stephens m.fl. (2009), Beunk & Kuipers (2012), Stephens & Andersson (2015) och Johansson & Stephens (2017). Det har varit åtminstone två metamorfa händelser, en vid 1,87–1,85 Ga och en vid ca 1,83–1,79 Ga (Johansson & Stephens 2016). Under den yngre händelsen upphettades stora delar av området till över 500° C och har avsvalningsåldrar yngre än ca 1,8 Ga, eftersom Ar-Ar-systemet i hornblände, baserat på kaliums radioaktiva sönderfall till argon, blivit omställt (Page m.fl. 2007). Endast ett mindre område i östra Bergslagsregionen verkar ha undsluppit den yngre händelsen och uppvisar avsvalningsåldrar i intervallet 1,87–1,85 Ga. I Oskarshamnsområdet söder om Bergslagsregionen finns spår av termisk påverkan av granitintrusioner vid 1,5–1,4 Ga (Söderlund m.fl. 2008) och i väster i den svekonorvegiska orogenen är avsvalningsåldrarna ca 0,9 Ga (Page m.fl. 1996).

Förkastningar började allmänt visas på SGUs berggrundskartor från Bergslagsregionen först på 1960talet. Tolkningar över större områden underlättades med ökande tillgång till flygmätta magnetiska data och höjddata. Från en lineamentkarta (eng. *rock block map*) baserad på höjddata över Bergslagen med omgivningar indikeras att det regionala strukturmönstret utgörs av nordväststrykande tektoniska linser överpräglade av ost-västliga zoner (Tirén & Beckholmen 1990). De mest framträdande sprickdalarna och förkastningarna på en morfotektonisk karta (Lidmar-Bergström 1994) återspeglar senproterozoiska till fanerozoiska rörelser och har nordostliga och ost-västliga riktningar.

Svensk Kärnbränslehantering AB gjorde länsvisa tolkningar av plastiska skjuvzoner och sprickzoner i samband med undersökningar av de geologiska förutsättningarna för att lokalisera ett djupförvar av utbränt kärnbränsle (t.ex. Antal m.fl., 1998a, b, c, d, e, Bergman m.fl. 1999, Gierup m.fl. 1999).

Östra Mellansverige har tidigare indelats i strukturella eller tektoniska domäner baserat på när tektonisk aktivitet skedde eller intensiteten och karaktären för plastisk deformation (Sjöström & Bergman 1998, Persson & Sjöström 2003, Stephens m.fl. 2009). De flesta domängränser utgörs av större deformationszoner: Singödeformationszonen (Talbot & Sokoutis 1995, Law & Snyder 1997), Gävle-Rättvikzonen (Högdahl m.fl. 2009), Loftahammar-Linköpingdeformationszonen (Stephens m.fl. 1997, Beunk & Page 2001, Wik m.fl. 2005) och Svekonorvegiska frontdeformationszonen (Wahlgren m.fl. 1994). Området har också indelats i domäner baserat på litologi och lineament-mönster (Tirén & Beckholmen 1990), och dessa domängränser sammanfaller till stor del med de som baseras på plastisk deformation. Viktiga undantag utgörs av öst-västliga sprickzoner i de östra delarna av området och en nordostlig zon kallad Karlskoga-Gävlezonen av Lilljequist m.fl. (1985). Denna zon, som även delvis avgränsar det subkambriska peneplanet (Lidmar-Bergström 1994) är samma som "the West Bergslagen Boundary Zone" (Beunk & Kuipers 2012), som är en grupp av diskontinuerliga plastiska skjuvzoner mellan Garpenberg och Älvlången. I de vulkaniska berg-arterna längs zonen förekommer ett flertal järnoxidmineraliseringar rika på sällsynta jordartsmetaller (t.ex. Holtstam & Andersson 2007, Sahlström m.fl. 2019b).

Väster om Stockholm är den vanligaste sprickriktningen O–V, och andra viktiga riktningar är NV–SO, NO–SV och N–S (Wiman 1942). Åtminstone vissa NV-sprickor är äldre än NOsprickor. Wiman (1930) angav följande relativa tidsordning för åldern på sprickmineral: epidot (äldst) – prehnit – kvarts – klorit – laumontit (yngst). Senare observationer (Wiman 1942) bekräftade och förfinade i denna ordning enligt följande: epidot – prehnit – kvarts – laumontit – kalcit + flusspat – gips. Liknande resultat erhölls av Tullborg & Larson (1982) som också erhöll kvartär ålder på kalcit genom U-seriedatering, baserad på urans radioaktiva sönderfall till torium. Epidot från sprickor daterades till 1,6–1,5 Ga med hjälp av Rb-Sr-metoden (Wickman m.fl. 1983). Under senare tid har plastiska och spröda strukturer undersökts i stor detalj i Forsmarksområdet, exempelvis har man med U-Pb-, Ar-Ar- och (U-Th)/He-metoderna fått mer precisa åldrar för ett större antal mineral och därmed kunnat kartlägga berggrundens utveckling från plastisk till spröd deformation (t.ex. Page m.fl. 2007, Hermansson m.fl. 2007, 2008, Sandström m.fl. 2009, Söderlund m.fl. 2009). Kinematiken och spänningstillstånden under denna utveckling har undersökts av Saintot m.fl. (2011). Deformation skedde under den svekokarelska orogenesen med kompression i NNV–SSO-lig riktning och sedan som distala effekter av ett flertal avlägsna tektoniska händelser (t.ex. de svekonorvegiska och kaledoniska orogeneserna, Saintot m.fl. 2011). Exempelvis har en tidig fas av hydrotermal fluidcirkulation och omvandling av uraninit som skedde vid 1,6 Ga har kopplats till den gotiska orogenesen (Krall m.fl. 2019).

I Örebrotrakten visar tensions- och skjuvsprickor i urberget en prekambrisk huvudspänning i NNV– SSO medan spricksystem som förekommer såväl i urberget som i det fanerozoiska plattformstäckets berggrund visar en huvudspänning i O–V till VNV–OSO (tabell 1, Möller m.fl. 1971a, b, 1974a, b). I vissa områden finns sprickor som indikerar en prekambrisk händelse mellan dessa två, med en huvudspänning i O–V. I Norrköpingsområdet var huvudspänningen riktad i N–S i ett tidigt sprickbildningsskede, VNV–OSO till NV–SO senare i prekambrisk tid (Fagerlind m.fl. 1977). De tre spröda deformationshändelser som spårats Örebro-Norrköpingsområdena överensstämmer väl med avseende på spänningsriktningar och relativa tidpunkter med de händelser som i Forsmarksområdet identifierats som tillhörande de svekokarelska, svekonorvegiska och kaledoniska orogeneserna.

REGIONAL STRUKTURANALYS

I detta kapitel presenteras den rumsliga fördelningen av lineament och en indelning i strukturella domäner. Vidare analyseras resultat från mätningar av sprickor och deformationszoner, från denna studie och från befintliga, i regional skala över Bergslagsområdet.

Lineament och deformationszoner

En ny lineamentkarta presenteras här för Bergslagsregionen (fig. 1). Lineamenten tolkades av Johan Jönberger från höjdmodeller (Lidar med 2 meters upplösning) och från geofysiska data (magnetiska och elektromagnetiska (VLF)). De geofysiska data inkluderade resultat från flygmätningarna insamlade under sommaren år 2017. Trots den höga upplösningen av använda data, var lineament-tolkningen anpassad till en regional skala med syfte att fokusera på de större strukturerna och trenderna. Av den anledningen tolkades inga lineament som var kortare än 5 kilometer. Vissa korta lineament filtrerades även ut i ett senare skede. Den totala längden på tolkade lineament i området är ca 33 000 km. Lineamenten tilldelades attributen azimut (riktning) och segmentlängd, det senare med ett minimum av 200 meter. Böjda lineament delades upp i flera segment som vart och ett fick ett azimutvärde tillskrivet. De lineament som visas i figur 1 är grupperade och färgade enligt sina azimutvärden. De olika azimutgrupperna är 1) NNO- till NNV-strykande (röd), 2) NO–SV- till ONO–VSV-strykande (blå), 3) NV–SO-strykande (grön), och O–V-strykande (gul).

Ålder	Strykning	Spricktyp	Kommentar
	NNV	tensionsspricka	
Äldre prekambrisk	NV	dextral skjuvspricka	
	NNO	sinistral skjuvspricka	
	VNV	tensionsspricka	
Yngre prekambrisk	NO	dextral skjuvspricka	
	NV	sinistral skjuvspricka	reaktiverad
	VNV	tensionsspricka	
Fanerozoisk	NO	dextral skjuvspricka	dominerande riktning
	NV	sinistral skjuvspricka	

Tabell 1. Typiska sprickriktningar i Örebroområdet (Möller m.fl. 1971a)



Figur 1. Regional lineamentkarta över Bergslagsregionen och skisserade strukturella domäner (numrerade, se texten). Lineamenten tolkades från LIDAR-data och från geofysiska data (magnetiska, elektromagnetiska (VLF)). Färgningen representerar lineamentens stryk. Polygonerna visar de lokala studieområdena som presenteras i avsnitt *Fältarbetsresultat och lokal analys.* A = "West Bergslagen Boundary Zone"-studieområdet, B = Kolsvaområdet, C = Dannemora-området, D = Hebyområdet. Ortnamnförkortningar: R. = Rättvik, G. = Gävle, Ga. = Garpenberg, K. = Karlskoga, Ö. = Örebro, Ny. = Nyköping, N. = Norrköping, L. = Linköping, S. = Stockholm. Data från fältobservationerna kan beställas från SGUs kundtjänst, se www.sgu.se.

Domän	Lineament	Foliationer	Plastiska skjuvzoner	Spröd-plastiska skjuvzoner	Förkastningar
Bergslagen	N = 5710	N = 14368	N = 1302	N = 214	N = 360
1	N = 1722	N = 5670	N = 312	N = 34	N = 119
2	N = 291	N = 700	N = 35	N = 32	N = 22
3	N = 700	N = 397	N = 565		N = 28
4	N = 2020	N = 4623	N = 226	N = 58	N = 127
5	N = 510	N = 2453	N = 122	N = 32	N = 50
6	N = 460	N = 526	N = 42	N = 12	N = 12

Figur 2. Rosdiagram för strykningsriktning av tolkade lineament, och uppmätta foliationer, plastiska skjuvzoner, sprödplastiska skjuvzoner och förkastningar i var och en av de strukturella domänerna som avgränsas i figur 2. Bokstaven "N" avser antalet uppmätta strukturer. Bredden av en sektor är 10 grader, och längden representerar frekvensen, där den maximala längden motsvarar 10 till 15 procent av det totala antalet. Svart pil avser medelriktningen. De spröd-plastiska skjuvzonerna och förkastningarna är plottade i "Lambert equal area plots" och de svarta prickar representerar poler till de uppmätta planen. Data från fältobservationerna kan beställas från SGUs kundtjänst, se www.sgu.se.

Indelning i strukturella domäner

Sex strukturella domäner har baserat på distinkta lineamentmönster (fig. 1, 2) och den relativa dominansen av vissa grupper med avseende på det övergripande regionala mönstret definierats i hela Bergslagsregionen. Det är viktigt att notera att lineament från alla azimutgrupper förekommer i varje domän. I domän 1 ingår den delen av norra och nordvästra Bergslagen där NO–SV- till ONO–VSV-orienterade lineament förekommer mer jämfört med de övriga domänerna. Trots en dominans av NO–SV-orienterade strukturer, är alla lineamentgrupper väl representerade inom hela domän 1 och ger upphov till ett tätt nätverk och en stor mängd lineamentkorsningar i förhållande till övriga domäner. Alla gränser för domän 1 sammanfaller med stora deformationszoner med den Svekonorvegiska fronten i väster, Hagstazonen i norr och West Bergslagen Boundary Zone (WBBZ) i söder.

Domän 2 domineras av ONO–VSV-orienterade lineament som stryker mestadels parallellt med det starkt deformerade bälte som definieras av Singödeformationszonen i söder och Hagstazonen i norr.

Domän 3 visar huvudsakligen NNO- till NNV-strykande lineament parallellt med den Svekonorvegiska fronten. Nordvästligt och nordostligt orienterade lineament är också vanliga medan O–V-strykande lineament endast är få.

Domän 4 kännetecknas av en övervägande del NV–SO-lineament varav de flesta är relativt raka och långa. O–V-orienterade lineament är relativt rikligt förekommande i den centrala och södra delen av domänen. Antalet N–S-lineament ökar mot väster, medan NO–SV-liga lineament är relativt få i hela domänen. I öster är gränsen mot domänerna 5 och 6 diffus och sammanfaller inte med någon större deformationszon.

Domän 5 kännetecknas av en ganska jämn fördelning av lineament från alla grupper, men med liten övervikt för OSO–VNV-orienterade lineament (fig. 2).

På liknande sätt visar domän 6 ett lineamentmönster där alla grupper är representerade fast med en liten majoritet av NO–SV-strykande linjer. Gränsen mellan domänerna 5 och 6 sammanfaller med ett NO–SV-strykande lineament, men bör ändå behandlas som en gradvis övergång.

Mätningar av plastiska och spröda strukturer, sammanslagna plottar per domän

Rosdiagram har plottats för att jämföra strykningen av lineament med strykningen av geologiska strukturer från fältdata ur SGUs hälldatabas (fig. 2). Rosdiagrammen i figur 2 inkluderar strykningsdata från lineament, foliationer, plastiska och spröd-plastiska skjuvzoner och förkastningar. Dessa diagram gjordes för hela Bergslagen och för varje strukturell domän separat (fig. 2). Utifrån rosdiagrammet som representerar lineament från hela Bergslagen kan det konstateras att NV–SO-lineament förekommer mest, följt av NO–SV- och N–S-strykande lineament. Observera att O–V-strykande lineament inte sticker ut som en distinkt grupp i detta diagram. Däremot dominerar en O–V-riktning för uppmätta foliationer över hela Bergslagen. Riktningarna i rosdiagrammen för plastiska och spröd-plastiska skjuvzoner och förkastningar sammanfaller med alla lineamentgrupper. Det finns således en korrelation mellan orientering av lineament och de geologiska strukturerna, förutom med foliationer på en regional skala.

Inom domän 1 finns uppenbarligen en dominerande NO–SV-trend bland lineament samt bland uppmätta foliationer och plastiska till spröd-plastiska skjuvzoner. Huvuddelen av de uppmätta förkastningarna inom domän 1 stryker NNO, men enstaka kluster av NV- och ONO-ligt strykande förkastningar förekommer också.

I domän 2 visar rosdiagrammen en majoritet av OSO-strykande lineament, foliationer och sprödplastiska skjuvzoner. Plastiska skjuvzoner och förkastningar med OSO-riktningar finns, dock är en N–S-strykning vanligare bland dessa strukturtyper. Inom domän 3 är det den dominerande N–S-trenden av lineament som återspeglas av alla strukturtyper. Foliationer och plastiska skjuvzoner visar dessutom en NO- till ONO-trend samt en NV-trend i mindre utsträckning.

Inom domän 4 porträtteras den övergripande NV-riktningen bland lineament också av plastiska och spröd-plastiska skjuvzoner samt förkastningar. Foliationer stryker dock nästan uteslutande i en O–V riktning.

Inom domän 5 visar lineamentmönstret rådande O–V- och N–S-trender varav den förstnämnda också återspeglas av plastiska skjuvzoner och förkastningar. N–S-trenden återkommer dock i huvudriktningen av spröda-plastiska skjuvzoner.

Domän 6 visar främst NO-, O–V- och NV-strykande lineament. Särskilt nordosttrenden är dominant bland foliationer, plastiska skjuvzoner och förkastningar. Den O–V-liga trenden finns bland alla strukturer, medan NV-trenden endast representeras av plastiska skjuvzoner och ännu mer av spröd-plastiska skjuvzoner.

Tolkningar och relationer mellan lineament och strukturer

Deformationszoner sammanfaller i många fall med svackor i berggrundsytan. Detta gör att lineament tolkade från höjddata i områden med måttliga jorddjup vanligen kan antas representera deformationszoner. Lidardata ger god möjlighet till precis lokalisering av den mest lättvittrade delen av deformationszonen. Med ökande mäktighet av jordtäcket minskar användbarhet av höjddata.

Deformationszoner har i många fall lägre magnetisering är det mindre deformerade sidoberget, och om kontrasten i magnetisering är tillräckligt stor kan detta observeras i uppmätta data. Detta gör att lågmagnetiska lineament tolkade från flygmätta magnetfältsdata vanligen kan antas representera deformationszoner. Eftersom upplösningen i sådana data normalt är lägre än i lidardata så är de mer användbara i områden med flack topografi och hög magnetisering.

Den strukturella trenden som kommer fram i rosdiagram för plastiska och spröd-plastiska skjuvzoner samt förkastningar är ganska lika inom de flesta av de strukturella domänerna. Dessa jämförbara strukturella trender kan tolkas som en reaktivering av plastiska skjuvzoner som spröd-plastiska zoner och förkastningar. Skillnaden i orientering mellan foliationer och skjuvzoner kan dock tyda på att de flesta skjuvzoner och förkastningar inte utnyttjade den anisotropi som genererats av redan existerande tektoniska strukturer (t.ex. S1). De flesta skjuvzoner anses vara bildade under D2 eller senare (t.ex. Stephens m.fl. 2009), men våra resultat kan även tolkas så att åtminstone en del av skjuvzonerna bildades innan de huvudsakliga tektoniska foliationerna.

Hittills har de tolkade lineamenten och geologiska strukturerna inte analyserats som förkastningssystem eller komplex. Implikationerna av en sådan analys kommer att vara att strukturer med signifikant olika orienteringar var aktiva samtidigt och fördelade den totala deformationen. Det bör noteras att förkastningssystem är skalberoende och en tolkning kan ge vitt skilda resultat beroende på om man studerar regionala förkastningar eller sådana i hällskala. Som ett exempel kan nämnas att *Riedel shears, shear bands* och *konjugerande förkastningar* troligen är mer vanliga särdrag i hällskala än i regional skala. I detta sammanhang kan den 20–30 graders vinkel mellan dominerande riktningar i rosdiagrammen som inkluderar spröd-plastiska skjuvzoner inom domän 1 (NO–SV) och domän 3 (N–S) tolkas som att återspegla *Riedel shears* eller *konjugerande förkastningar*.

Osäkerheter

Förutom strukturmönstrets beroende av skala, bör följande osäkerheter beaktas:

- Underrepresentation av mätningar i fält av större, regionala strukturer som vanligtvis bildar topografiska depressioner fyllda av lösa avlagringar eller sjöar.
- Överrepresentation av mätningar i fält av mindre strukturer i häll vars orientering avviker avsevärt från den större strukturen.
- Risk för felaktig riktningsdominans vid användning av vägskärningar på grund av en dominerande orientering av vägar i vissa områden.
- Vissa deformationszoner korrelerar inte med en geofysisk respons. Detta kan bero på låg kontrast av de petrofysiska egenskaperna mellan starkt och svagt deformerat berg.
- En stor variation i antal mätningar (n) per rosdiagram per domän.
- Lokala variationer inom domäner syns inte i rosdiagrammen. I vissa fall kommer lejonparten av mätningarna från ett mindre delområde inom en strukturell domän.
- Fälttolkningar gjorda av olika geologer och terminologiska förändringar under mer än ett halvt sekels tid. Exempelvis har termen "spröd-plastisk skjuvzon" varit okänd eller underutnyttjad av många geologer.

Kinematisk analys

Totalt har inom detta projekt 143 observationer av kinematiska indikatorer gjorts över hela Bergslagen. De mest observerade indikatorerna för plastisk och spröd-plastisk deformation var roterade sigma- och deltaklaster, skjuv- eller dragveck och skjuvband (C och C'). Indikatorerna för spröd rörelse var främst förkastningar, antingen med glidrepor eller med en tydlig förskjutning av en äldre struktur (lagring, bandning etc.). Även i kombination med befintliga data är mängden kinematiska indikatorer endast 541 jämfört med den totala mängden av 49 230 strukturella mätningar i hela regionen. Icke desto mindre har vi grupperat nya och befintliga data enligt rörelse (normal, revers, dextral, sinistral) och plottat dem som symboler på kartor och som poler till plan i stereogram (fig. 3).

En första titt på de kinematiska kartorna avslöjar en spridd rumslig fördelning av alla kinematikgrupperna och ingen uppenbar korrelation med de strukturella domänerna verkar existera. Vid närmare inspektion framkommer emellertid en svag korrelation mellan strukturorientering och kinematik från både kartor och stereogram. Normala rörelser verkar ha ägt rum i den plastiska regimen, främst längs medelbrant stupande O–V-strykande strukturer. I den spröd-plastiska och spröda regimen ägde normala rörelser rum mestadels längs brant stupande, NV- till NO-strykande strukturer, av vilka huvuddelen är belägna inom eller i närheten av strukturell domän 3. Reversrörelser inträffade i hela regionen främst längs brant till måttligt stupande NO–SV-strykande strukturer samt längs NV–SO-strykande strukturer. Tydliga koncentrationer av bara plastiska eller bara spröda strukturer kunde inte definieras i stereogrammet. Däremot dokumenterades dextrala rörelser längs mestadels brant stupande NO–SV- och NV–SO-strykande strukturer. Observera att riktningarna representerar ett medelvärde och att det finns en stor spridning enligt stereogrammen. På liknande sätt inträffade sinistrala rörelser i olika riktningar men främst längs strukturer som stryker NO–SV eller NV–SO.



Figur 3. Strukturmätningar av skjuvzoner och förkastningar och deras associerade kinematik presenteras enligt rörelse (normal, revers, dextral, sinistral) i kartor och stereogram. Struktursymboler på kartorna med vit halo indikerar mätningar som samlats in under den här studien. I stereogrammen visas poler till plan med olika symboler för plastisk, spröd-plastisk respektive spröd deformation. Data från fältobservationerna kan beställas från SGUs kundtjänst, se www.sgu.se.

Korrelation mellan sprickorientering och litologi

För att undersöka om det finns någon korrelation mellan litologi och sprickriktning gjordes en gruppering av mätvärdena efter vilken av nio bergartsgrupper baserade på bildningssätt och ålder som de uppmätts i. Dessa parametrar kan förväntas vara relaterade till bergartens anisotropi, eftersom t.ex. ytbergarter vanligen är lagrade och äldre, metamorfa bergarter vanligen är folierade. Antalet strukturmätningar i respektive bergartsgrupp visas i tabell 2 och resultaten presenteras i figur 4 i form av stereogram. För att kunna värdera om resultaten är regionalt representativa visas mätningarnas geografiska lägen i kartor i figur 5.

Det framgår av figur 4 att en dominerande sprickriktning är NO–SV, och att den riktningen finns representerad i praktiskt taget alla bergartsgrupper. Stupningen är mestadels brant mot nordväst. Sprickor i NV–SO är vanliga i intrusiva bergarter men mindre vanliga i ytbergarter. Stupningen är brant antingen mot nordost eller sydväst. Flackt stupande sprickor är vanliga och återfinns i de flesta bergartsgrupperna.

Nord-sydliga sprickor är mestadels underordnade, men verkar i detta begränsade dataset vara vanligare i diabas av yngre ålder (fig. 4a, j).

Gruppen granit-syenitoid (ca 1,8 Ga) avviker tydligt enligt figur 4 från andra bergartsgrupper med en medelbrant sydväststupande sprickgrupp, en grupp som stryker NNO–SSV och en som stryker i V–VNV. Även om det är relativt många lokaler och mätningar i denna enhet så är den geografiska utbredningen begränsad till den sydvästligaste delen av undersökningsområdet (fig. 5). Sprickmönstret representerar sannolikt lokala spänningsförhållanden.

	Detta projekt		SGUs hälldatabas, Bergslagsområdet	
Bergartsgrupp	Antal mätningar	Kontur- intervall (%)	Antal mätningar	Kontur- intervall (%)
Diabas 1,6–0,9 Ga	9	-	28	1
Granit, syenitoid ca 1,8 Ga	71	1	373	1,2
Granit, pegmatit, ca 1,8 Ga	84	1,3	2 187	1,65
Metagranitoid, ca 1,9 Ga	200	1,1	4 414	1,57
Metagabbro, ca 1,9 Ga	6	-	901	1,4
Marmor	13	-	47	1,1
Felsisk metavulkanit	77	1,5	1 729	1,5
Metamafit	14	-	123	2
Metasandsten, paragnejs	20	-	2 039	1,07

Tabell 2. Antalet mätningar och konturintervall i figur 4 för respektive bergartsgrupp.



Figur 4. Poler till sprickor och andra spröda planstrukturer plottade i ytriktiga stereogram för de olika bergartsgrupperna. Mätningar gjorda i detta projekt återfinns i figurerna a–i och figurerna j–r visar mätningar ur SGUs hälldatabas i Bergslagsområdet. **A och J.** Diabas 1,6–0,9 Ga. **B och K.** Granit-syenitoid ca 1,8 Ga. **C och L.** Granit-pegmatit ca 1,8 Ga. **D och M.** Metagranitoid ca 1,9 Ga. **E och N.** Metagabbro ca 1,9 Ga. **F och O.** Marmor. **G och P.** Felsisk metavulkanit. **H och Q.** Metamafit. **I och R.** Metasandsten eller paragnejs. Vid konturering användes 1%-areametoden. Antalet mätningar och konturintervall redovisas i tabell 2.



Figur 5. Geografiska lägen för strukturmätningar i figur 4 och tabell 2. Stora röda symboler är lokaler inom detta projekt och svarta punkter är data från SGUs hälldatabas. **A.** Diabas 1,6–0,9 Ga. **B.** Granit-syenitoid ca 1,8 Ga. **C.** Granit-pegmatit ca 1,8 Ga. **D.** Metagranitoid ca 1,9 Ga. **E.** Metagabbro ca 1,9 Ga. **F.** Marmor. **G.** Felsisk metavulkanit. **H.** Metamafit. **I.** Metasandsten eller paragnejs.

FÄLTARBETSRESULTAT OCH LOKAL ANALYS

Lokaler för fältundersökning valdes med företräde för goda blottningar, vanligen i bergtäkter, med ett avstånd av högst 500 m från ett lineament. En god geografisk spridning i regionen eftersträvades också. Fältobservationer gjordes på 236 lokaler östra Mellansverige (fig. 1), och vid varje lokal dokumenterades bland annat plastiska strukturer, de dominerande sprickgrupperna och i förekommande fall rörelseriktningar.

Observerade lineament i hällskala

Svackor i terrängen är generellt fyllda med lösa avlagringar eller vatten vilket medför att blottningar av berggrunden är sällsynta i sådana områden. Betydligt vanligare är att man i bergskärningar ser att svackor i bergytan sammanfaller med utgåendet av deformationszoner (fig. 6a).

På vissa ställen inom magnetiska lineament observerades uppstickade hällar med lågmagnetisk kvartsläkt breccia (fig. 6b), en bergart som uppenbarligen är relativt motståndskraftig mot vittring och erosion och företrädesvis bildar magnetiska snarare än topografiska lineament.

Sekvens av sprickmineralfyllningar

Den relativa tidsordningen för sprickmineral från tidigare studier (Wiman 1930, 1943, Tullborg & Larson 1982), och som redogjorts för ovan, kan preliminärt bekräftas gälla även i det mycket översiktligt undersökta Bergslagsområdet som helhet. Exempelvis hör epidot praktiskt taget i varje fall till de relativt äldsta mineralen i sprickfyllnader (fig. 7).

Spröd reaktivering av äldre strukturer

Många exempel på plastiska skjuvzoner som reaktiverats under spröda förhållanden presenteras av Stephens m.fl. (2009). Ett exempel är Bråvikendeformationszonen (fig. 8), som är en upp till 5 km bred plastisk, dextral skjuvzon bildad under den svekokarelska orogenesen, och som har haft förkastningsrörelsen där norra sidan rört sig uppåt relativt den södra sidan under fanerozoisk tid. Vid en lokal som besöktes inom detta projekt observerades flackt stupande glidrepor som sannolikt har bildats vid ytterligare en spröd förkastningshändelse i denna zon.



Figur 6. A. Foto mot öster av sydstupande, rödpigmenterad sprickzon som på bergöverytan utmärks av en svacka fylld med lösa avlagringar (vid vita pilen). Förutom att representeras av ett topografiskt lineament på ytan så har sprickzonen en magnetisk susceptibilitet som är lägre än i den omgivande graniten, <1 × 10⁻³ respektive 7–30 × 10⁻³ SI-enheter, vilket medför att dess fortsättning potentiellt kan spåras som ett lineament även med magnetiska data. 6465680/539365. **B.** Lågmagnetisk kvartsläkt breccia inom lågmagnetiskt lineament. 6693994/591173. Foto: Stefan Bergman.



Figur 7. Tre generationer av sprickfyllnader i följande ordning: epidot (äldst)- kalcit – klorit + kalcit (yngst). Foto mot sydväst på brant yta. 6582389/595273. Foto: Stefan Bergman.



543 431 369 305 220 136 55 4 29 57 87 118 168 225 306 720 Anomali (nT)

Figur 8. Den ost-västliga Bråvikendeformationszonen (BDZ, Stephens m.fl. 2009) utmärks av markanta brott i mönstren på den magnetiska anomalikartan. De vita linjerna, som är formlinjer för tektonisk foliation, har ett mönster som visar att en äldre nordostlig foliation och veck roterat in i en upp till 5 km bred, plastisk, dextral skjuvzon (tjocka svarta linjer). Svarta heldragna linjer är spröda förkastningar och det är uppenbart att en sådan följer den äldre plastiska skjuvzonen. Ett nordvästligt förkastningssystem är däremot diskordant mot de äldre strukturerna.

Även i hällskala är det inte ovanligt att observera reaktivering. I figur 9 visas en ca 1,5 m bred plastisk skjuvzon reaktiverad av en betydligt smalare spröd deformationszon. Rödpigmenterade sprickor som följer anisotropin given av plastisk foliation i metagranitoid visas i figur 10.

Reaktivering i olika form är vanligt längs bergartskontakter, som då är plastiskt skjuvade, uppspruckna eller både och. Dessa företeelser är särskilt vanliga intill mafiska gångar (fig. 11).



Figur 9. A. Spröd deformationszon som reaktiverat en del av en ca 1,5 meter bred plastisk skjuvzon (markerad med streckade linjer). Zonen karakteriseras av en heterogen fördelning av mylonitisk foliation, utdragna ådror och fragment. Utanför zonen är berggrunden mer homogen och den plastiska deformationsgraden är låg. I den spröda deformationszonen finns sprickfyllnader av hematit och kalcit. **B.** C-S-struktur visar södra-sidan-upp-rörelse. 6502233/498358. Foto: Stefan Bergman.



Figur 10. Delvis rödpigmenterade sprickor ungefär parallella med äldre, nordostlig, plastisk foliation. 6746060/517017. Foto: Stefan Bergman.



Figur 11. A. Skjuvade och uppspruckna kontakter mellan metagranodiorit och amfibolitgång. Asymmetriska strukturer visar södra-sidan-upp-rörelse på brant yta. 6676679/610889. **B.** Delvis kalcitfyllda sprickor längs kontakten mellan granit och diabas. Den ca 20 cm breda, ometamorfa diabasen har även sprickor vinkelrätt mot kontakten, sannolikt bildade under magmans avsvalning. Foto mot sydost. 6465680/539365. Foto: Stefan Bergman.

West Bergslagen Boundary Zone: en NO-SV-strykande deformationszon

"West Bergslagen Boundary Zone" (WBBZ, Beunk & Kuipers 2012) representerar en grupp SV–NO-strykande skjuvzoner som sträcker sig från Garpenberg i nordost till sjön Älvlången i sydväst. Området för den här studien sträcker sig från Älvlången till Ramsberg där WBBZ representerar ett 5 till 10 km brett, NO–SV-strykande bälte eller stråk av främst intensivt deformerade felsiska metavulkaniska bergarter och karbonatsten (fig. 12). Studieområdet täcks delvis av SGUs kartblad i skala 1: 50 000 Lindesberg NV (Lundström 1985), Lindesberg SV (Lundström 1983) och Karlskoga NO (Stephens 1998). Lokala studier (t.ex. Bleeker 1984, Carlon & Bleeker 1988, Carlon & Bjurstedt 1990, Jansson m.fl. 2018, Luth m.fl. 2019, Sahlström m.fl. 2019a) fokuserade på stratigrafi, strukturer och mineralfyndigheter inom den så kallade Guldsmedshyttansynklinalen som ligger i mitten av studieområdet. Inom denna synklinal finns det utspridda polymetalliska sulfidmineraliseringar med zink, bly, koppar, silver, guld och kobolt.

Guldsmedshyttansynklinalen är mestadels överstjälpt med ett brant till måttligt sydoststupande axialplan. I den här studien tolkas synklinalen som ett F2-veck, baserat på veckning av sedimentär lagring och S1-foliationer. Denna benämning av deformationsfaser följer den nyare litteraturen om Bergslagen (t.ex. Persson & Sjöström 2003) där F2- och F3-veck motsvarar det man tidigare kallade F1- och F2-veck (t.ex. Carlon & Bleeker 1988, Stålhös 1991, Allen m.fl. 1996). Lokalt är synklinalen omveckad av huvudsakligen z-veck med brant stupande axialplan. Sådan omveckning bildade till exempel den krokliknande strukturen på den nordöstra spetsen av Guldsmedshyttansynklinalen nära Håkansboda (se även Bleeker m.fl. 1984). Om sådana z- och även s-veck bildades samtidigt med F2-veckningen kan de tolkas som parasitiska F2-veck. En alternativ tolkning är att z- och s-veck är senare skjuvveck (F3, F4) som bildades av sinistral respektive dextral lateral skjuvning (fig. 13a–d).

Inom studieområdet finns större plastiska, spröd-plastiska och spröda deformationszoner (fig. 14). De NO-SV-liga deformationszonerna stryker parallellt med WBBZs huvudriktning och stupar mest brant till måttligt mot sydost, baserat på strukturmätningar i fält. Tolkning av borrkärndata visar att zonernas stupning ändras till måttligt till flackt på djupet. Zonen som avgränsar WBBZ mot sydost är minst 100 meter bred och framträder som en geofysiskt lineament. I den brant mot sydost stupande zonen ingår en stor del av några mäktiga karbonathorisonter som är mycket starkt deformerade. Mot nordväst är den NO-SV-strykande avgränsningen av WBBZ mer diffus inom en sekvens bestående av felsiska metavulkaniter med inlagringar av karbonatsten. Ett begränsat antal strukturmätningar antyder att zonen är måttligt stupande mot sydost. Baserat på ovanstående tolkar vi bältets 3D-arkitektur som en tektonisk prisma som kilar ut på djupet mot sydost (fig. 12). Kinematiska indikatorer observerade längs de större deformationszonerna indikerar en tektonisk transport mot nordväst. Sträckningslineationer observerades endast på ett fåtal ställen och bestämningar av rörelser begränsades mest till vertikala och horisontella sektioner. De horisontella sektionerna visar mestadels en sinistral rörelse men dextral rörelse har också tolkats. En entydig reversrörelse syns i de vertikala sektionerna.

I Noratrakten förskjuts WBBZ sinistralt och följer i ungefär 10 km den nord-sydstrykande deformationszon som vi här kallar Noradeformationszonen. Ett antal spröd-plastiska skjuvzoner observerades i fält inom Noradeformationszonen, som för övrigt syns tydligt i den magnetiska anomalikartan. I första hand tyder förskjutningen av WBBZ på att Noradeformationszonen var aktiv efter att WBBZ bildades. Det går dock inte att utesluta att vissa strukturer inom WBBZ blev reaktiverade när rörelse ägde rum längs Noradeformationszonen. När det gäller spröd deformation i relation till lineament finns det klara tecken på att framförallt NV–SO strykande strukturer skär tvärs igenom WBBZ och därför måste vara yngre.

Både veckmönster och deformationszoner inom WBBZ kan tolkas som ett resultat av intensiv vertikal och horisontell skjuvning. Skjuvningen inom zonen kan även betraktas som en lokalisering av deformation baserat framförallt på ett avvikande veckmönster jämfört med utanför WBBZ (fig. 12). Som sådant kan spänningsfältet i bältet ha avvikit avsevärt från det regionala. Ett tydligt samspel mellan skjuvzoner och veck ligger till grunden till den komplexa geometrin inom WBBZ. Det är mycket sannolikt att de talrika mineralfyndigheterna och malmkropparna som finns inom WBBZ starkt har påverkat denna typ av deformation (jfr. Kübler 1980).



Figur 12. "West Bergslagen Boundary Zone" mellan Älvlången och Ramsberg med nytolkade strukturer i karta och profil. Guldsmedshyttansynklinalen är avgiven med 1. Stereogrammen till höger visar strukturmätningar från den här studien: foliationer (svart), plastiska skjuvzoner (röd), spröd-plastiska skjuvzoner (orange), förkastningar (blå) och sprickor (grön). Numrerade fältobservationer korresponderar till bilder i figur 13 och 14.





Figur 13. Fältfotografier av plastiska strukturer inom West Bergslagen Boundary Zone vid sjön Usken. Fältobservation 1 i figur 12. 6611987/502922. **A.** Sinistralt roterad litoklast i felsisk metavulkanit. **B.** Horisontell yta med ellipsformad laminering som tolkas som tubveck. **C.** Sinistrala s- och m-veck av kompetenta lager av ryolitisk sandsten växellagrad med starkt veckad och folierad kalkrik skiffer. Foto: Stefan Luth. **D.** Skiss av veck från de olika veckfaserna som möjligtvis har format veckmönstret vid sjön Usken (fig. 13C). Tunna linjer på veckbenen motsvarar sträckningslineationernas dominerade riktning.



✓ Figur 14. Fältfotografier av spröda och spröd-plastiska strukturer inom West Bergslagen Boundary Zone. Heldragna linjer är tektonisk foliation. A. Förkastningar stupande mot SO i nedlagt kalkbrott nära sjön Usken. B. 6 meter bred, SV–NO strykande spröd-plastisk skjuvzon i bergtäkt nära Älvlången. Fältobservation 3 i figur 12. 6591253/494738. C. Spröd-plastisk skjuvzon i folierade (S1) ryolitiska metavulkaniter med reversrörelse mot nordväst, Klacka-Lerberg gruvpark.
 Fältobservation 4 i figur 12. 6606687/495511. D. Förkastning med aggregat av sulfidmineral (pyrit och kopparkis).
 Fältobservation 5 i figur 12. 6604084/500583. E. Spröd-plastisk dextral rörelse i kalkstenslager. Streckade linjer är tolkade skjuvzoner eller förkastningar. Fältobservation 5 i figur 12. 6604301/500545. Foto: Stefan Luth.

Kolsvaområdet: ett NV–SO-ligt deformationszonssystem

I Kolsvaområdet finns ett NV–SO-ligt ytbergartsstråk avgränsat av metagranitoider (fig. 15). Området har sin utsträckning i kartområdena Lindesberg SO karterat tidigare av Lundegårdh (1983) och Västerås SV karterat av Lundegårdh & Nisca (1978).

Stråket består mest av glimmerrika metavulkaniska bergarter som uppvisar en dominerande NV– SO-ligt orienterad, brant stupande S2-foliation (Stephens m.fl. 2000; fig. 16). Den senare är ställvis diskordant mot S0/S1 och uppträder då som en "*spaced cleavage*" (fig. 16e) eller som en krenulationsförskiffring (fig. 16c). S0 är inte urskiljbar från S1 och båda är i regel transponerade i S2. Karakteristiskt för området är en måttligt stupande skärningslineation (L2) mellan S0/S1 och S2 (fig. 15,16a, b). Lineationen är i regel parallell med F2-veckaxlar, och både L2 och F2 stupar medelbrant mot söder (fig. 15). Veckningen av S0/S1 längs mot söder stupande axlar kommer tydligt fram när man plottar S0/S1-poler i stereogram (fig. 15). Till skillnad från i ytbergarterna stupar lineationer i de angränsande metagranitoiderna mer brant och i olika riktningar (fig. 15).

I ett regionalt perspektiv så styrs ytbergartsstråket av ett NV–SO strykande deformationszonssystem. Det ingår i ett 150 km långt geofysiskt lineament med utsträckning mot sydost till Nyköping (fig. 1). I Kolsvaområdet omfattar systemet förutom NV–SO-orienterade skjuvzoner också många NNV–SSO- och N–S-strykande zoner. Kinematiska indikatorer observerade längs dessa och den NV–SO strykande zoner visar både revers-dextral och revers-sinistral rörelse. De relaterade kinematiska indikatorerna är relativt låggradiga och representerar mest spröd-plastisk och spröd deformation. Dock finns det indikationer på att denna deformation ägde rum samtidigt med F2- eller F3-veckning (fig. 16c). I det nordvästra hörnet av Kolsvaområdet sveper formlinjer för plastisk deformation runt två väl avrundade granitiska intrusioner, som korsas av flera enskilda NV–SO-förkastningar med högervridna förskjutningar. Baserat på det ovanstående tolkar vi att Kolsvaområdet representerar ett NV-SO-orienterat deformationszonssystem som tog upp både revers-dextral och revers-sinistral rörelse.



Figur 15. Strukturgeologisk karta över Kolsvaområdet och strukturmätningar plottade i stereogram. Pilarna visar deformationszonernas rörelseriktning: röda pilar är baserade på tolkning av magnetiska anomalikartor, medan blå pilar är baserade på fältobservationer. Se figur 1 för teckenförklaring till bergarter och figur 12 för strukturer. Numrerade fältobservationer korresponderar till bilder i figur 16.



Figur 16. Fältfotografier av strukturer i Kolsva området. **A.** Måttligt stupande skärningslineation (L2) mellan S0/S1 och S2. Lineationen är i regel parallell med F2-veckaxlar och både L2 och F2 stupar medelbrant mot söder (fig. 15). Fältobservation 1 i figur 15. 6610608/546243. **B.** S2 uppträder som en "*spaced cleavage*" parallel mot axialplanet av F2-veck. Fältobservation 2 i figur 15. 6613496/543904. **C.** Asymmetrisk F2- eller F3-veckning av S0/S1 i Kolsva bergtäkt. En spaced cleavage tolkas som en S2 eller möjligtvis S3 och är parallell med en större revers skjuvzon (till vänster). Streckade linjer är tolkade skjuvzoner eller förkastningar. Heldragna linjer är tektonisk foliation. Fältobservation 3 i figur 15. 6609065/546883. Foto: Stefan Luth.

Dannemoraområdet: NO-SV- och N-S-strykande deformationszoner

Dannemoraområdet är ett av de mest undersökta områdena i Bergslagen och stora mängder av geologiska data och tolkningar finns tillgängliga från detta område. Nedan presenterar vi en kort sammanfattning och utvärderar området med tillägg av några nya observationer.

Huvudstrukturerna i Dannemoraområdet är N–S- till NNO–SSV-strykande veck och förkastningar (t.ex. Österbybruk-Skyttorpzonen, Persson & Sjöström 2003) korsade av ett större NV–SO-strykande deformationszonssystem (Singödeformationszonen) i den norra delen av området (fig. 17). Dannemoraområdet ligger i kartområdet 12I Östhammar som kartlagts, och vars stratigrafi

och tektonik behandlats, av Stålhös (1991). Senare studier (t.ex. Talbot & Sokoutis 1995, Stephens m.fl. 1997, Beunk & Page 2001, Persson & Sjöström 2003) fokuserade på tektoniken i området och klassificerade NV–SO-strykande deformationssystem som en tektonisk domän bestående av mycket starkt deformerade bergarter. Bergarterna är metamorfoserade i upp till amfibolitfacies och är överpräglade av brant stupande retrograda deformationszoner. I Forsmarksområdet definierade Stephens m.fl. (2007) fyra huvudriktningar av deformationszoner:

- 1. brant sydväststupande, NV- till VNV-strykande deformationszoner
- 2. branta NNV-strykande sprickzoner
- 3. vertikala och brant stupande NV- till NNO-strykande sprickzoner
- 4. flackt sydoststupande sprickzoner.

Deformationen var både plastisk och spröd för den första gruppen medan deformationen främst var spröd för de andra grupperna. Tillämpar vi denna indelning i Dannemoraområdet så klassificeras Singödeformationszonen som tillhörande grupp 1 (NV-strykande) och Österbybruk-Skyttorpzonen till grupp 3 (NO- till NNO-strykande).

Den NV-strykande Singödeformationszonen (SDZ)

På geofysiska anomalikartor syns SDZ som anastomoserande ("flätade") lineament med huvudsakligen en VNV-lig orientering mellan ön Singö i sydöst och Gävle i nordväst. Batymetridata antyder att SDZ kan vara 50 km bred och att den största delen ligger utanför fastlandet (Eriksson & Henkel 1988, Talbot & Sokoutis 1995). Däremot definieras SDZ i Stephens m.fl. (2007) som en betydligt smalare retrograd deformationszon. Hur långt denna zon sträcker sig nordväst om Gävle är inte klart, men SDZ kan vara en del av en viktig terränggräns som går att extrapolera mot nordväst hela vägen mot Kaledoniderna (Sjöström & Bergman 1998).

Liksom SDZ innehåller den parallella deformationszonen direkt söder om SDZ myloniter som bildades i den plastiska regimen, och förekomsten av kataklastiter, förkastningsbreccior och sprickor visar att den fortsatte att vara aktiv i den spröda regimen (t.ex. Stephens m.fl. 2007; fig. 18a-d). Berggrunden i zonerna är tektoniskt bandad och uppvisar både plana och linjära strukturer (LS-tektoniter). Den tektoniska bandningen stupar vanligtvis brant mot sydväst. Sträckninglineationer och veckaxlar stupar övervägande medelbrant mot sydost (fig. 17; jmf. Persson & Sjöström 2003, Stephens m.fl. 2007). Mellan den sydligaste NV-strykande deformationszonen och SDZ finns flera kilometer stora, välbevarade tektoniska linser bestående av veckade metagranitoider (Stålhös 1989, Stephens m.fl. 2007). I häll finns LS-tektoniter som i allmänhet uppvisar en lägre grad av plastisk deformation jämfört med deformationszonerna. Direkt söder om SDZ roterade den tektoniska foliationen och veck (dextralt) in i SDZ och påverkades och accentuerades av SDZ (Bergman m.fl. 1996, Persson & Sjöström 2003).

Åldern på deformationen relaterad till SDZ har begränsats i studier av bl.a. Hermansson m.fl. (2007) och Söderlund m.fl. (2009). Penetrativ plastisk deformation under amfibolitfaciesförhållanden inträffade mellan 1,87 Ga och 1,85 Ga. Efter 1,85 Ga orsakade avkylning till 500 °C en lokalisering av plastisk deformation längs retrograda deformationszoner, men det var inte förrän vi tiden 1,80–1,70 Ga som deformationen blev spröd. Den komplexa historien med spröd deformation och (re)aktivering av sprickor i olika riktningar fortsatte fram till kvartär tid (Saintot m.fl. 2011).

Baserat på tillgänglig litteratur kan en sekvens av rörelser längs SDZ sammanfattas enligt följande: Transpressiv plastisk deformation med både en dextral och en vertikal skjuvkomponent (Talbot & Sokoutis 1995) skedde omkring 1,86–1,83 Ga. Kinematiska indikatorer är ställvis kompatibla med en dextral-sydväst-uppåt rörelse (Bergman m.fl. 1996, Sjöström & Bergman 1998). Deformation fortsatte under spröd-plastiska och spröda förhållanden, först med övervägande dextral rörelse (omkring 1,8–1,6 Ga) och slutligen med sinistral rörelse runt 1,1 Ga (Stephens m.fl. 2007). Baserat främst på borrhålsdata har den retrograda SDZ modellerats på djupet som en brant sydväststupande struktur (Stephens m.fl. 2007). Tolkningar av seismiska data visar dock den bredare Singözonen som en listrisk nordostligt stupande zon (Law & Snyder 1997). I dessa tolkningar förskjuter Singözonen Moho, som befinner sig på ca 46 km djup sydväst om zonen och på ca 48 km nordost om zonen (BABEL 1993).

Den NO- till NNO-strykande Österbybruk-Skyttorpzonen (ÖSZ) och Gimozonen (GZ)

Österbybruk-Skyttorpzonen (ÖSZ) och Gimozonen (GZ) är NO- till NNO-strykande deformationszoner som är associerade med parallella ytbergartstråk (Bergman m.fl. 1996, Persson & Sjöström 2003). Enligt Persson & Sjöström (2003) visar formlinjemönstret, förutom stora veck, en rotation av båda zonerna in mot SDZ.

Flera småskaliga zoner har dokumenterats längs ÖSZ av Persson & Sjöström (2003) och från denna studie (fig. 18e). Många av skjuvzonerna visar sinistral, östra-sidan-upp-rörelse, vilket står i kontrast till den storskaliga dextrala rörelse som indikeras av formlinjemönstret. En flerfasig deformationshistoria för ÖSZ är därför mest sannolik. Brant till måttligt sydväststupande mylonitisk foliation förekommer lokalt längs östra gränsen av ÖSZ (fig. 18e, f). Sträckningslineationer stupar huvudsakligen brant och kinematiska indikatorer överensstämmer med östrasidan-upp-rörelser med en mindre dextral komponent. GZ kan vara kopplad till den NO–SVstrykande Arlandaskjuvzonen 45 km mot söder (Bergman m.fl. 1996). Inga indikatorer för kinematiken längs GZ framkom vid observationerna i denna studie. Persson & Sjöström (2003) använde mikrostrukturer för att dra slutsatsen att både öst- och västsidan-upp-rörelser har skett. Deformerade bergarter längs GZ innehåller amfibolitfaciesmineral, vilket innebär högre temperaturer under deformation i GZ än i ÖSZ (Persson & Sjöström 2003).

Hällar lokaliserade längs ÖSZ uppvisar en brant stupande mylonitisk struktur som stryker N–S till NNO–SSV, och som är överpräglad av övervägande NV–SO-strykande, brant stupande spröda förkastningar samt av svagt ost-stupande förkastningar och sprickor.

En N–S-strykande förkastning som sammanfaller med ÖSZ anges på kartan Östhammar 12I SV (Stålhös 1989). Förkastningszonen är associerad med ett geofysiskt lineament som kan följas ca 100 km söderut och som korsar SDZs södra deformationzoner i norr. I zonen finns breccia överpräglad av myloniter och den är påverkad av omvandlingar. Inga hällar som exponerade förkastningen observerades i denna studie, däremot visade några hällar spröd dextral rörelse.

Extrapolering av resultaten från Stephens m.fl. (2007) från Forsmarkregionen till Dannemorastudieområdet skulle betyda att ÖSZ är en vertikalt till brant stupande, NO- till NNO-strykande förkastning som bildades efter de NV-strykande deformationszonerna (t.ex. SDZ) och som visar både sinistral-, dextral- och reversrörelser.

Undersökningar baserade på reflexionsseismik i Dannemoraområdet av Malehmir m.fl. (2011) visar ÖSZ som en ostligt stupande reflektor som blir listrisk på djupet. En vertikal förskjutning (östsidan-upp) på ca 2,5 km utgår från en korrelation mellan tyngdkraftsmaxima och -minima på båda sidor om förkastningen.

Flackt sydoststupande zoner

Flackt sydoststupande sprickor har observerats under denna studie endast i en blottning längs ÖSZ, och den uppvisar reversrörelse (fig. 18f). I Forsmarksområdet har liknande sprickor observerats i borrkärnor och uppvisar huvudsakligen revers-, lateral- eller inga rörelser. Det föreslås i Stephens m.fl. (2007) att även om de flackt stupande sprickorna skärs av brant stupande NO- till NNO-strykande sprickor och förskjuts av dem, bildades de antagligen mer eller mindre samtidigt.



Figur 17. Strukturgeologisk karta över Dannemoraområdet och strukturmätningar plottade i stereogram. SDZ = Singödeformationszonen, ÖSZ = Österbybruk-Skyttorpzonen, GZ = Gimozonen. I denna studie ingår i SDZ den sydligaste zonen med en parallell riktning. Stereogram inkluderar foliationer (svart), plastiska skjuvzoner (röd), spröd-plastiska skjuvzoner (orange), förkastningar (blå), sprickor (grön) och sträckningslineationer (blå cirklar). Teckenförklaring till kartan visas i figurerna 1 och 12. Numrerade fältobservationer korresponderar till bilder i figur 18.



Figur 18. Fältfotografier av strukturer i Dannemoraområdet. **A.** Veckning av en penetrativ foliation under dextral rörelse (eng. *drag fold*). Sm = Mylonitisk foliation längs zonen parallell med SDZ. Fältobservation 1 i figur 17. 6690286/662733. **B.** Förkastning med Riedel shears som indikerar dextral rörelse längs zonen parallell med SDZ. Fältobservation 2 i figur 17. 6675065/693049. **C.** Spröd-plastisk skjuvzon. Sm = Mylonitisk foliation längs zonen parallell med SDZ. Fältobservation 2 i figur 17. 6676057/690477. **D.** Sinistralt shear band längs zonen parallell med SDZ. Fältobservation 2 i figur 17. 6675065/693049. **E.** Epidot- och kalifältspatomvandling längs en brant stupande skjuvzon längs ÖSZ. Fältobservation 3 i figur 17. 6664075/653736. **F.** Vägskärning som visar en brant stupande penetrativ foliation relaterad till Österbybruk-Skyttorpzonen, överpräglad av måttligt ost-stupande förkastningar. Fältobservation 4 i figur 17. 6670753/656670. Foto: Stefan Luth.

Hebyområdet: NO-SV- och O-V-strykande deformationszoner

Den norra delen av Hebyområdet kännetecknas av en O–V-strykande deformationszon som visar plastisk, revers och dextral rörelse längs brant nordstupande strukturer. Tillhörande sträckningslineationer stupar brant till vertikalt (fig. 19, 20a, b).

Ett ytbergartstråk bestående av huvudsakligen metavulkaniska bergarter är parallella med den O–V-strykande deformationszonen. Stråket visar kraftigt plastisk deformation och ett dextralt förkastningssystem bestående av främst Riedel shear. Stråket förgrenar sig mot öster och deformationen är lokaliserad längs två separata zoner som avgränsar en tektonisk lins som består av metagranitoider (fig. 19).

I östra delen av studieområdet tolkas ett NV–SO-strykande lineament som en plastisk deformationszon med sinistral och dextral rörelse baserad på indikatorer i häll (fig. 20c, d)

I södra delen av studieområdet sammanfaller ett VNV–OSO-strykande lineament med parallella, sydstupande förkastningar med normal rörelse (fig. 20e). Förkastningarna med denna riktning är ofta fyllda med diabasgångar (fig. 20f)

För geologiska och geofysiska tolkningar inom Hebyområdet baserat på nya fältobservationer hänvisas till Ripa m.fl. (2019).



Figur 19. Strukturgeologisk karta över Hebyområdet och strukturmätningar plottade i stereogram. Pilarna visar deformationszonernas rörelseriktning: röda pilar är baserade på tolkning av magnetiska anomalikartor, medan blå pilar är baserade på fältobservationer. Teckenförklaring till kartan visas i figurerna 1 och 12. Stereogrammen inkluderar foliationer (svart), plastiska skjuvzoner (röd), spröd-plastiska skjuvzoner (orange), förkastningar (blå), sprickor (grön) och sträckningslineationer (blå prickar). Numrerade fältobservationer korresponderar till bilder i figur 20.



Figur 20. Fältfotografier av strukturer i häll i Hebyområdet. A. Protomylonit med dextral rörelse i fältspatporfyrisk granit.
Fältobservation 1 i figur 19. 6657912/615960. B. Vertikal sträckningskomponent indikeras av en tydlig minerallineation.
Fältobservation 1 i figur 19. 6657912/615960. C. C-S-struktur i ryolitisk metavulkanit indikerar sinistral rörelse.
Fältobservation 2 i figur 19. 6650250/631911. D. Dextral rörelse i samma häll som i "C" visas av asymmetriska veck.
E. Förkastning med glidrepor av kalcit och klorit som indikerar normal rörelse. Fältobservation 3 i figur 19. 664261/608964.
F. Diabasgång i granit. Foto: Stefan Luth. Fältobservation 4 i figur 19. 6645649/606558.

SLUTSATSER

En ny geofysiskt baserad lineamentkarta och det därur framkommande lineamentmönstret ligger till grund för en indelning av hela Bergslagensregionen i sex strukturella domäner. Inom alla domäner finns det en tydlig korrelation mellan orientering av lineament och deformationzoner eller svaghetszoner. Parallella strukturella trender inom varje domän tolkas som en reaktivering av plastiska skjuvzoner som spröd-plastiska zoner och förkastningar. Ingen uppenbar korrelation finns mellan orientering av skjuvzoner och foliation, vilket kan tyda på att de flesta skjuvzoner och förkastningar inte utnyttjade den anisotropi som genererats av redan existerande tektoniska strukturer.

Strukturanalyserna visar att det finns tre sprickgrupper i alla bergartsenheter:

- 1) NO-SV-lig strykning med brant stupning mot NV
- 2) flack stupning
- 3) NV-SO-lig strykning.

Den sistnämnda är mindre vanlig i de ytbergartsområden som det finns data från, vilket tolkas bero på att dessa bergarter är mer anisotropa och att anisotropin har andra riktningar än NV–SO. Strukturorienteringen är oberoende av litologin och det finns bara en svag korrelation mellan strukturorientering och kinematik. Det finns heller ingen uppenbar korrelation mellan den geografiska fördelningen av dextrala, sinistrala, reversa och normala rörelser i förhållande till de strukturella domänerna.

Inom den NO–SV-strykande WBBZ mellan Älvlången och Ramsberg kan lineament och veckmönster tolkas som ett resultat av intensiv vertikal och horisontal skjuvning. En entydig reversrörelse i samband med *icke-cylindrisk* veckning (F2) är lokalt överpräglad av z- och s-skjuvveck (F3, F4) som bildades genom sinistral respektive dextral lateral skjuvning. Skjuvningen inom WBBZ kan även betraktas som en lokalisering av deformation, framför allt baserat på ett avvikande veckmönster jämfört med det utanför WBBZ. Spröda, NV–SO-ligt strykande strukturer skär tvärs igenom WBBZ och måste därför vara yngre. Detsamma gäller förmodligen för den N–S-strykande spröd-plastiska Noradeformationszonen som förskjuter WBBZ 10 km sinistralt.

Kolsvaområdet representerar ett NV–SO-orienterat, transpressivt deformationszonssystem som tog upp förkortning genom revers-dextral och revers-sinistral rörelse. Geometrin och kinematiken för Kolsvasystemet liknar SDZ-systemet i Dannemoraområdet: transpressiv plastisk deformation med en både dextral och vertikal skjuvkomponent (vid 1,86–1,83 Ga). Senare fortsatte deformation längs SDZ under spröd-plastiska och spröda förhållanden, först med övervägande dextral rörelse (omkring 1,8–1,6 Ga) och slutligen med sinistral rörelse (runt 1,1 Ga).

I Hebyområdet finns metavulkaniska bergarter i ett stråk parallellt med en O–V-strykande deformationszon. Stråket visar kraftigt plastisk deformation och ett dextralt förkastningssystem bestående av främst Riedel shear.

REFERENSER

- Allen, R.L., Lundström, I., Ripa, M., Simeonov, A. & Christofferson, H., 1996: Facies analysis of a 1.9 Ga, continental margin, back-arc, felsic caldera province with diverse Zn-Pb-Ag-(Cu-Au) sulfide and iron oxide deposits, Bergslagen region, Sweden. *Economic Geology 91*, 979–1 008.
- Antal, I., Bergman, S., Fredén, C., Gierup, J. & Thunholm, B., 1998a: Översiktsstudie av Gävleborgs län. Geologiska förutsättningar. *SKB R-98-34*, 1–49.
- Antal, I., Bergman, S., Gierup, J., Persson, C. & Thunholm, B., 1998b: Översiktsstudie av Uppsala län. Geologiska förutsättningar. *SKB* R-98-32, 1–49.
- Antal, I., Bergman, T., Gierup, J., Lindén, A., Stephens, M. & Thunholm, B., 1998c: Översiktsstudie av Östergötlands län. Geologiska förutsättningar. *SKB R-98-26*, 1–50.
- Antal, I., Bergman, T., Persson, C., Stephens, M., Thunholm, B. & Åsman, M., 1998d: Översiktsstudie av Stockholms län. Geologiska förutsättningar. *SKB R-98-30*, 1–47.
- Antal, I., Bergman, T., Persson, C., Stephens, M., Thunholm, B. & Åsman, M., 1998e: Översiktsstudie av Södermanlands län. Geologiska förutsättningar. SKB R-98-49, 1–49.
- BABEL Working Group. (1993). Deep seismic reflection/refraction interpretation of crustal structure along BABEL profiles A and B in the southern Baltic Sea. *Geophysical Journal International*, *112*(3), 325–343.
- Bergman, S., Isaksson, H., Johansson, R., Lindén, A., Persson, C. & Stephens, M., 1996: Förstudie Östhammar. Jordarter, bergarter och deformationszoner. Svensk Kärnbränslehantering AB PR D-96-016, 81 p
- Bergman, T., Fredén, C., Gierup, J., Kübler, L., Lindén, A., Stephens, M., Stølen, L.K. & Thunholm, B., 1999: Översiktsstudie av Örebro län. Geologiska förutsättningar. *SKB R-99-23*, 1–49.
- Beunk, F.F. & Kuipers, G., 2012: The Bergslagen ore province, Sweden: Review and update of an accreted orocline, 1.9–1.8Ga BP. *Precambrian Research 216–219*, 95–119.
- 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.
- Bleeker, W., 1984: Geology of the Stråssa-Torrsjöboda area and the Håkansboda-Ingelshyttan area, map sheets 11F 4c, 11F 4d, 11F 4e: Unpublished exploration report for Luossavaara-Kirunavaara Aktiebolag (LKAB) and British Petroleum (BP) AB Joint Venture, B85-12, 97 p.
- Carlon, C.J. & Bleeker, W., 1988: The geology and structural setting of the Håkansboda Cu-Co-As-Sb-Bi-Au deposit and associated Pb-Zn-Cu-Ag-Sb mineralisation, Bergslagen, central Sweden. *Geologie en Mijnbouw 67*, 272–292.
- Carlon, C.J. & Bjurstedt, S., 1990: Stratabound and stratiform sulphide mineralization in the evolution of the Guldsmedshyttan Syncline, Bergslagen, southcentral Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 112*, 176-177.
- Eriksson, L. & Henkel, H., 1988: Storstrukturella zoner i Forsmarksområdet kompletterande flygmätningar, Rep. BRAP 88402, 5 pp., Sveriges geologiska undersökning, Uppsala, Sweden.
- Gierup, J., Kübler, L., Lindén, A., Ripa, M., Stephens, M., Stølen, L.K. & Thunholm, B., 1999: Översiktsstudie av Dalarnas län (urbergsdelen). Geologiska förutsättningar. *SKB R-99-29*, 1–48.
- 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. & Page, L.M., 2008: 40Ar/39Ar hornblende geochronology from the Forsmark area in central Sweden: Constraints on late Svecofennian cooling, ductile deformation and exhumation. *Precambrian Research 167*, 303–315.

- Holtstam, D. & Andersson, U.B., 2007: The REE-minerals of the Bastnäs-type deposits, southcentral Sweden. *Canadian Mineralogist 45*, 1 073–1 114.
- Högdahl, K., Sjöström, H. & Bergman, S., 2009: Ductile shear zones related to crustal shortening and domain boundary evolution in the central Fennoscandian Shield. *Tectonics 28*, TC1003.
- Jansson, N., Sädbom, S., Allen, R., Billström, K. & Spry, P.G., 2018: The Lovisa stratiform Zn-Pb deposit, Bergslagen, Sweden: structure, stratigraphy, and ore genesis. *Economic Geology 113*, 699–739.
- Johansson, Å. & Stephens, M.B., 2017: Timing of magmatism and migmatization in the 2.0–1.8 Ga accretionary Svecokarelian orogen, south-central Sweden. *International Journal of Earth Sciences 106*, 783–810.
- Krall, L., Evins, L.Z., Kooijman, E., Whitehouse, M. & Tullbord, E.-L., 2019: Tracing the palaeoredox conditions at Forsmark, Sweden, using uranium mineral geochronology. *Chemical Geology 506*, 68–78.
- Kübler, L., 1980: Ores as nuclei of structures. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 102*, 298.
- Law, A., and D. B. Snyder (1997), Reflections from a mylonitized zone in central Sweden, *Journal* of *Geophysical Research 102*, 8 411–8 425, doi:10.1029/96JB03269.
- Lidmar-Bergström, K., 1994: Berggrundens ytformer. I C. Fredén (red.): Berg och Jord Sveriges Nationalatlas, 44–54.
- Lilljequist, R. m.fl., 1985: Bergslagen. Malmgeologiska kriterier för de större sulfidmalmerna. Interimsrapport. SGAB PRAP 86503, 15 s.
- Lundegårdh, P.H. & Nisca, D., 1978: Beskrivning till berggrundskartan Västerås SV. Sveriges geologiska undersökning Af 122, 60 s.
- Lundegårdh, P.H., 1983: Beskrivning till berggrundskartan Lindesberg SO. Sveriges geologiska undersökning Af 139, 58 s.
- Lundström, I., 1983: Beskrivning till berggrundskartan Lindesberg SV. Sveriges geologiska undersökning Af 126, 140 s.
- Lundström, I., 1985: Beskrivning till berggrundskartan Lindesberg NV. Sveriges geologiska undersökning Af 140, 131 s.
- Luth, S., Sahlström, F., Jansson, N., Jönberger, J., Sädbom, S., Landström, E., Bergqvist, M., Arvanitidis, N. & Arvidsson, R., 2019: Building 3D geomodels using XRF-XRT-generated drill core data: The Lovisa-Håkansboda base metal- and Stråssa-Blanka iron deposits in Bergslagen, Sweden, SGA-extended Abstracts 2019.
- Malehmir, A., Dahlin, P., Lundberg, E., Juhlin, C., Sjöström, H. & Högdahl, K., 2011: Reflection seismic investigations in the Dannemora area, central Sweden: Insights into the geometry of polyphase deformation zones and magnetite-skarn deposits. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B11).
- Möller, Å., Engqvist, P. & Müllern, C.F., 1971a: Beskrivning till hydrogeologiska kartbladet Örebro NV. *Sveriges geologiska undersökning Ag 3*, 13–26.
- Möller, Å., Engqvist, P., Müllern, C.F. & Bengtsson, P., 1971b: Beskrivning till hydrogeologiska kartbladet Örebro SV. *Sveriges geologiska undersökning Ag 1*, 14–34.
- Möller, Å., Järnefors, B., Engqvist, P. & Müllern, C.F., 1974a: Beskrivning till hydrogeologiska kartbladet Örebro NO. *Sveriges geologiska undersökning Ag 2*, 12–20.
- Möller, Å., Engqvist, P. & Müllern, C.F., 1974b: Beskrivning till hydrogeologiska kartbladet Örebro SO. *Sveriges geologiska undersökning Ag 5*, 12–27.
- Fagerlind, T., Müllern, C.F. & Pousette, J., 1977: Beskrivning till hydrogeologiska kartbladet Norrköping NV. *Sveriges geologiska undersökning Ag* 7, 36–54.

- Page, L.M., Stephens, M.B. & Wahlgren, C.H., 1996: ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronological constraints on the tectonothermal evolution of the Eastern Segment of the Sveconorwegian Orogen, southcentral Sweden. *Geological Society, London, Special Publications 112*, 315–330.
- Page, L.M., Hermansson, T., Söderlund, P. & Stephens, M.B., 2007: Forsmark site investigation. ⁴⁰Ar/³⁹Ar and (U-Th)/He geochronology Phase II. *Svensk Kärnbränslehantering AB P-06-211*, 205 s.
- Persson, K.S. & Sjöström, H., 2003: Late-orogenic progressive shearing in eastern Bergslagen, central Sweden. *GFF 125*, 23–36.
- Petersson, J., Andersson, U.B. & Berglund, J., 2007a: Scan line fracture mapping and magnetic susceptibility measurements across two low magnetic lineaments with NNE and NE trend, Forsmark. I M.B. Stephens & K. Skagius (red.): Geology – Background complementary studies. Forsmark modelling stage 2.2. SKB R-07-56, Svensk Kärnbränslehantering AB, 5–15.
- Petersson, J., Skogsmo, G., Vestgård, J., Albrecht, J., Hedenström, A. & Gustavsson, J., 2007b: Bedrock mapping and magnetic susceptibility measurements, Quaternary investigations and GPR measurements in trench AFM001265. Forsmark site investigation. SKB P-06-136, Svensk Kärnbränslehantering AB, 38 s.
- Ripa, M., Brolin, C., Persson, S., 2019: Sala-Jugansboområdet. Sveriges geologiska undersökning SGU-rapport 2019:12, 14 s.
- Sahlström, F., Jonsson, E., Luth, S., Höghdahl, K., Landström, E., Sädbom, S., Lynch, E. & Ghaderidosst, S., 2019a: Textural evolution of the Lovisa Zn-Pb-(Ag) deposit, Bergslagen, Sweden: Insights from microscopy and 3D X-ray tomography, SGA-extended Abstracts 2019
- Sahlström, F., Jonsson, E., Högdahl, K., Troll, V.R., Harris, C., Jolis, E.M. & Weis, F., 2019b: Interaction between high-temperature magmatic fluids and limestone explains 'Bastnäs-type' REE deposits in central Sweden. *Scientific Reports 9*, 15203, doi:10.1038/s41598-019-49321-8
- Saintot, A., Stephens, M.B., Viola, G. & Nordgulen, Ø., 2011: Brittle tectonic evolution and paleostress field reconstruction in the southwestern part of the Fennoscandian Shield, Forsmark, Sweden. *Tectonics 30, TC4002*, doi:10.1029/2010TC002781.
- Sandström, B., Tullborg, E.-L., Larson, S.Å. & Page, L., 2009: Brittle tectonothermal evolution in the Forsmark area, central Fennoscandian Shield, recorded by paragenesis, orientation and 40Ar/39Ar geochronology of fracture minerals. *Tectonophysics* 478, 158–174.
- SKB, 2006: Site descriptive modeling Forsmark stage 2.1. Feedback for completion of the site investigation including input from safety assessment and repository engineering. *SKB R-06-38*, Svensk Kärnbränslehantering AB, 444 s.
- Sjöström, H. & Bergman, S., 1998: Svecofennian metamorphic and tectonic evolution of east central Sweden. Sveriges geologiska undersökning unpublished report 03-854/93:59, 47 s.
- Stephens, M. B., 1998: Berggrundskartan Karlskoga NO. Sveriges geologiska undersökning Af 184.
- Stephens, M.B. & Andersson, J., 2015: Migmatization related to mafic underplating and intra- or back-arc spreading above a subduction boundary in a 2.0–1.8Ga accretionary orogen, Sweden. *Precambrian Research 264*, 235–257.
- Stephens, M.B., Wahlgren, C.-H. & Weihed, P., 1997: Sweden. I E.M. Moores & R.W. Fairbridge (red.): *Encyclopedia of European and Asian Regional Geology*. Chapman and Hall, London, 690–704.
- Stephens, M.B., Ahl, M., Bergman, T., Lundström, I., Persson, L., Ripa, M. & Wahlgren, C.-H., 2000: Syntes av berggrundsgeologisk och geofysisk information, Bergslagen och omgivande områden. I H. Delin (red.): Regional berggrundsgeologisk undersökning. Sammanfattning av pågående undersökningar 1999. Sveriges geologiska undersökning, Rapporter och meddelanden 102, 78–97.

- Stephens, M.B., Fox, A., La Pointe, P., Simeonov, A., Isaksson, H., Hermanson, J. & Öhman, J., 2007: Geology Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-45, Svensk Kärnbränslehantering AB, 224 s.
- 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, 1–259.
- Stålhös, G., 1981: A tectonic model for the Svecokarelian folding in east central Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 103*, 33–46.
- Stålhös, G., 1984: Svecokarelian folding and interfering macrostructures in eastern Central Sweden. I A. Kröner, & R. Greiling (red.): Precambrian tectonics illustrated, 369–379. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung.
- Stålhös, G. 1989: Berggrundskartan 12I Östhammar SO. Sveriges geologiska undersökning Af 172.
- Stålhös, G., 1991: Beskrivning till berggrundskartorna Östhammar NV, NO, SV, SO med sammanfattande översikt av basiska gångar, metamorfos och tektonik i östra Mellansverige. *Sveriges geologiska undersökning Af 161, 166, 169, 172*, 249 s.
- Söderlund, P., Page, L.M. & Söderlund, U., 2008: 40Ar-39Ar biotite and hornblende geochronology from the Oskarshamn area, SE Sweden: discerning multiple Proterozoic tectonothermal events. *Geological Magazine 145*, 790–799.
- Söderlund, P., Hermansson, T., Page, L.M. & Stephens, M.B., 2009: Biotite and muscovite 40Ar– 39Ar geochronological constraints on the post-Svecofennian tectonothermal evolution, Forsmark site, central Sweden. *International Journal of Earth Sciences 98*, 1 835–1 851.
- Talbot, C.J. & Sokoutis, D., 1995: Strain ellipsoids from incompetent dykes: application to volume loss during mylonitisation in the Singö gneiss zone, central Sweden. *Journal of Structural Geology* 17, 927–948.
- Tirén, S.A. & Beckholmen, M., 1990: Influence of regional shear zones on the lithological pattern in central Sweden, *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 112*, 197–199.
- Tullborg, E.-L. & Larson, S.-Å., 1982: Fissure fillings from Finnsjön and Studsvik, Sweden. Identification, chemistry and dating., *SKBF KBS Teknisk rapport 82-20*, 1–76.
- Wahlgren, C.-H., Cruden, A.R. & Stephens, M.B., 1994: Kinematics of a fan-like structure in the eastern part of the Sveconorwegian orogen, Baltic Shield, south-central Sweden. *Precambrian Research* 70, 67–91.
- Wickman, F.E., Åberg, G. & Levi, B., 1983: Rb-Sr dating of alteration events in granitoids. *Contributions to Mineralogy and Petrology 83*, 358–362.
- Wik, N.-G., Bergström, U., Bruun, Å., Claeson, D., Jelinek, C., Juhojuntti, N., Kero, L., Lundqvist, L., Stephens, M.B., Sukotjo, S. & Wikman, H., 2005: Beskrivning till regional berggrundskarta över Kalmar län. Sveriges geologiska undersökning Ba 66, 1–50.
- Wiman, E., 1930: Studies of some Archaean rocks in the neighbourhood of Upsala, Sweden, and their geological position. *Bulletin of the Geological Institution of the University of Upsala 23*, 1–170.
- Wiman, E., 1942: Studies of the morpho-tectonics of the Mälar depression, Sweden. Bulletin of the Geological Institution of the University of Upsala 29, 287–303.