

EGS

- Framtidens Geotermiska System

Hanna Kervall

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,
kandidatarbete, nr 513
(15 hp/ECTS credits)



Geologiska institutionen
Lunds universitet
2017

EGS

-Framtidens Geotermiska System

Kandidatarbete
Hanna Kervall

Geologiska institutionen
Lunds universitet
2017

Innehåll

1 Inledning	7
2 Metod	7
3 Vad är EGS?	8
3.1 EGS-systemets uppbyggnad	9
3.2 Hydroshearing v/s Hydrofracking	10
3.3 Borrteknik	12
3.4 Referensprojekt	14
3.4.1 Soultz, Frankrike	14
3.4.2 Pohang, Korea	15
3.4.3 Espoo, Finland	15
3.4.4 Newberry, USA	16
4 Kritiska geologiska parametrar och insamling av data	17
4.1 Strukturella berggrundsförhållanden	17
4.2 Bergspänningsförhållanden	18
4.3 Bergartsfördelning	19
4.4 Sprickfördelning	19
4.5 Hydrauliska egenskaper	19
4.6 Seismisk bakgrundsdata	20
4.7 Borrbarhet, Drillability	20
4.8 Termiska egenskaper	20
5 Fysikaliska egenskaper	21
6 Modelleringsverktyg	22
7 Tillstånd	22
8 Risker och miljö	23
9 Hur ser möjligheterna ut i den svenska berggrunden?	24
9.1 Fanerozoiska sedimenära och magmatiska bergarter	25
9.2 Sydvästskandinaviska provisen	26
9.3 Skandinaviska magmatiska bältet	27
9.4 Svekokarelska provinsen	27
9.5 Kaledonisk berggrund	28
9.6 Impaktstrukturer och avvikande berggrund	28
10 Slutsatser	30
11 Tack	30
12 Referenser	30

EGS –Framtidens Geotermiska system

HANNA KERVALL

Kervall, H., 2017: EGS -Framtidens Geotermiska System. *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet*, Nr. 513, 37 sid. 15 hp.

Sammanfattning: En ökad efterfrågan på miljövänliga energialternativ har resulterat i att allt fler länder börjat utvärdera sina geotermala tillgångar. En bidragande orsak till det ökade geotermala intresset är förändrade krav som ställs på geologin och hydrologin med dagens moderna EGS-anläggningar. Med EGS-tekniken (*Enhanced Geothermal Systems*) skapar man idag konstgjorda reservoarer, för fjärrvärme- och elproduktion, runt om i världen genom hydrostatisk stimulering av berggrunden, sk. hydroshearing. I kall tjock berggrund har tekniken länge begränsats av kostsamma djupborrningar. Med dagens snabba utveckling av bl.a. hydraulisk hammarbortteknik tror man sig snart kunna möjliggöra kostnadseffektiva djupborrningar ner till sex-sju kilometer även i kristallin berggrund. Den borrhåstekniska utvecklingen pågår, förutom i Sverige, bl.a. i Sydkorea, Tyskland och Australien. I arbetet presenteras EGS-tekniken och hur utformningen av reservoaren sker. Tekniken härstammar från hydrofracking, vars metoder och miljörisker här vägts mot hydroshearingens. De båda teknikerna kombineras inte sällan och miljövänliga tillvägagångssätt finns representerade hos båda. Åtta stycken geologiska parametrar med avgörande betydelse för EGS-anläggningens potential har vidare kunnat fastställas. Granitisk berggrund har visat sig svara mycket bra mot dessa parametrar, detta bl.a. då den ofta uppspricker homogent samt uppvisar förhöjda halter av kalium, torium och uran, vilka föranleder hög värmeproduktion. För utvärdering internationellt presenteras bl.a. testprojekten Pohang i Korea, Newberry i USA, Soultz-sous-Forêts i Frankrike samt Espoo i Finland. Testprojekten i Newberry och Soultz-sous-Forêts har uteslutande bidragit med mest kunskap inom området, detta framförallt kopplat till hydrostatisk stimulering av berggrunden. I arbetets slutliga del har en generell presentation och bedömning gjorts av den svenska berggrunden och dess EGS-förutsättningar. Bedömningen har baserats på aktuell litteratur och mätdata från befintliga borrhål. I dagsläget tros de bästa förutsättningarna finnas i område där sedimentär berggrund ansluter till impakt- eller förkastningsstrukturer som resulterat i uppsprickning av berggrunden. I Sverige finner vi dessa platser på Gotland, i sydvästra skåne samt kring Siljanringen.

Nyckelord: EGS, hydroshearing, hydraulisk hammarbortteknik, granitisk berggrund, Newberry.

Handledare: Mikael Erlström

Ämnesinriktning: Berggrundsgeologi

Hanna Kervall, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige. E-post: HannaKervall@hotmail.com

EGS -Future's Geothermal Systems

HANNA KERVALL

Kervall, H., 2017: EGS –Future's Geothermal Systems. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 513, 37 pp. 15 hp

Abstract: The increasing demand for eco-friendly energy alternatives and the changing requirements of state of the art EGS-plants (Enhanced Geothermal Systems) have set the mark for many countries to start evaluating their geothermal assets. By using the EGS-technique, artificial reservoir providing district heating and electricity are created around the world by stimulating the bedrock hydrostatically with a process called hydroshearing. However, this technique has for long, been limited in cold thick bedrock by costly deep drillings. Interestingly, today's fast development of the hydraulic hammer drilling technique has enabled a cost effective deep drilling to depths of six-seven km, even in crystalline bedrock and are, continuously being developed in Sweden as well as in South Korea, Germany and Australia. In this work I will present the EGS-technique and how the reservoir is formed. The technique is derived from hydrofracking for in which both methods and environmental risks have been valued against the ones of hydroshearing. The techniques are often combined and environmental friendly approaches are represented in both. Eight important geological parameters, affecting the potential of the EGS-plant have been determined. Granitic bedrock does respond well to these parameters, in case of homogeneous fracturing and increased levels of potassium, thorium and uranium, which results in high heat productivity. Four international pilot-projects, Pohang in South Korea, Newberry in USA, Soultz-sous-Forêts in France and Espoo in Finland are also presented in this work, with the Newberry and Soultz-sous-Forêts- projects as the main contributors in knowledge, especially regarding hydraulic stimulation of the bedrock. In the final part of this essay, a general presentation and assessment of the Swedish bedrock and it's suitability for EGS-exploration is provided. The evaluation assessment is based on modern literature and data gathered from deep holes. Today's best conditions are evaluated to exist in areas with sedimentary bedrock that connects to fracturing systems caused by impact- or fault structures. These conditions are found in the northwest of Scania, on Gotland and around the Siljanringen.

Keywords: EGS, hydroshearing, hydraulic hammer drilling, granitic bedrock, Newberry.

Supervisor: Mikael Erlström

Subject: Bedrock Geology

Hanna Kervall, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden. E-mail: HannaKervall@hotmail.com

1 Inledning

Med vår tids stundande "peak oil" och det moderna samhällets växande energibehov efterfrågas i allt större utsträckning ett kostnadseffektivt och tillförlitligt energialternativ med minimal belastning på vårt ekosystem. Nationellt läggs stor fokus på närbelägna och förnybara energiresurser, vilka förväntas uppgå till 50% av Sveriges totala energiproduktion år 2020 (Statens Energimyndighet 2011). Globalt uppskattar IEA (*International Energy Agency*) en kraftig ökning av geotermi de närmaste 30 åren (Fig. 1). Ytterligare 50 anläggningar, med en medelproduktion på 10 MW, bedöms tillkomma bara inom EGS, Enhanced/Engineered Geothermal Systems, de närmaste 10 åren (International Energy Agency 2011; i forts. IEA).

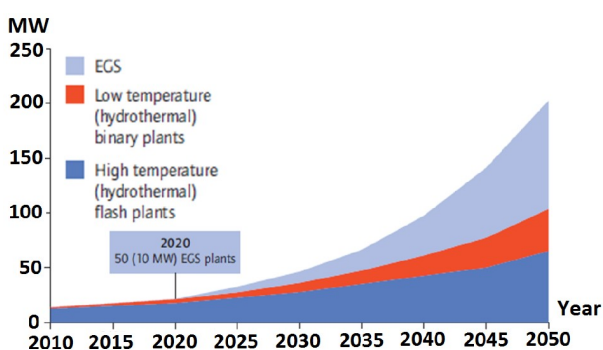


Fig. 1. Ökning av geotermala kraftverk uppdelade efter typ av teknik. Bild modifierad från IEA (2011)

EGS utmärker sig inte enbart genom att svara på marknadens krav, anläggningarna upptar därtill förhållandevis liten yta och har fördelen att leverera energi dygnet-runt då de i jämförelse med vind-, sol- och vågenergi inte är beroende av en yttre föränderlig kraft (U.S Department of Energy u.å.-c; i forts. U.S DOE). Hela EGS produktionskedja betraktas som koldioxidneutral, något som sammanfaller med regeringens förslag om tidigareläggning av klimatdelmålet koldioxidneutralitet till år 2045 (Statens Offentliga Utredningar 2016; U.S DOE u.å.-c) Den geotermala tekniken är vidare väl beprövad då den konventionellt varit i bruk sen tidigt 1900-tal och 45 års EGS-forskning idag resulterat i tio större anläggningar som är under uppbyggnad (Austin 1977; IEA 2011; Breede et al. 2013. Eftersom stora krav tidigare ställts på berggrundens höga temperatur, permeabilitet samt vattenförande förmåga har geotermala system länge begränsas till främst sedimentär och vulkaniskt aktiv berggrund med stora grundvattenförekomster (Jeanloz & Stone 2013). EGS, som till skillnad från ett konventionellt geotermalt

system är en mänskligt skapad reservoar, lämpar sig däremot optimalt för energiutvinning i torr varm berggrund, s.k. HDR (Hot Dry Rock) (U.S DOE 2012a). Med de sänkta krav på de tidigare traditionellt optimala geotermala förhållande som EGS-tekniken innebär följer idag möjligheten att utvinna energi i tidigare outnyttjad berggrund, här bland det svenska urberget (Massachusetts Institute of Technology 2006; i forts. MIT). För svensk energiförsörjning kan EGS därmed utgöra det naturliga steget att fasa ut dagens importerade kolkraft, till förmån för en miljövänlig och mer självständig energinäring (Vattenfall 2017).

Målsättningen med arbetet är att presentera EGS-tekniken och de geologiska förutsättningar en sådan anläggning kräver. Syftet är bl.a. att redogöra för de viktigaste styrande parametrarna i berggrunden och hur hydraulisk kommunikation skapas i berggrundens djupare delar. Vidare kommer förutsättningarna och möjligheterna att applicera EGS-tekniken på svensk berggrund diskuteras, detta då pågående utveckling av vattendriven hammarborrteknik högst troligt kommer möjliggöra kostnadseffektiva djupborrningar inom snar framtid (Jeanloz & Stone 2013). Då EGS idag uppmärksammas globalt, med pågående pilotförsök i bl.a. Korea, Frankrike, U.S.A och Finland, kommer en stor del av arbetet relateras till dessa pilotförsök.

2 Metod

Examensarbetet är baserat på en litteraturstudie. Information har hämtats från artiklar och rapporter funna i databaserna Web of science, LUBsearch, GEOBASE, GeoRef, Worldcat, GeoRegister (Sveriges Geologiska Undersökning). Svenska myndigheters hemsidor och rapporter har varit användbara och information har hämtats från Riksdagsförvaltningen, Naturvårdsverket, Svenska Kraftnät (SVK), Statens Energimyndighet, Statistiska Centralbyrån (SCB), Sveriges Geologiska Undersökning (SGU), Trafikverket (TRV) samt kommunala instanser. Utländska myndigheter som använts utgörs av finska regeringens kommunikationsdepartement, International Energy Agency (IEA), U.S Department Of Energy (U.S DOE) samt tyska förbundsministeriet för miljö, naturskydd och kärnsäkerhet (BMU). Visuellt material, rapporter och artiklar om pågående pilotprojekt har varit värdefullt och likaså information från branschföretag såsom LKAB, Wassara, Baker Hughes, AltaRock och Landocean Energy Services. För sökning av bokreferenser som behandlar EGS har den nationella bibliotekskatalogen Libris använts. Använda sökord har varit: EGS, Enhanced geothermal systems, hydroshearing, Soultz, Pohang, Newberry, ST1-

Finland. Vidare har personlig kontakt med Trenton Cladouhos, vice chef på AltaRock Energys forskning och utvecklingsavdelning i USA, Veronica Bäcker på LKAB-Wassara samt Tero Saarno, produktionschef på ST1 i Finland varit behjälpligt.

3 EGS

EGS är en av människan skapad reservoar (Fig. 2), och skiljer sig därmed från konventionella geotermiska system, på vilka det ställs betydligt högre krav på de geologiska förutsättningarna. IEA uppskattar att det finns stor potential för EGS-tekniken i torr och mindre uppsprucken berggrund (IEA 2011). Lönsamheten i dessa system bestäms utifrån, sinsemellan interagerande faktorer beroende på anläggningsdjupet i berggrunden; temperatur, permeabilitet, vattenförekomst (MIT 2006).

Ett geotermalt systems produktionsgrad baseras till stor del på berggrundens temperatur, vilken kan bestämmas i förhållande till djup genom geofysisk temperaturmätning i borrhål. Den geotermala gradienten, d.v.s. temperaturökningen ner i jordskorpan, kan variera från 15-30°C/km i tektoniskt stabila område till extrema 200°C/km vid mitt-oceanska ryggen. För EGS i svenska förhållande bör den ligga över 25°C/km (pers.kom Erlström). Förhöjd gradient förekommer främst i områden med tunn jordskorpa, i vulkaniskt aktiva områden samt i berggrund med radioaktivt sönderfall (Wasserburg et al. 1964). För elproduktion, utan stödenergi, krävs idag en minimitemperatur på ca 150°C i produktionsbrunn (U.S DOE u.å.-a). För fjärrvärmeproduktion bör utgångstemperaturen i produktionsbrunnen minst uppgå till 100°C och för optimal direktanslutning till fjärrvärmesystem krävs temperaturer på 115-120°C (MIT 2006; pers. kom. Erlström). Temperaturen nere i reservoaren bör därmed vara högre då en viss temperaturförlust sker på vägen upp ur brunnen (Jeanloz & Stone 2013). För att utvärdera ett systems lönsamhet ställs vinst i temperatur mot kostnad för utvinning i förhållande till djup (Jeanloz & Stone 2013). För sedimentär berggrund kan ett medelvärde av den geotermiska gradienten fås genom att dela värmeflödet med den termiska konduktiviteten (Wallrot 1994). Den geotermiska gradienten varierar mycket lite i stabila urbergsområden såsom Sverige, men variationer över 50°C/km inom samma formation är inte ovanligt inom varma berggrundsområden (Fig. 3.) (MIT 2006).

Permeabiliteten, bergartens förmåga till genomsläpplighet, ökas i EGS genom att ett redan befintligt, men lågpermeabelt spricksystemet, hydrostatiskt

stimuleras till skjuvning. Målet är att vidga sprickorna samtidigt som kommunikationen mellan dem långsamt ökas (MIT 2006). Spricksystemets artificiellt skapade egenskaper blir bestående, detta till skillnad från de skapade vid fracking (Dusseault 2016).

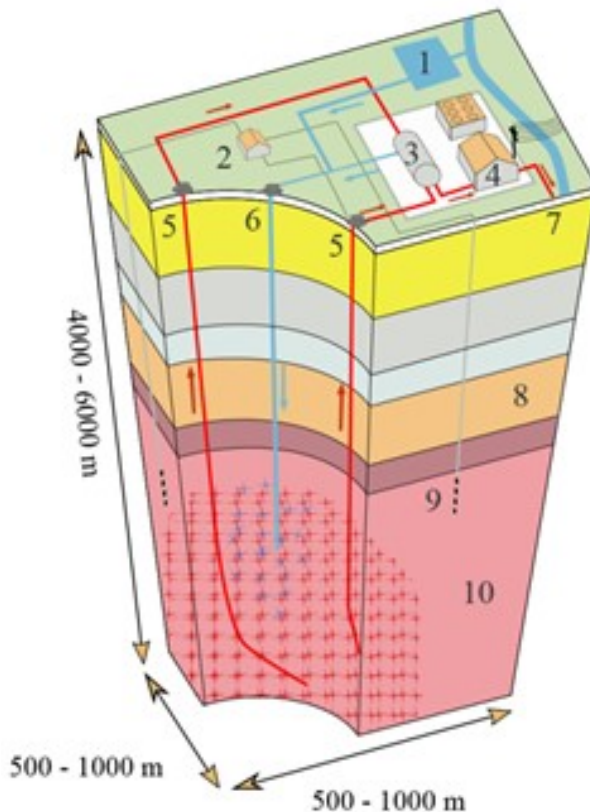


Fig. 2. EGS Principskiss. 1=Vattenreservoar, 2=Pumphus, 3=Värmeväxlare, 4=Turbinhall samt eventuella kraftverk för energiproduktion, 5=Produktionsbrunn, 6=Injektionsbrunn, 7=Varmt vatten för fjärrvärme, 8=Porösa sediment, 9=Observationsbrunn, 10=Kristallin berggrund. Bild från Wikipedia (2009)

Att mikroseismisk aktivitet skapas under stimuleringsfasen när sprickorna skjivas, är något som kan användas för att tolka berggrundens permeabilitet. Spricksystemet kan regleras i avseende både expansivt och begränsande syfte, detta för att förhindra den minskade permeabilitet som både under-, och överstimulering kan resultera i. Vid överstimulering sker detta genom att "genvägar" som minskar vattnets transportsträcka skapas och resultatet blir indirekt att vattnets produktionstemperaturen sänks (MIT 2006). Förkastningszoner har en liknande problematik men här utgörs "genvägarna" av befintligt breda sprickor. Detta är en bidragande faktor till att EGS vanligen inte placeras centralt i denna miljö (MIT 2006). Den vertikala permeabiliteten avgörs av temperaturgradientens storlek och borrhkostnader, men begränsas

geologiskt ner till djup kring 10 km. Förekomsten av sprickor är störst i den övre delen av berggrunden, ner till ett par hundra meter, och herefter ökar svårighetsgraden att detektera sprickorna med ökat djup.

Oavsett berggrundens ursprungliga vatteninnehåll kräver EGS stora mängder vatten avseende anläggningsarbete och drift. Den största vattenutgiften relateras till kylning av värmeväxlande kondensorer samt den vattentillförsel som driften kräver för att ersätta det vatten som, t.o.m i de naturliga systemen, förloras i reservoaren (Jeanloz & Stone 2013). För kylning av kondensorer finns både vatten- och luftkylda system. De torra luftkylda systemen är oberoende av vatten och effektiva vid låga utomhus-temperaturer, dock minskar inte sällan effektiviteten med över 100% då utomhustemperaturen ökar under sommarhalvåret (MIT 2006). Vattenförbrukningen vid anläggningsarbetet avser vanliga ”rutinrelaterade” behov, samt den förbrukning som kan relateras till stimuleringsprocess och hydraulisk borrning, om sådan sker. För vattendrivna hammarboring förbrukar Wassaras hammare 300 liter rent vatten/minut, detta vid ett tryck på 180 bar (Wassara u.å.) Vidare blir slutlig vattenfyllningen av reservoaren omfattande i arida område och i HDR-reservoarer där naturlig vattenförekomst är liten (Jeanloz & Stone 2013). Då vattentillgången kan utgöra en allvarligt begränsande faktor för EGS är det av största vikt att möjliggöra eventuell tillfällig vattenförsörjning vid anläggningsarbetet, att reducera spillvatten samt att vatteneffektivera produktionskedjan (MIT 2006; Song et al. 2015). Än så länge används färskvatten för reservoarer, men det finns också undantag som i norra Kaliforniens geysrar, där man i processen att utvinna het ånga med lågt vatteninnehåll, s.k. torr ånga, sedan år 2004 använt sig av återvunnet avloppsvatten (MIT 2006). När det gäller borrhningen så kan Wassaras vattendrivna hammare drivas både med färskvatten och saltvatten (Wassara u.å.)

3.1 EGS uppbyggnad

Företag inom EGS-branschen skiljer sig inte sällan åt genom val av modelleringsprogram, undersökningsmetod och borrh teknik. Grundprincipen för EGS är dock densamma. Nedanstående information utgår främst från serviceföretaget Baker Hughes, med lång erfarenhet inom gas- och petroleumindustrin (Baker Hughes 2017). Då gas-, olja-, kol- och gruvprospektering på många sätt påminner om geotermisk utvinning är en mängd utrustning och tekniker gemensamma (MIT 2006). Referensen Baker Hughes bör därmed betraktas som tillförlitlig. Skapandet av

EGS delas för enkelhetens skull in i en *inledande fas*, en *stimuleringsfas* och en *slutlig fas* då systemet färdigställs. Nedan följer beskrivning av faserna.

- Den *inledande fasen* karaktäriseras av att geologer, ingenjörer och andra inom området sakkunniga, lokaliserar lämplig reservoar med avseende på temperatur, permeabilitet samt vattenförekomst. En första bedömning vilar på sammanställning av befintlig data, tidigare genomförda mätningar etc. Baserat på geologiska-, geokemiska- samt geofysiska undersökningar skapas herefter en modell som används för att bestämma det aktuella områdets potential. Kompletterande undersökningar in situ kan med fördel även tillämpas, detta i syfte att tolka berggrundens dominerande sprickriktning samt mekaniska egenskaper. Den dominerande sprickriktningen är av största betydelse då brunnarna, för största effekt, lämpligen placeras i linje med denna. Bedöms EGS-förutsättningarna goda ansöks herefter om tillstånd och först då detta erhållits kan borrhning av injektionsbrunn inledas. Med brunnens färdigställande kan värmeresistenta instrument för logging, geofysisk borrhålmätning, tillämpas för att utvärdera bl.a. bergspänningsförhållandena och sprickorientering, flödes-, hastigheter, tryck, temperaturgradienter e.t.c. (MIT 2006).
- *Stimuleringsfasen*: Vatten pressas genom berggrundens befintliga spricksystem, med hjälp av stimuleringspumpar för att uppnå ett hydrostatiskt tryck så högt att spricksystemet skjuvas och vidgas, sk. *hydroshearing* (Fig. 3). Den hydrostatiska stimuleringen tillåts pågå/ökas tills sprickorna vidgats till önskad storlek, vanligen <1mm, optimalt med en kostnads-effektiv radie på ca 500 meter från injektions-



Fig. 3 Stimuleringspumpar från EGS-anläggningen i Newberry, USA. Foto från Altarock Energy (2014)

brunnen (Baker Hughes 2014). Ofta resulterar denna process även i en viss nybildning av sprickor. När det vattenfyllda spricksystemet erhållit önskad storlek injekteras vattnet proppants, en s.k. "avledare", med syfte att tillfälligt blockera spricksystemet (MIT 2006). Avledare kan utgöras av s.k. *biodegraders*, polymerer eller mikrobiocider vilka är, som namnet indikerar, helt eller delvis nedbrytbara (Bomgardner 2015). Nedbrytningsprocessen för dessa varierar över tid, polymererna är inerta, men flera mikrobiocider är akut giftiga fram tills nedbrytning sker (Bomgardner 2015).

När det hydrostatiska trycket åter ökas resulterar blockeringen i att vattnet pressas djupare ner och spricksystemet under det blockerade området stimuleras och öppnas. När det nya systemet nått önskad storlek injekteras biodegrader och processen upprepas. På detta sätt vidgas och skjuvas sprickor på större djup. Processen är möjlig att dokumentera då den hydrauliska stimuleringen resulterar i mikro-seismiska vågor, vilka kan övervakas och registreras av en seismograf (US DOE 2012a). Den seismiska datan hanteras i modelleringsprogram som ger information om spricksystemets storlek, lokalisering och orientering (Altarock Energy 2011). För sprickernas orientering kan kompletterande loggar användas och i tillägg kan specialloggar för injektering av spårämne för kartläggning och övervakning av flödesvägar även brukas (MIT 2006; Ayling 2016). Loggar omnämns vidare under *Kritiska geologiska parametrar* och *insamling av data*.

- Under den *slutliga fasen* öppnar sig spricksystemet i takt med att vattentemperaturen naturligt höjs och biodegradern löses upp. För placering av produktionsbrunnar analyseras nu spricksystemets orientering, lokalisering & storlek, detta baserat på mätdata och modeller. Produktionsbrunnens största effekt uppnås när maximalt antal sprickor penetreras (MIT 2006). När samtliga brunnar är installerade kan kallt vatten pumpas ner i injektionsbrunnen, röra sig igenom systemet samtidigt som det absorberar värme, och artificiellt pumpas upp som varmt vatten genom produktionsbrunnen. Systemets kapacitet kan härmed utvärderas och en konceptuell modell görs avseende kostnadseffektivitet, beräknad vattenmängd, uttags-

mängd, antal produktionsbrunnar, lämplighet för fjärrvärme/energiutvinning, typ av energiomvandlingssystem etc. Typ av energiutvinning beror, som tidigare nämnts, på temperatur i produktionsbrunnen. Temperaturen kan dock vara svårt att fastställa i förhållande till de energiförluster som förekommer i ett inledande skede. Optimal energiomvandling sker vanligen i kraftverk som använder en av två kraftcykler, antingen luftkylt binärt system eller vattenkylt flashsystem. Vid båda kraftcyklerna återförs produktionsvattnet till det geotermala systemet (MIT 2006). Två huvudsakliga skillnader mellan kraftverkssystemen är att ett vattenkylt system förbrukar jämförelsevis stora mängder rent vatten, medan ett luftkylt system minskar avsevärt i effektivitet under varmare årstider. Utsläpp från binära kraftverksstationer består inte av någon växthusgas, endast vattenånga (Altarock 2014).

3.2 Hydrofracking v/s Hydroshearing

Hydrofracking och hydroshearing är två metoder som båda syftar till att skapa permeabilitet i berggrunden. Metoderna kan, beroende av litteratur, båda komma att innefattas i begreppet EGS (Breede et al. 2013). I princip uppstår shearing (skjuvning), när ett hydrostatiskt tryck, långsamt ökas så att denna stress slutligen blir större än berggrundens kompressiva stress (Fig. 4). Om det hydrostatiska trycket är stort nog, och ökas tillräckligt snabbt, spricker berggrunden istället upp. Denna metod kallas hydrofracking (Fig. 5) (Dusseault 2016). Hydrofracking och hydroshearing tillämpas vidare på olika typer av berggrund, med avseende permeabilitet.

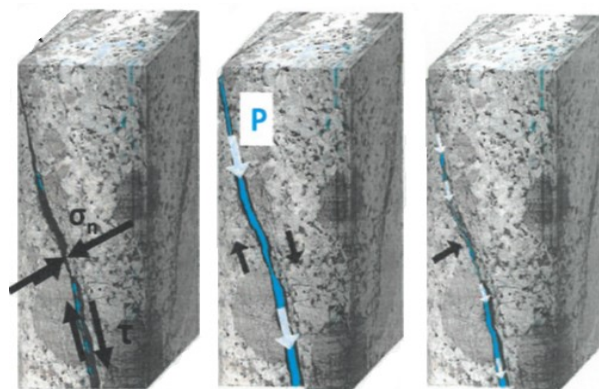


Fig. 4. Skjuvningsprocessen gestaltad. Från vänster: hydraulisk kommunikation saknas i sprickan. Mitten: sprickan utsätts för hydrostatiskt tryck vilket resulterar i att den skjuvas och vidgas. Höger bild: sprickan är självstöd. Modifierad från Altarock Energy (2014)

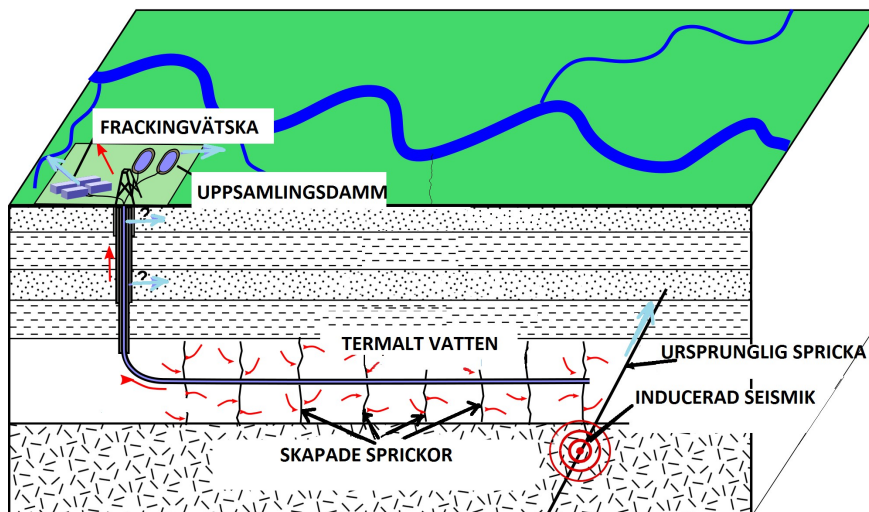


Fig. 5. Modell över stimulerad berggrund, hydrofracking. Hydrauliskt tryck riktas horisontellt mot ursprunglig spricka i berggrund. Nya sprickor skapas vinkelrätt mot det nya trycket. Termalt vatten gestaltas med röda pilar. Frackingvätska gestaltas med ljusblå pilar. Modifierad bild från Wikipedia (2013)

Vid hydroshearing vidgas och skjuvas ett redan befintligt spricksystem i låg- till medelpermeabel berggrund (MIT 2006). Vid hydrofracking är huvudsyftet att skapa ett nytt spricksystem i icke- till lågpermeabel berggrund (MIT 2006). Hydrofracking har sedan 1940-talet använts inom olje- & gasindustrin för att möjliggöra större uttag (Potter et al. 1974; Baker Hughes 2012). Metoden har kommit att relateras till icke miljövänliga medel s.k. "tracers", "diverters" och "proppants" som kan brukas i processen. Tracers är ett samlingsnamn på de konservativa, termiskt- eller kemiskt reaktiva och icke-reaktiva ämnen samt naturliga fluider som kan används för att utvärdera spricksystemet vid både hydroshearing och fracking (MIT 2006; Jeanloz & Stone 2013; Ayling et al. 2016). Diverters utgörs av det material som injekteras i pulser med syfte att tillfälligt avleda stimuleringen, något som båda metoderna vanligen använder sig av. Diverters funktionella livslängd beror av tid och värme och de kan utgöras av både icke biologiskt nedbrytbara material och naturliga mineral (Potter et al. 1974; U.S DOE 2012b). En nedbrytbar diverter som används av Altarock är TZIM (Thermally Degradable Zonal Isolation Materials) (U.S DOE 2013). Vid hydrofracking tillsätts även någon form av sprickuppstöttande medel, s.k. "proppants", som utgörs av ett mekaniskt starkt, permeabelt material, vanligen bestående av grovkornig sand eller artificiella keramiska pärlor (Bomgardner 2015). Vid hydroshearing ersätter skjuvningen vanligen denna rent mekaniska effekt som proppants upprätthåller vid hydrofracking. Detta möjliggörs vidare av att sprickytorna är ojämna och därmed inte glider tillbaka till det exakta ursprungsläget (Dusseault 2016). Häri ligger den främsta anledningen till att de egenskaper skjuvningsprocessen åsamkar spricksystemet förblir

permanenta medan de, med andra medel upprätthållna, inte blir det (Fig. 6). Detta kunde fastställas redan år 1977 vid HDR-projektet i Rosemanowes Quarry vid Penryn, England (MIT 2006) Hydroshearing kom att utvecklas ur hydrofracking, då man på 1980-talet började förstå att berggrunden ofta var naturligt uppsprucken, och att det var detta spricksystem som vid stimulering resulterade i störst tillväxt, genom skjuvning (MIT 2006; Jung 2013). Tekniken har sedan dess kommit att utvecklas till en egen metod. Studier av inducerad mikroseismik, vilka utgör ett betydelsefullt verktyg för båda metoderna, visar vidare att hydrofracking alltid medför en viss komponent av skjuvning. Skjuvningen blir mer påtaglig då berggrunden är lågpermeabel samt utanför det aktivt stimulerade området, detta ibland med en radie på 100

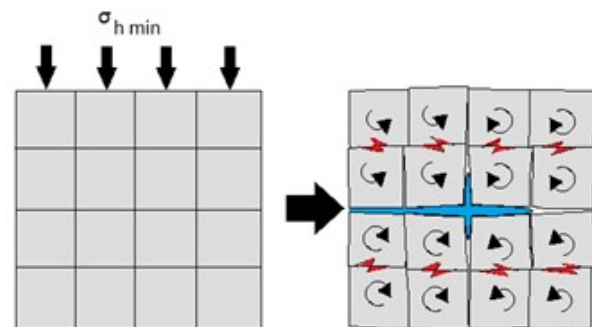


Fig. 6. På vänster bild har hydrostatiskt tryck, vinkelrätt mot kompressionsstressen resulterat i deformationen. På höger bild verkar både normal- och skjuvspänningar.

-tals meter från proppingzone (Dusseault 2016). Att berggrunden därtill sällan är homogen försvårar en uppskattning av stimuleringens effekt (Ayling 2016). Vid både hydroshearing och hydrofracking påverkas dock ett betydligt större område än det aktivt stimulerade och

seismisk aktivitet med stor magnitud på Richterskalan har kunnat registrerats för båda metoderna (Breede et al. 2013; Watson 2016). Att stimulerings-effekten får så stor utsträckning tros kunna relateras till den kristallina berggrundens rigiditet (Dusseault 2016). För hydrofracking kan spricksystem, av ekonomiska skäl, maximalt introduceras 100-150 m från injektionskällan, vilket skiljer sig från, tidigare nämnt, 500 m vid hydroshearing (Baker Hughes 2014; Dusseault 2016).

3.3 Borrteknik

Borrningar vid anläggande av EGS utgörs av ytligare s.k. mikrohålsborrningar, samt djupare borrningar (Jeanloz & Stone 2013). Med avseende på de egenskaper man önskar borrhålen, dess djup, samt den aktuella geologin används olika borrtekniker. Teknikerna definieras vanligen utifrån den kraft och/eller metod samt borrhammare som används (Fig.7), (Fig.8). Borrningens uppgift är att, genom friktion, skapa skjuvspänning som resulterar i skjuvning och brott kring och bakom borrhans kontaktytor (Jeanloz & Stone 2013). Att skapa hög skjuvspänning är centralt då den kristallina berggrundens skjuvhållfasthet är betydligt lägre än den motverkande kompressiva kraften. I granit motsvarar skjuvhållfastheten cirka 5 Mpa, detta i jämförelse med den kompressiva kraften på 200 Mpa (Jeanloz & Stone 2013). Borrteknikens effektivitet kan utvärderas utifrån fyra faktorer; slagverkan, matarkraft, rotation samt spolning (Atlas Copco 2015).

För större borrningar används vanligen hydraulisk (vattentrycksdriven) eller pneumatisk, (tryckluft-driven) borrhammare (Geotrained 2011). Metoden utgörs vanligen av rotationsborrning, slagmetoden hammarborrning eller det integrerade systemet rotationslagverk, till vilken DTH- (*Down the hole*) hammaren kan räknas (Geotrained 2011). Den tekniska utmaning består idag i att kostnadseffektivt kombinera olika metoder och tekniker, något man ser i sonicborren, vars lodräta oscillerande rörelse, tillsammans med både luft- och vattenkraft främjar bortförandet av kax (Jeanloz & Stone 2013). Ledande på marknaden är vidare DTH, sänkhammarborrning där, vilket namnet antyder, kraftöverföringen sker i hålet så energiförluster minimeras (Driconeq u.å.-a). Företag i Australien, Korea och Tyskland håller i dagsläget på att utveckla kostnadseffektiv teknik och D&B Hanjin i Sydkorea har för tillfället en kombinerad vatten- och tryckluft-driven hammare för större djup under utveckling (pers. kom. Erlström).

Borrningar som görs för EGS-reservoaren skall i

Slagteknik		Rotationsteknik	
Grävande Direkt tryck		Augering (större borrh)	
Kabelverktyg	Rotation	Tricone Bit Coring bit PDC	
Rotations-slagteknik (konsoliderade formationer)			
DTH (<i>Down The Hole Hammer</i>) HH (<i>Head Hammer</i>) HHD (<i>Hydraulic Hammer Drilling</i>)			
Nya tekniker: Sonic, HDD (<i>Horizontal Directional Drilling</i>)			

Fig. 7. Borrtekniker och metoder

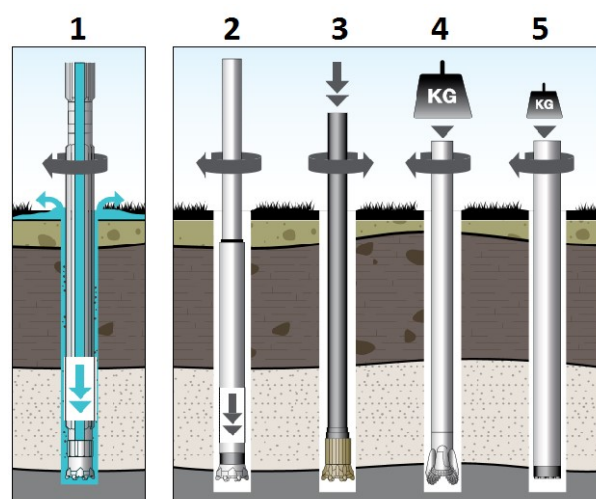


Fig. 8. 1=Vattendriven DTH, 2=Luftdriven DTH, 3=Topphammare, 4=Roterande borrning 5=Kärnborrning. Lägg märke till att matarkraften utgår från markyta för både 3,4 och 5. Notera även skillnader i erforderad kraftstorlek, där rotationsborrning, och även kärnborrning är speciellt utmärkande. Bild från Wassara (u.å)

regel följa SGU:s Normbrunn -16 och samtliga borrningar sker vanligen i två steg, där foderrörsdrivning ner till berggrund utgör det första steget (SGU 2016). I det inledande skedet borrar mikroborrhål med syfte att utvärdera områdets potential (Jeanloz & Stone 2013). Mikroborrhålen har vanligen en diameter mellan 2"-2,5" (5,1-6,4cm). Djupen för borrhålen beror till största del av tänkt reservoardjup (Jeanloz & Stone 2013; Inches to centimeters converter u.å.). Förslagsvis kan dessa borrningar utföras med CTD (spiralborrning) vilken maximalt borrar till ett djup av 450 m (Jeanloz & Stone 2013).

Enligt Jeanloz & Stone (2013) bör måldjupet för EGS mikrohål ligga kring 1500 m, detta för att möjliggöra vertikal seismisk profilering ner till 6000 m (Jeanloz & Stone 2013). För dessa större djup rekommenderas rotations-, hammar- eller DTH-borrning, (Geotrained 2011, Wassara u.å.). Om undersökningar fortskrider används mikroborrhålen för geofysisk borrhålsmätning. Krävs mer detaljerade undersökningar kan de geofysiska mätmetoderna kompletteras med kärnbörning (Sturyd u.å.). Kärnbörningar är förhållandevis kostsamma och utförs genom rotationsbörning med en ringformad borkrona som ger cylindriska borkärnor, längd tre meter och en diameter mellan 4,6–8,6 cm, detta till ett maximalt djup av 1500 m (Styruud u.å.; Styruud 2017). De djupare borrhålen innefattar reservoars injektions- och produktionsbrunnar/brunnar, vilka kräver en diameter på minimalt 6"-7" (15,2-17,8cm), något som storleksmässigt kan jämföras med maximala standardmått för energibrunnar för bergvärme (Jeanloz & Stone 2013; Geotec u.å.; Inches to centimeters converter u.å.). Den minimala diametern innebär dock ett ökat tryckfall vid höga flödeshastigheter, något som vidare måste regleras med stora motorer vid en EGS-anläggning (MIT 2006). Genom större diameter på borrhålen kan tryckfallet sänkas och man arbetar därför aktivt med att kostnadseffektivisera borrhålen med större diameter (MIT 2006). Enligt Erlström tros man inom kort kunna borra 5000 m djupa hål med 20" (51cm) diameter (pers. kom. Erlström). Wassara har en vattendriven DTH som idag kan möjliggöra borrhålsdiametrar mellan 60 och 254mm, men även här fortgår utvecklingen (Fig.9) (Wassara u.å.).

EGS-borrhålen har kunnat hämta en stor del teknisk kunskap från olje- och gasindustrin med dess långa erfarenhet inom borrhålen (MIT 2006). Tekniken har dock varit bristfällig i avseende att hantera kombinationen kristallin berggrund och borrhålen av stora hål och därför krävs vidareutveckling (MIT 2006). För rotationsbörning har tagits fram en rullande krossande teknik som är applicerbar i hårdare berggrund vid stora djup (Driconeq u.å.-b). Teknikens funktionalitet vittnar de två djupborrningarna på 6681, respektive 7500 m vid Siljanringen om (Juhlin 1991). Rotationsteknikens borrhålsdjup är betydligt långsammare i kristallin än sedimentär berggrund vilket lett till att den vanligen appliceras på mjukare berggrund (pers. kom Erlström; Uralmash 2017).

Teknikutvecklingen fokuserar även på att förlänga livslängden av bl.a. borkronorna genom materialutveckling och förbättring. Idag utgör PDC, (Polycrystalline Diamond Compact), det mest brukade

material för borkronor. PDC introducerades inom geotermin för 30 år sedan, men även utveckling av nya material såsom den monokristallina konstgjorda diamanten CVD, (Chemical Vapor Deposition), tros bli aktuell för djupborrning (Qi et al. 2009; Jeanloz & Stone 2013). Vid flertalet djupborrningar i kristallin berggrund används idag vatten- eller tryckluftdriven DTH-börning (Geotrained 2011; Wassara u.å.). DTH kan använda sig av direkt eller omvänd cirkulation, för vilka båda två lämpar sig väl i vattenförande

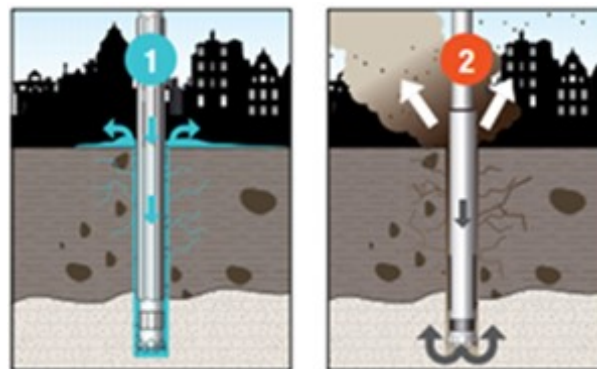


Fig. 9. Vattendriven hammare från Wassara (1) och luftdriven hammare (2). Bild från Wassara (u.å.)

formationer. Ett direktcirkulerande system passar optimalt för hård kristallin berggrund, dock begränsas borkdiameter till <30 cm (Geotrained 2011). Vid den omvända cirkulationen kan större diameter användas, dock lämpar sig tekniken bättre för mjukare berggrund (Geotrained 2011).

Börning har även en miljöpåverkande aspekt. Både hammarbörning och rotationsbörning kräver borrhålsvätska. Vätskan fyller en viktigt stabiliserande funktion, samtidigt som den smörjer borkronan och transporterar bort borkkax (Alm 2012). För att vätskan ska kunna hålla emot de övertryck som verkar runt hålet densitetsförändrar man den genom tillsättning av bentonit och andra kemikalier (Alm 2012). Svenska LKAB:s dotterbolag Wassaras lanserar idag sin hydrauliskt drivna DTH-hammare som den miljövänligaste borkmetoden i sitt slag, detta då inget smörjmedel krävs samt att vattnet binder det damm som skapas (Wassara u.å.).

Enligt MIT (2006) utgör borkkostnader inte sällan över 60% av den totala kostnaden för anläggande av låggradiga termala reservoarer och EGS-reservoarer (MIT 2006). Jeanloz & Stone (2013) menar att kostnaden ökar nästan exponentiellt med djup och, baserat på den större diameter som injektions- och produktionsbrunnarna kräver är kostnaden initialt redan betydligt högre än vid andra djupborrningar (Tabell 1.) (Jeanloz & Stone 2013)

Tabell 1. Borrkostnader enligt Wellcost Lite modellen. Samtliga borrhningar har gjorts med rotationsteknik. Berggrunden utgörs av granit och borrhdiametern 10 5/8" (27 cm). (Inches to centimeters converter u.å.) Tabell från MIT (2006)

Shallow			Mid Range			Deep		
Depth, m (ft)	No. of Casing Strings	Cost, million \$	Depth, m (ft)	No. of Casing Strings	Cost, million \$	Depth, m (ft)	No. of Casing Strings	Cost, million \$
1,500 (4,900)	4	2.3	4,000 (13,100)	4	5.2	6,000 (19,700)	5	9.7
2,500 (8,200)	4	3.4	5,000 (16,400)	4	7.0	6,000 (19,700)	6	12.3
3,000 (9,800)	4	4.0	5,000 (16,400)	5	8.3	7,500 (24,600)	6	14.4
						10,000 (32,800)	6	20.0

3.4 Referensprojekt

3.4.1 Soultz-sous-Forêts, Frankrike

Under mitten av 1980-talet skapade Fenton Hill-projektet i New Mexiko, USA, intresse kring HDR och HWR (Hot Wet Rock)-tekniken runt om i Europa (MIT 2006; Breede et al. 2013). Ett resultat av detta blev pilotprojektet på Pechelbrons f.d. oljefält vid Soultz-sous-Forêts, Frankrike (MIT 2006). Projektet kom att ansluta flera länder, samt en EU-kommission i syfte att utvärdera och jämföra de, vid denna tidpunkt, tre stora geotermala projekten i Europa; Rosemanowes Quarry i England, Bad Urach i Tyskland samt Soultz-sous-Forêts (MIT 2006).

Soultz-reservoaren är belagd i den tertiära riftzonen Rhine Graben i nordöstra Frankrike, vilket kommit att resultera i en förhöjd geotermisk gradient i ett område på 150*20 km (Wallrot et al. 1996; Dezayes et al. 2005). Reservoaren bedöms, beroende av litteratur, som HWR/HDR bestående av granit, i vilken en horststruktur förts upp mot ytan och överlagrats av 1400 m mesozoiska och tertiära sediment, sediment som tros utgöra en värmeisolerande effekt (Wallrot et al. 1996; Dezayes et al. 2005; Stober et al. 2011; Breede et al. 2013). Berggrunden kunde tidigt konstateras partiellt uppsprucken, något som senare kunnat påvisas ner till ett djup av 3000 m (Dezayes et al. 2005). Under projektets första tid, innan provanläggningen togs i drift år 2008, utfördes flertalet tester, främst beträffande olika stimuleringsteknik och proppants, något som lett till att Soultz-projektet kommit att betraktas som en milstolpe inom EGS-utvecklingen (Dezayes et al. 2005; Rose et al. 2006; Stober et al. 2011).

Reservoaren uppmäter en temperatur på 165°C och

den stimulerade bergsmassan innefattas idag av nio stycken borrhål, där centrerat injektionshål, GPK3 (5093 m) samt dess två pumpbrunnar, GPK2 (5000 m) och GPK4 (5150 m), borrhade med rotationsborrning, utgår från samma ursprungshål (Baria et al. 2006; MIT 2006; pers. kom Erlström). Reservoaren har konstruerats genom frackingstimulering och dess horisontella utbredning på djup uppgår till 1250 m (MIT 2006). Skapandet av den djupa reservoaren påbörjades år 2000 och problem uppstod då man, vid borrhningen av det tredje djupa borrhålet, GPK4, bl.a fick rikningsavvikelse och låg penetrationshastighet (Baria et al. 2006; MIT 2006). Under år 2003 och år 2004 stimulerades borrhål GPK4 med tung saltlösning, något som visat sig främja djupare berggrunds-uppsprickning (MIT 2006). Borrhålet injekterades även med syra för att minska den seismiska aktivitet, som vid injektioner tidigare hade uppgått till över två på richterskalan (Dezayes et al.; 2005; Breede et al. 2013). Koppling mellan syrainjektioner och minskad seismisk aktivitet tros bero av att syra löser karbonater och öppnar på så sätt varligt upp igensatta sprickor, syrainjektioner bör dock ske långsamt för att effekten inte ska bli den motsatta (Khilyuk et al. 2000). Utmaningen har utgjorts av den asymmetriska zonen som skiljde GPK4 från reservoaren. Zonen kunde påvisas genom mikroseismisk och hydraulisk data och förhindrade länge en hydrauliskt tillfredställande kommunikation (Dezayes 2005 et al.; Baria et al. 2006). Zonen har även resulterat i stora vattenförluster (Dezayes 2005 et al.; Baria et al. 2006) Triplettens stod färdig år 2005 och idag har det bedrivits energiproduktion i snart tio år i, vad som blivit, Frankrikes första binära geotermianläggningen

(Dezayes et al. 2005). Anläggningens kapacitet uppgick till 1,5 Mw(e) netto år 2011 (Stober et al. 2011; Breede et al 2013)

3.4.2 Pohang, Korea

Sydkorea har ingen vulkaniskt eller tektoniskt aktiv berggrund som genererar höga temperaturer, däremot förekommer varma källor i landet, vilka länge använts för uppvärmning av bl.a. bostäder (Kim & Lee 2007; International Energy Association 2015). Landets intresse för geotermal energiutvinning väcktes med det japanska samarbetet i organisationen *Colombo Plan* år 1969 och kartläggning av regionala värmeflöden i har härefter gjorts (Kim & Lee 2007). Enligt uppgifter presenterade på *World Geothermal Congress 2015* investerade landet över 500 miljoner US\$ under åren 2010-2014 i geotermala installationer och ligger därmed i topp-fem över länder med den snabbaste procentuella ökningen av geotermal installerad kapacitet (Lund & Boyd 2016).

År 2010 påbörjade den sydkoreanska regeringen ett femårigt pilot-projekt för uppförandet av en EGS-reservoar för binär kraftverksproduktion belagd i Pohang, sydöstra Sydkorea (Song et al. 2015). Målet var att uppnå en produktionstemperatur på 180°C från ett reservoardjup på 4,5-5 km (Song et al. 2015). Områdets geologi utgörs av permisk granodiorit med granitintrusioner, överlagrat av 2200-2400 m sedimentär berggrund från krita, bestående av sand- och lersten samt vulkaniskt avsatta sediment på vilka 200 m mäktiga tertiära marina sediment vilar (Song et al. 2015). Den geotermiska medelgradienten uppgår i Sydkorea till 25,1°C /km (Kim & Lee 2007). Området i Pohang uppvisar en förhöjd gradient på cirka 10-15°C/km och överliggande tertiära lagerna uppvisar i tillägg låg termal konduktivitet (Kim & Lee 2007). Projektets genomförbarhet undersöktes under 2000-talet och två pilothål borrades år 2003; BH-1, med kärnborrning till ett djup av 1100 m och BH-2 med rotationsborrning till ett djup av 1500m (Song et al. 2015). Pumpstest utfördes under vilket produktionsvattnets temperatur höll 51°C och flödes hastigheten uppgick till 560 m³/dag, samt indikerades det, med hjälp av MT-data, (*magnetotellurisk data*) en två km vetikal utbredning av områdets befintliga sprick-systemet (Song et al. 2015). Utifrån denna kunskap borrades år 2006 undersökningshål BH-4, till ett djup av 2383 m (Song et al. 2015). Borrtekniken som användes utgjordes av en kombinerad luft/vattendriven teknik, som är speciellt effektiv när man vill få en naturlig uppströmning av borrhaxet (pers. kom. Mikael).

Borrhål BH-4 kollapsade härefter delvis och flera

permeabla zoner, stora temperaturskillnader och betydligt läckage upptäcktes, problem som främst relaterats till bristande erfarenhet (Song et al. 2015). Liknande situationer uppstod under borrningen av första reservoarhålet PX-1, varpå borrningen avbröts vid ett djup av 4127 m, detta efter en utdragen borrh-process där borrh diameter stegvis minskats med djup, från 17,5" (44,45 cm) vid markyta till 8 ½" (21,59 cm) vid maxdjup (Song et al. 2015; Inches to centimeters converter u.å.).

Hydraulisk stimulering, bedömning samt vidare utformning av reservoaren planlades till år 2014 (Song et al. 2015). Projektet övertogs år 2015 av kinesiska Landocean Energy Services som planerar driftstart år 2017/2018, med en förväntad produktionskapacitet på 1,2 MW, en produktion, som enligt Song et al. (2015) tidigare uppskattats till 5-10 MW år 2020 (Song et al. 2015; Rojas 2015a; Richter 2017). Projektet bedömdes tidigt ha bristande förutsättningar då uppgifter om områdets stressriktning och djupare sprickförekomst inte fanns att tillgå (Song et al. 2015). Rådande brist på praktisk erfarenhet och teknisk kunskap kring djupborrning konstaterades tidigt och resulterade i att man ofta utelämnades till egna bedömningar och begränsad internationell expertis (Song et al. 2015.). Möjligen är den bristande erfarenheten främsta orsaken till att projektet slutligen överlämnas till Landocean Energy Services. Vidare nämner Song et al. (2015) projektets snäva budget som en begränsande faktor.

3.4.3 Espoo, Finland

EGS-pilotprojektet för fjärrvärmeutvinning ligger i Espoo, i finska Otaniemi nordväst om Helsingfors (St1 u.å.-c). Området tillhör, liksom stora delar av östra Sverige, den Svekofenniska delprovinsen (Fig. 10). Sydligaste delen av Finland, Uusimaa bältet, är ett område som domineras av sedimentär paleoprotozoisk berggrund (Rämö et al. 2005). Kring Helsingfors och Espoo utgörs geologin främst av granitoider och mafiska till intermediära metavulkaniska avlagringar (Rämö et al. 2005). Intrusioner är kartlagda väster om området och seismiska undersökningar lokaliserar *Fennia*, en av Fennoskandiska sköldens större sprick-zoner väster om Espoo (Rämö et al. 2005).

Projektet som drivs av finska energibolagen St1 och Fortum beräknades, vid inledande borrhundersökningar år 2015, ha anläggningen färdig för kommersiell produktion år 2017 (Rojas 2015b; St1 u.å.-b). Reservoaren kommer utgöras av en produktions- och en injektionsbrunn belägna på 7000 meters djup i den finska graniten, där man förväntas uppnå en maximal reservoartemperatur på 120°C (St1 u.å.-a).



Fig. 10. Östra Sveriges och södra Finlands proterozoiska berggrund. Bild modifierad från SGU (u.å.-b)

Anläggningen kommer anslutas till fjärrvärmesystemet och förmodas förse 10% av staden Espoos 275 000 invånare med värme, motsvarande 40 MW (Statistics Finland 2017; St1 u.å.-b). Borrningen (Fig 11) som



Fig. 11. Borrningen som använts i Espoo, Finland. Foto Rosberg (u.å.)

används för projektet är 50 m hög och har tryckkapacitet på över 400 ton (St1 u.å.-c). Totalt beräknas 50 personer arbeta med projektet, varav fem personer i ett skift med borrningen (St1 u.å. -c). Enligt Tero Saarno, produktionschef på ST1, kommer det vid borrningarna användas luftdriven och vattendriven DTH-borrteknik vars ROP (*Rate of penetration*) hitintills uppgått till 13m/h för den luftdrivna, och 10m/h för den vattendriven tekniken (pers. kom. 24 april, 2017). De marknära borrhålen planeras uppgå till 100 cm i diameter och 20 cm på de största djupen (St1 u.å.-c). Anläggningsarbetet inkluderar borrning av första hålet, stimulering av berggrund för att bestämma det andra hålets position samt borrning av detta, en process som beräknades ta sex månader (ST1 u.å.-c). För tillfället ligger projektet nere då man, för rensning av borrhålet behöver ny utrustning till den vattendrivna DTH-tekniken (pers. kom. Tero Saaron 24 april, 2017). Borrhålet är idag 4350 meter djupt (pers. kom. Erlström). Projektet överensstämmer med finska regeringens riktlinjer att öka användandet av förnybar energi för att nå målet om koldioxidneutralitet år 2030 (Finnish Government 2016; St1 u.å.-c).

3.4.4. Newberry-USA

Pilotprojektet är beläget utanför *Newberry National Volcanic Monument*, ett skyddat naturområde i centrala Oregon, öster om Kaskadbergen i USA. Området har tidigare varit vulkaniskt aktivt och projektområdet ligger på en sköldvulkan, (Fig. 12). I närheten ligger heta källor med en temperatur som uppgår till 62°C (Bargar & Keith 1999). Berggrunden i området är vulkanisk och ökar i mafiskhet med djup, från rhyodacite vid 501 meters djup, till basalt vid 932 meters djup (Keith & Bargar 1988). Temperaturen i berggrunden uppgår till 100°C vid 696 meters djup, vidare till 265°C vid 930 m (Keith & Bargar 1988). Baserat på U.S. Geological Survey kärnbörning till 932 meter tros sprickförekomsten vara begränsad och inga interagerande vattenförande sprickor har kunnat påvisas (Keith & Bargar 1988). I hopp om att finna termalt vatten för elproduktion utfördes år 2008 två stycken borrningar till ett djup av tre kilometer (AltaRock 2014). Då hade redan 20 stycken undersökningshål, mellan åren 1976-1986, utförts men undersökningen hade lagts på is till följd av att *Newberry National Volcanic Monument*, ett miljöskyddsområde, år 1990 inrättades (Bargar & Keith 1999). Börningarna från år 2008 uppvisade en berggrundstemperatur på 315°C, men berggrunden visade sig vara impermeabel och därmed icke vattenförande (AltaRock 2014). Man undersökte nu

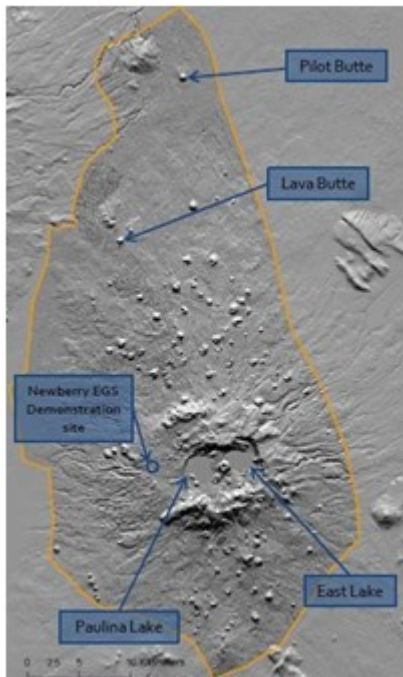


Fig. 12. Karta skapad med hjälp av data från LiDAR (Light Detection and Ranging) för att tolka strukturer på Newberrys EGS-område. Bild från Alrarock Energy (2014)

möjligheterna för EGS och med sponsring av amerikanska energimyndigheten DOE (*Department of Energy*) antogs år 2010 AltaRock Energies att genomföra projektet, med utgångspunkt i ett av de hål som borrats år 2008 utanför skyddsområdet (Bargar & Keith 1999; AltaRock 2014). Projektet kom senare att sponsras av bl.a. två universitet och U.S geological survey (AltaRock 2014). Undersökning och förberedelser fortgick under tre års tid, då bl.a. 15 seismiska mätstationer installerades, åtta stycken i borrhål och sju stycken marknära (Fig. 13). År 2014 var samtliga borrhålsundersökningar utförda samt hade restaurering av borrhål NWG 55-29 genomförts och en första stimuleringen av berggrunden med TZIM (*Thermally-degradable Zonal Isolation Materials*)



Fig. 13. Seismometern används för mikroseismisk övervakning i borrhålet under stimulationsfasen. Foto från (AltaRock 2014)

utfördes. Projektet kom härifrån att fokuseras kring skapandet av reservoaren, vilken man hoppas skall utgöras av tre artificiellt skapade sprickzoner. Enligt AltaRock (2014) kommer diverse testmetoder samt stimulerings och divertertekniker prövas, för större multipla, såväl som enskilda zoner (AltaRock 2014). Förhoppningen är att man vid dessa exceptionellt goda geologiska förhållanden, skall uppnå en energi-produktion motsvarande 35.000 bostäders elbehov (cirka 35 MW), och detta under flera årtionden (AltaRock 2014). Den binära kraftanläggningen är tänkt att använda den senaste teknikens luftkylda system, något som skulle bespara anläggningen kostnader, men även de miljörisker som hantering av kylvätskor kan innebära (AltaRock Energy 2014; Ramachandran et al. 2017).

Total kostnad för Newberrys demonstrationsprojekt uppskattas till 44 miljoner USD, en jämförelsevis låg kostnad enligt *US Department of Energy* som med projektet ser en tydlig utveckling mot mer kostnads-effektiva EGS-projekt (U.S DOE u.å.-b). Denna kostnadsreduktion kan enligt MIT (2006) delvis bero av att hydrotermalt påverkad granit är lättare att borra i än icke påverkad (MIT 2006).

4 Kritiska geologiska parametrar och insamling av data

Det mest problematiska med att bedöma förutsättningarna för EGS är att empiriskt kunna säkerställa djupberggrundens egenskaper. Eftersom det finns få djupa hål och de dessutom inte alltid svarar mot den information man söker, är det viktigt att samla in data från ytligare hål. Denna data kan användas för att bygga upp modeller som predikterar även djupare förhållande. För att på bästa sätt kunna utveckla dessa modeller skulle ett antal djupare hål, möjligen motsvarande halva reservoardjupet, borraras för geofysiska mätningar. Dessa djupare värden för temperatur, bergartsspänningar etc, skulle bättre kunna prediktera egenskaper för reservoarens djupaste belägna berggrund med betydligt större tillförlitlighet. Härfter följer en beskrivning av de mest betydande geologiska egenskaperna:

4.1 Strukturella berggrundsförhållanden

Information om berggrundens strukturella förhållande krävs ner till den tänkta reservoarens måldjup. Strukturella förhållande bestäms genom geologisk karteringen; fältstudier, tidigare gjorda undersökningar, tolkning av flyg- och satellitbilder samt applicering av geofysiska mätmetoder (Wallrot 1994). SGU (*Sveriges Geologiska Undersökningar*) tillhanda-

håller berggrundskartor, en stor mängd analyserad data, detaljerad bergartsinformation i den s.k. häll databasen samt information om berggrundens övertyta i brunnsarkivet under jorddjup (SGU 2016). I syfte att kostnadseffektivt erhålla information om ytligare markförhållande är val av geofysisk mätmetod av stor vikt. Jordlagrets mäktighet är aktuell bl.a. med avseende dess termiska konduktivitet (K) samt, ur ett ekonomiskt perspektiv då foderrörsdrivning vid borrningen vanligen sker en bit ner i det kristallina berget (MIT 2006; SGU 2016). Den i särklass mest använda metod för kartläggning av urbergsytan är reflektionsseismik, med en undersökningsradie som maximalt uppgår på fem-sex kilometer (MIT 2006). Vid djupa berggrundsundersökningar kan borrhålsundersökningshål användas för att hänga ner seismisk utrustning i, s.k. borrhålstomografi. Genom noga planering av djup, placering samt vinkling av dessa borrhålen kan värdefull seismisk data erhållas (pers. kom. Erlström).

Genom geofysiska borrhålsmätningar i undersökningshål kan ytterligare information om de strukturella förhållandena fås. Berggrundsförhållanden kartläggs vidare genom kärnbörning, enligt rekommendationer från Massachusetts Institute of Technology, gärna med 100 meters intervall genom hela borrhålet där sprickor är förväntade (MIT 2006). Från borrhålen kan prover tas för laboratorieanalys av berggrundens egenskaper så som porositet, kompressions-, drag- och skjuvstyrkor, men även information om formationens struktur t.ex. sprick- och förkastningsmönster kan erhållas (MIT 2006). I oregelbunden och veckad berggrund försvåras konstruering av reservoar betydligt, detta är en av anledningarna varför man föredrar stora granitkroppar med mer homogen sprickbildning framför gnejs (Wallrot 1994; MIT 2006).

4.2 Bergspänningsförhållanden

Information i detta stycke är hämtad från Fossens *Structural Geology* (Fossen 2010). För både skjuvning och effektiv uppspräckning av berggrunden krävs fundamental kunskap om spänningsförhållanden i berget. Spänningsförhållandena utgör därmed ett avgörande underlag för den hydrauliska stimuleringens utformning och placering av injektions- och produktionshål. Varje spänningssituation i marken har tre principiella kompressiva spänningsaxlar orienterade 90° mot varandra, med kompressionen minskad i ordningen σ_3 , σ_2 , σ_1 och där skjuvspänningen (σ_s) är 0. Alla andra riktningar påverkas av både normalspänning (σ_N) och skjuvspänning. Plan där

maximal skjuvspänning råder ligger alltid parallellt med σ_2 , 45° mot σ_3 och σ_1 . I linje med planet för maximal skjuvspänning korsas två set av skjuvsprickor. Den spetsiga vinkeln mellan dessa set utgör den konjugata skjuvvinkeln. Vinkelns storlek är, beroende av material, $40-80^\circ$ och det är här skjuvsprickor kan skapas (Fig. 14). Vid hydrosheraring ökas porvattentrycket i riktning med det maximala skjuvspänningsplanet. Genom materialbaserade beräkningar kan sedan uppskattning av den konjugata skjuvvinkeln göras, och därmed kan förskjutning i sprickor med mest fördelaktig orientering utföras för att utforma reservoaren.

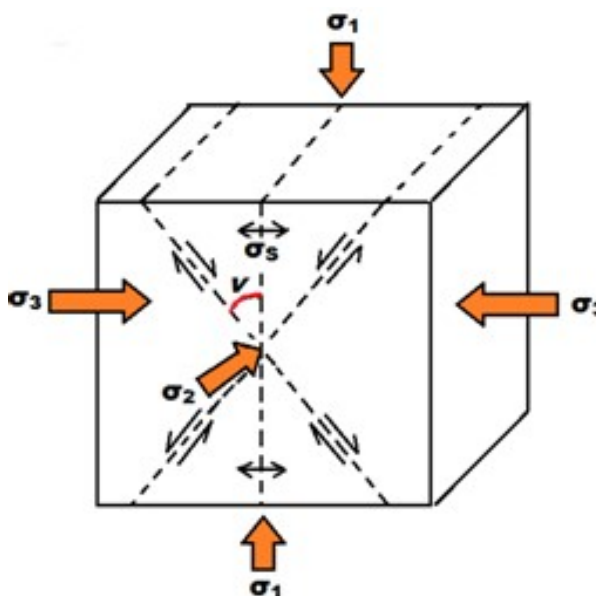


Fig. 14. Spänningsförhållande i berg där σ_3 , σ_2 , σ_1 utgör kompressiva spänningar, σ_s är skjuvspänning och ν utgör den konjugata skjuvvinkeln.

Spänningssituationer kan illustreras i MOHR-cirkeln, samt kan rosdiagram användas för att illustrera sprickorienteringarnas frekvens, dock inte stupning (Fossen 2010). Naturligt hög sprickförekomst kan relateras till områden kring intrusioner, skjuvzoner, samt i område påverkade av inlandsis som resulterat i s.k. bankningsplan (avlastningssprickor). Osäkerhet råder dock fortfarande kring naturliga stressförhållande även inom välkända formationer, något som till stor del kan förklaras med att de fracking-metoder som använts inom gas- och oljeindustrin skiljer sig väsentligt från hydroshearing (MIT 2006). Mätning av bergsspänning kan göras in-situ, genom hydraulisk uppspräckning, samt i i laboratorium på upptagna kärnor från de aktuella djupen (Alm 2012). Laboriemätningar utförs bl.a med ASR (Anelastic Strain Recovery), där oelastiska töjningar mäts, DSA (Differential Strain Analysis) där hydrostatisk tryck

används för att bestämma spänningarnas storlek och riktning, samt metoder där sambandet mellan akustisk emission och spänning utnyttjas enligt den s.k. kaisereffekten (Wallrot 1994).

4.3 Bergartsfördelning

Enligt Massachusetts Institute of Technology kan man var som helst i världen, så länge kraven på temperatur- och permeabilitet kan uppnås, skapa en EGS-reservoar (MIT 2006). Enligt Potter et al. (1974) är granit och annan kristallin berggrund den mest fördelaktiga att anlägga en EGS-reservoar i (Potter et al. 1974).

Oavsett bergart förutsätts kunskap om bergartens fysiska egenskaper samt metoder för att kartlägga egenskaperna. Värmeledande förmåga, som tillsammans med berggrundstemperatur avgör borrhåldjup, beror av bergets fysiska egenskaper och mineral-sammansättning (SGU 2016). Det blir därmed avgörande att i ett tidigt skede bestämma bergart/bergarter samt dess homogenitet (pers. kom. Erlstöm). För att erhålla mindre kärnor, s.k. *sidewall carvings*, finns geofysisk speciallogg för provtagning i borrhål (Alm 2012). Tunnslip kan skapas från borrhåll som genom modalanalys ger information om mineral-sammansättning (SGU 2016).

Utförda analysresultat lagras i SGU:s databas och tillhandahålls allmänheten (SGU 2016). Bergarters fysiska egenskaper kan variera betydligt och man behöver därför uppskatta den tänkta reservoars samtliga bergarter och utbredning för att få information om termiska egenskaper, hållfasthet, densitet, samt foliation (textuell uppbyggnad) (pers. kom. Erlström). Bergartsfördelning utgör en viktig del i borrhållsprogrammet, som indikator för borrhållsdjup, men även för riskbedömning av borrhållstekniska problem.

4.4 Termiska egenskaper

Termiska egenskaper som temperatur och temperaturgradient bestämmer en EGS-anläggnings effektiva produktion och utgör därmed underlag för bedömning av borrhållsdjup (Jeanloz & Stone 2013). I Sverige varierar den geotermiska gradienten mellan cirka 30°C/km i söder till 15–20 °C/km i norr men påverkar inte de översta 15-20 meterna där rådande årstid istället spelar en stor roll (Fig. 15) (SGU 2016).

Geotermisk gradient beräknas vanligen genom geofysiskt borrhållsmätning av temperatur (Alm 2012). I Sverige, och annan glaciärpåverkad berggrund, kräver temperaturmätning i borrhål ett djup >300 m för att inte påverkas av paleoklimat i form av köldpulser relaterade till istid (pers. kom. Erlström). Korrelering

för köldpulser finns dock att tillgå (Wallrot 1994). Förhöjd geotermisk gradient, med några grader Celsius, kan uppvisas i berggrund med högt radioaktivt sönderfall, såsom pegmatiter och yngre graniter med förhöjda halter av främst kalium, uran samt torium (MIT 2006; SGU 2016). Temperatur kan även beräknas för olika djup baserat på värden tagna från loggar på termisk konduktivitet, värmeflöden, lagermaktighet samt radioaktivt genererad värme. Höga temperaturer och höga värmeflöden i kombination med en omsluteande berggrund med låg termisk konduktivitet utgör goda förutsättningar för EGS (MIT 2006).

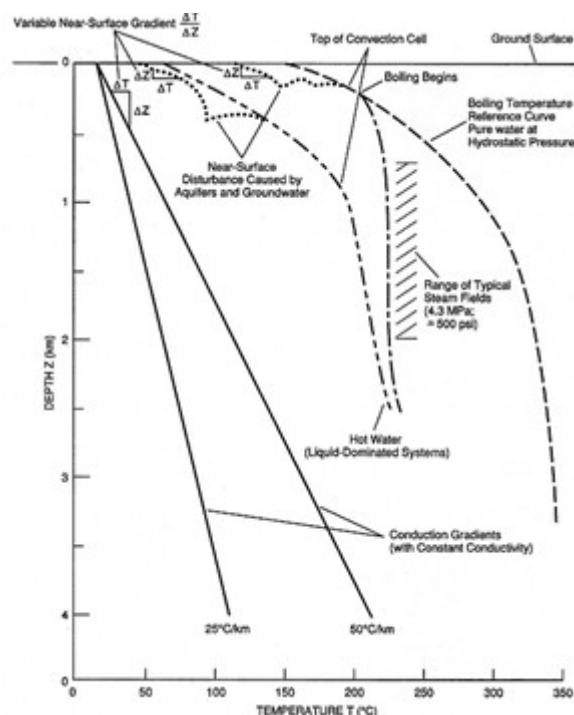


Fig.15. Geotermal gradient. Modifierad från Wohletz & Heiken (1992)

4.5 Sprickfördelning

Utgör ett första underlag för reservoars utformning och avgör vilken stimuleringsteknik som bör tillämpas. Naturliga sprickor uppmäter vanligen en längd mellan 1-10 m och förekomsten minskar vanligen efter några 100 meters djup (MIT 2006). Förekomst av ett befintligt spricksystem är en förutsättning vid hydraulisk skjuvning, medan den vid fracking skapas under den hydrauliska stimuleringsprocessen (MIT 2006). Sprickfördelning tolkas främst utifrån data erhållen från seismiska undersökningar, vilka kan ge information om skjuvade sprickors storlek och orientering samt ny sprickbildning (MIT 2006). För spricklokalisering kan geofysisk mätning med Caliper (Fig. 16) göras, för sprickorientering kan de kompletterande geofysiska specialloggarna akustisk

och elektronisk televiewer användas (MIT 2006; Alm 2012). Vanligen undviks anläggande av EGS-reservoarer i förkastnings- och större sprickzoner då spricksystemets oregelbundenhet kan lämna utrymme för minskad kontroll och vattenläckage, något som Soultz-projektet vittnar om (Wallrot 1994; MIT 2006). Dessa större befintliga spricksystem kan i framtiden, med bättre metoder för uppskattning av sprickornas densitet, distribution och orientering, utgöra en betydande resurs som självständig eller integrerad del av reservoaren (Wallrot 1994; MIT 2006).



Fig. 16. Multiarmad Caliper för spricklokalisering och undersökning av foderrör. Foto från Altarock Energy (2014)

4.6 Hydrauliska egenskaper

Hydrauliska egenskaper innefattar permeabilitet samt kemisk sammansättning av formationsvätska och gas. De hydrauliska egenskaperna utgör underlag för de modelleringar som utreder bergmassans egenskaper. HDR-konceptet innebär inte att reservoaren saknar vattenresurser, snarare att de är otillräckliga i sig själva för skapandet av EGS-reservoaren (Potter et al. 1974).

Bergets ursprungliga formationsvätska och gas bör provtas i borrhålen, inte minst då kemisk analys ofta speglar berggrundens kemi, som, om denna inte är i balans med den främmande reservoarvätskan, kan skada reservoaren (MIT 2006). I vilken utsträckning detta sker är svårt att uppskatta utifrån dagens bristande erfarenhet, men indikationer på att naturlig formationsvätska genererar färre oförutsedda kemiska problem finns (MIT 2006). Många tester bygger på att generera transienta flödesförhållande genom att modifiera produktions- eller injektionsflöde (Wallroth 1994). Från dessa tester kan kunskap erhållas om permeabilitet, transmissibilitet, magasinskoefficient och skinfaktor (Wallrot 1994). Genom att utföra tester på olika djup i borrhålet kan man vidare erhålla en, både storskalig och områdesbegränsad, uppskattning av berggrundens permeabilitet och transmissivitet

(Wallrot 1994). Då man av erfarenhet vet att reservoarens kemiska, hydrauliska, termiska samt mekaniska egenskaper förändras med tiden är det av stor vikt att utföra och följa upp testerna kontinuerligt (Wallroth 1994). Det hydrauliska underlaget krävs också för kemiska modelleringar som utreder korrosion och utfällningar. Utfällning av kalciumkarbonat på rör och markutrustning är ett vanligt förekommande problem som länge reglerats genom tillsättning av små mängder polymaleinsyra i reservoarvätskan (MIT 2006). Kiselutfällningar har mest effektivt hanterats genom sänkning av pH-värde, något som i sin tur skapat korrosion (MIT 2006). Det har skapats en kommersiell marknad kring olika kemiska lösningar, idag med större fokus på miljövänliga alternativ (Bomgardner 2015).

4.7 Seismisk bakgrundsdata

Genom EGS-projektets hela anläggningsarbete har seismiska undersökningar och tolkning av seismisk data en betydande plats. Baserat på händelser såsom projektet i Basel, Schweiz, som år 2009 stängdes ner efter flertalet MEQ (*Microearthquakes*) med magnitud upp till 3,4 på Richterskalan, har de seismiska riskerna uppmärksamats både av allmänhet och myndigheter, vilket i USA lett till förändrade regelverk (U.S DOE 2012a; Breede et al. 2013; Norbeck 2016). Enligt Majer & Peterson (2007) kan stimuleringsinjektionerna, även då baserade på erfarenhet och kunskap, inte förhindra den seismiska aktivitet, dock kan aktiviteten förutbestämmas och då även till storlek (Majer & Peterson 2007). Den seismiska aktiviteten mäts vanligen från markyta och i borrhål (MIT 2006).

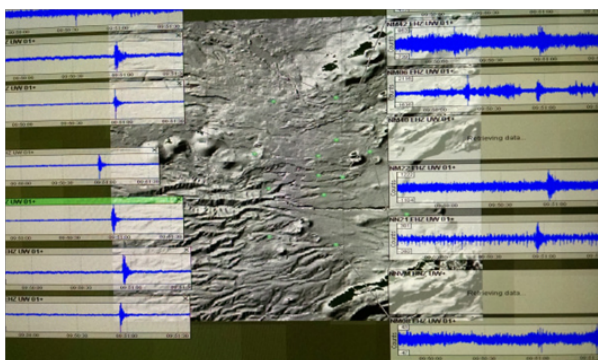


Fig. 17. Mikroseismisk aktivitet övervakas i realtid. Foto från Altarock (2014)

4.8 Borrbarhet ("Drillability")

Enligt MIT (2006) utgör borrkostnaden en avsevärd del av projektets totala kostnad, för lågradig EGS beräknas den till 60% eller mer (MIT 2016). Borrbarhet utgör ett väsentligt underlag för borrhål

programmet och beror av bergets egenskaper, maskinutrustningen, diverse driftegenskaper samt berggrundens struktur (Ataei et al. 2015). Genom goda förkunskaper och planering tror man sig kunna effektivisera borrarheten och därmed begränsa kostnaderna väsentligt (MIT 2006; Ataei et al. 2015).

Parametrar kan sammanställas för uppskattning av borrarheten, vanligen uttryckt i borrhastighet ROP (Rate Of Penetration). Sammanställningar kan göras i olika index, varav RDi (Rock Drillability Index) är ett användbart verktyg (Hoseinie et al. 2008). RDi baseras på sex stycken parametrar, där bland kan nämnas kornstorlek och Mohs- hårdhetsskala (Hoseinie et al. 2008). Enligt Chenyani et al. (2012) har studier kring borrarhet länge baserats på äldre metoder och tekniker och kan därför utvecklas väsentligt (Chenyani et al. 2012). Samband har kunnat fastställas mellan RDi och rotationsborrning, detsamma har dock inte kunnat göras mellan RDi och den kombinerade rotations-slagtekniken (Ulusay et al. 2016). Inte heller har bergets duktila egenskaper kunnat användas för uppskattning av borrarheten hos rotations-slagtekniken, något som är möjligt vid rotationsborrning (Ulusay et al. 2016).

Genom utveckling och effektivisering av geofysiska mätmetoder, utförda under eller efter borringar genom MWD (Measure While Drilling), kan information om flera parametrar fås och indexen kan göras både komplexa och specifika (Alm 2012; Ataei et al. 2015). Behjälpliga geofysiska mätmetoder utgörs bl.a. av azimut och inklinationssond för kontroll av riktningsavvikelse (Forsell 2015). År 2012 togs en modell fram för SRMD-index (Specific Rock Mass Drillability) för rotationsborringar (Chenyani et al. 2012). Denna baseras på egenskaper hos bergarten såsom kvartsinnehåll, grad av minerologisk förändring, hårdhet (enlig Schmidts hammer hardness value), UCS (*Uniaxial Compressive Strength*), spickors strykning, samt fragmentsstorlek som, vid sprängning av bergarten kan ge information om dess heterogenitet (Chenyani et al. 2012; Mindat u.å.). Indexet baserades även på operativa parametrar för rotationshammaren såsom hydrauliskt tryck och rotations-hastighet (Chenyani et al. 2012; Mindat u.å.). SRMD- värde har jämförts med värden från linjära och icke linjära multiparametersmodeller och visat sig vara mycket överensstämmande (Chenyani et al. 2012). Även olika RDi har förbättrats genom bl.a inkluderade värde på strukturella bergegenskaper, något som i förlängningen ger mer specifika värde för exempelvis sjunkhastighet (Ataei et al. 2015). Med snabb teknisk utveckling av borrarutrustning och borrar-metoder är det

troligt att borrar-tekniska egenskaper kommer få större betydelse för borrarhet i framtiden och även kunna integreras effektivt i index, detta gäller inte minst för luft- och vattendriven slaghammarteknik.

5 Fysikaliska parametrar

De fysikaliska parametrarna utgörs av geotermisk konduktivitet (värmeledningsförmåga), värmediffusivitet, specifik värmekapacitet, temperatur, värme-flöde och i vissa fall värme-produktion (Erlström et al. 2016).

Den termiska konduktiviteten (λ) anges i W/m och enhet Kelvin. Den uppgår i granit till mellan 2-4,5 W/m*K och för gnejs mellan 1,5-5 W/m*K (Erlström et al. 2016). Den termiska konduktiviteten är specifik och beror av material, densitet, struktur, vatteninnehåll samt porositet (Erlström et al. 2016). Höga värde uppvisar vanligen kvartsrika täta berggrunder såsom kvartsit och sandsten medan lösa sediment samt torra porösa bergarter har lägre värden (Erlström et al. 2016). P.g.a den låga termiska konduktiviteten har mäktiga avlagringar lersten, skiffer, permeabel kalk- och sandsten kommit att uppmärksammas i EGS-sammanhang utifrån den värmeisolerande effekt de har på underliggande berggrund (Boyle 2012). Konduktiviteten kan mätas på bergprov in-situ eller i laboratoriet men även teoretiskt, baserat på provets mineralsammansättning (Sundberg 1988). För information om värmeledande egenskaper i svensk berggrund finns idag 6500 analysresultat samlade hos SGU, majoriteten av dem insamlade under ett projekt på 1980-talet (Sundberg 1985; Erlström et al. 2016).

Värmediffusivitet (K) beskriver berggrundens förändring av temperatur över tid baserat på den geotermala gradienten (Erlström et al. 2016). Värmediffusivitet i berg är relativt låg och temperatur-sänkning i en EGS-reservoaren är därför främst koncentrerad kring injektionshål och spricksystem (MIT 2006). För att minimera denna temperatur-sänkning och öka EGS-systemets livslängd, bör spricksystemet utformas så att dess sprickor inte ligger för nära varandra (Jeanloz & Stone 2013). Värmediffusivitet anges i m^2/s och utifrån förhållandet mellan värmekapaciteten och konduktivitet kan den beräknas (Erlström et al. 2016). I jordens berggrund uppgår värmediffusiviteten till cirka $10^{-6} m^2/s$ ($1mm^2/s$) (MIT 2006).

Den specifika värmekapaciteten (C) definieras genom den värmemängd i temperatur K, som krävs för att höja ett kilo bergmaterial med 1 K (Erlström et al. 2016). Värmekapaciteten beror av densitet och räknas i Joule/kg, enhet Kelvin, vanlig uttryckt i ett

schablonvärde (Erlström et al 2016). Värme-kapaciteten är fyra gånger högre i vatten än granit vilket, i kombination med dess låga termiska konduktivitet, gör vatten till ett mycket effektivt naturligt medium för energitransport i geotermiska anläggningar (Erlström et al. 2016). Den specifika värmekapaciteten kan bestämmas utifrån konduktivitet och diffusivitetvärden genom konventionella TPS instrument (Transient Plane Source) (Berge et al. 2013).

Det geotermiska värmeflödet utgörs av den värmeenergi som genereras från jordens inre (Erlström et al. 2016). Värmeflödet rör sig alltid i riktning från högre till lägre temperaturer i både horisontal och vertikalled (Erlström et al. 2016). Det vertikala värmeflödet fås genom att multiplicera den termiska konduktiviteten med berggrundens temperaturgradient (Wallrot 1994).

I viss berggrund med högt radioaktivt sönderfall utgör värmeproduktion som dessa mineral genererar även en geofysisk parameter (Erlström et al. 2016). Radiometrisk mätning görs genom mark- och flygmätningar, för vilken data finns att tillgå för delar av Sverige på SGU (Erlström et al. 2016). Den fysikaliska parametern temperatur behandlas även i 3. *EGS och 4.4 Termiska egenskaper*

6 Modelleringsverktyg

Modelleringsverktyg är behjälpliga inom EGS-projekt vid utformandet av reservoaren och för kostnadsmodelleringar (MIT 2006). Under projektets inledande fas baseras en stor del av undersökningen på tolkning och modellering av seismisk data, detta även under stimuleringsfasen då utformning av spricksystemet skall bestämmas (MIT 2006). Komplexiteten hos modelleringsprogram varierar och då det färdiga resultatet avhänger av att de värden som sätts in i modellen är tillförlitliga, är sådana av största vikt. Vanligen anses större mängder data bättre kunna validera de framtagna modellerna (MIT 2006). Inte sällan utvecklar företag sina egna modelleringsverktyg och modelleringsprogram (Altarock Energy u.å.; Schlumberger u.å.). Altarock används sig av Altastim, en förfinad variant av den mjukvara företaget använder vid olje- och gasfracking (Altarock Energy u.å.). Med Altastim modelleras seismisk data för storskaliga stimuleringar tillsammans med TZIM-diverters (Altarock Energy u.å.). Företaget Ocean Energy Services använder sig av tre typer av mjukvara varav två stycken, LD-SeisFast och LD-DPseis används för bearbetning av seismisk data, innehållande bl.a. funktioner som att ta bort samstämt brus och

undertrycker lågfrekventa signaler. För simuleringar används numeriska mjukvarupaket i 2D och 3D; SIMO2D och SIMO3D (Landocean Energy Services u.å.) Baker Hughes använder 3D-modelleringsprogrammet JewelSuite för geologisk djupmodellering (Baker Hughes u.å.)

Önskade egenskaper hos modelleringsprogram innefattar bearbetning av stora mängder seismisk data, korrelation av loggdata, strukturell modellering, utförande av domänomvandlingar för tid och djup, interaktion av brunnar, vätske- och gasflöde samt att föreslå fältutvecklingsplaner (Baker Hughes u.å.) Önskvärt är även att modelleringsprogram stödjer MPS (Multi Point Statistics) så att multipla objektsegenskaper kan inkluderas samt att de modellerar i 3D-rutnät som kan laddas in i andra modellerings och simuleringssystem genom ändrat format till RESCUE B och ECLIPSE (Baker Hughes u.å.). Andra modelleringsprogram utgör kart- och analysprogrammet Surfer samt 3D-programmet Voxler (Goldensoftware u.å.). Verktyg för modellering såsom Mapviewer, Grapher, Strater, Didger och olika raster kan användas för att visualisera data i grafer eller kommunicera analys, lösningar eller resultat (Goldensoftware u.å.).

För ekonomiska beräkningar för geotermala system EGS- Modeling for Windows, ett finns modelleringsverktyg framtaget av Massachusetts Institute of Technology (MIT u.å.). Modellen baseras på resurstyp, kapitalkostnad, ekonomiska, tekniska och optimerande parametrar samt kostnader för drift och underhåll (MIT u.å.). För genomsnittliga kostnadsuppskattningar för geotermal elektricitet kan modelleringar göras med verktyget GETEM (The Geothermal Electric Technology Evaluation Model) (MIT 2006).

7 Tillstånd

Enligt Naturvårdsverket kan utvinning av värmeenergi komma att falla både under vattenverksamhet (kap. 11 i miljöbalken) och miljöfarlig verksamhet (kap. 9 i miljöbalken), detta beroende främst på om systemet klassas som öppet eller slutet (Naturvårdsverket 2008). Prövningsmyndigheten för anläggningstillstånd utgörs av länsstyrelsen, eller mark- och miljödomstolen (Naturvårdsverket 2003; Naturvårdsverket 2008). Till grund för tillståndsprövning ligger Sveriges 16 miljömål med syfte att minimera möjliga miljörisker (Naturvårdsverket u.å.). I samband med tillståndsprövning för geoenergianläggningar i vattenskyddsområde agerar SGU remissinstans och tillstånd utfärdas vanligen endast i sekundär och tertiär zon, då ofta med

reglering kring borrhög (SGU 2016). Det är anläggarens uppgift att förse myndigheten med information kring anläggningen (Stockholm stad u.å.).

Då inga EGS-anläggningar anlagts i Sverige finns ingen samordnande nationell funktion där tillstånd, råd, riktlinjer och tillsyns kan erbjudas (SGU 2016). Redovisning av det tillsatser som kommer användas under stimuleringsprocessen i form av tracers, proppants och diverter kommer med säkerhet krävas. Baserat på farlighet, halt och spridningsrisk kan tillståndsprövning av miljöfarlig verksamhet hos Länsstyrelsen enligt 9 kap, 6 §, miljöbalken komma att krävas (Riksdagsförvaltningen u.å.).

All verksamhet som påverkar miljön och omfattas av tillståndsplikt skall utföra en MKT (Miljökonsekvensbeskrivning) enligt 6 kap. 1 § i miljöbalken (Lagen.nu u.å.). Hur MKB:n bör utföras finns att tillgå i förordning (1998:905) om miljökonsekvensbeskrivningar, bl.a skall projektet beskrivas, samt skall möjliga miljökonsekvenser och hur dessa kan minimeras klargöras (Lagen.nu u.å.).

Till grund för EGS-tillstånd kan möjligen den information myndigheter efterfrågar vid geoenergi-anläggning, med modifiering och utveckling, ligga till grund. I ansökan för geoenergianläggning bör framgå vem som är entreprenören, ansvarig borrhög och deras SITAC-nummer (certifieringsnummer), att information utgått till närboende, typ av köldbärarvätska som avses användas och teknisk fakta kring utrustning (Malmö stad u.å.; Stockholm stad u.å.). Bifogas skall även en situationsplan innehållande plaering av värmepumpar och borrhög, samt antal, djup och lutning för borrhögen, information kring gränser till fastigheter, byggnader, vattentäkter samt avlopps-anläggningar (Malmö stad u.å.). Ledningskollen.se kan användas för information om nedgrävd infrastruktur och ledningar, samt tillhandahåller även stadskontoret information kring fjärrvärmenät (Ledningskollen.se u.å.; Stockholm stad u.å.).

Då skapandet av en EGS-anläggning är en omfattande och tidskrävande process kan inte all denna information erhållas initialt utan kompletteringar bör göras under processens gång. I USA, med relativt lång erfarenhet inom geotermala energi och EGS, har opinionbildning och rättsliga processer, främst relaterade till fracking, resulterat i ett förändrat regelverk som möjligen kan ligga till grund för andra länder (Zillman et al. 2015). År 2012 utformade amerikanska DOE, (*Department of Energy*), med avseende på seismik, ett tvingande registeringsprotokoll för alla geotermala verksamhetsutövare i USA att följa (U.S DOE 2012a). Enligt protokollet

som utarbetades av internationella experter och resulterade i en internationell tillämpning år 2008, skall alla bakgrunds nivåer på markvibrationer, s.k *base-lines*, registreras (Fig. 17) (U.S DOE 2012a). I tillägg till ovanstående utfärdade NAS (National Academy of Sciences) år 2012 utredningen *Induced Seismicity Protocol in Energy Technologies* där den seismiska aktiviteten utreds (U.S DOE 2012a). Registererna har visats användbara i forskning, och inte minst för och skilja inducerad och naturlig seismisk aktivitet åt (MIT 2006).

8 Risker och miljö

I de fall då SGU agerar remissinstans för geoenergi-anläggningar i vattenskyddsområde utvärderas risker kopplade till byggfas och till anläggning (SGU 2016).

Riskmoment under byggfasen relateras främst till borrhögens omfattning samt schaktning och grävning, medan riskerna vid anläggningen främst kopplas till drift och geologiska förhållanden (SGU 2016). Under byggfasens begränsade tidsperiod, som för EGS-projekt kan vara relativt lång, är riskerna främst kopplade till förorenings-spridning i form av fetter, lösningsmedel och oljor (SGU 2016, Breede et al. 2013). Baserat på val av borrhögteknik- och borrhögmetod kan föroreningar kopplade till anläggningsarbetet, av vilken borrhögen utgör en betydande del, reduceras



Fig. 18. Injektionsvätska med tillsatt diverter. Foto från Altarock (2014)

betydligt (Wassara u.å.). Då risk för markskador föreligger vid hantering av schaktmassor, borrhögkax och borrhögslam finns rekommendationer kring hantering av dessa (Borgholms kommun 2016; SGU 2016). Borrhögsvatten skall avslamas och därefter låtas infiltrera markytan, det får inte släppas i vattendrag eller dagvattenbrunn p.g.a. risk för igensättning (Borgholms kommun 2016). Läckage av reservoarvätska kan utgöra en kontaminationsrisk för mark och grund-

vatten om vätskan innehåller icke nedbrytbara och miljöfarliga tillsatser från stimuleringsprocessen (Fig. 18) (Shao et al. 2015; SGU 2016). Läckage förhindras delvis genom att foderrör drivs ner minst två meter i fast berggrund, dock läggs fokus, då reservoaren sällan är slutet, i många fall på att förebygga skadliga effekter vid eventuella läckaget genom noga val av tillsattsmedel (U.S DOE 2012a; SGU 2016). Inom forskning på microbiocida diverters, som har en betydande roll i stimuleringsprocessen, har forskning fokuserats på att kombinera microbiocider med polymerer för att sänka giftigheten, samtidigt pågår forskning där man genom enzym påverkar nerbrytningshastigheter (American Chemical Society 2015; Schlumberger 2012)

I Normbrunn -17 tas tio risker upp med anläggning av brunn för vatten-eller energiuttag (SGU 2016). Normbrunn -17 påbjuder bl.a. att då markförorening existerar bör energibrunnen placeras uppströms denna för att inte riskera föroreningsspridning, vid påtagliga risker kan säkerhetsåtgärder vidtas för arbetare (Geotrainet 2011; SGU 2016). Risk föreligger för påverkan på närliggande byggnader under borrning samt termisk påverkan i berggrunden (SGU 2016). Termisk påverkan i berggrunden kan resultera i sänkt temperatur i enskilda närliggande geoenergi-anläggningar och risken minimeras främst genom noga beräknad avståndsplacering (SGU 2016; Borgholms kommun 2016). Vid anläggningar i drift har NCG:s (NonCondensable Gases), vanligen utgörande av koldioxid och vätesulfid, kunnat påvisas i reservoarvätskan. Liksom problem med lösning av skadliga mineraler, såsom arsenik, har NCG främst kunnat kopplas till anläggningar med hög geotermal grad >230°C (MIT 2006).

Radioaktiva avsättningar på markanläggningen, även på lågtermala anläggningar, är ett faktum och utgör en risk för arbetare, som bör bära skyddsutrustning då avsättningarna avlägsnas (Breede et al. 2013). Höga ljudnivåer, maximalt beräknat till 115 decibel vid reservoarområdets ytterkant under borrning, stimulering och testning av reservoaren utgör en bullerrisk (MIT 2006). Under drift tros ljudnivån från transformator, krafthus samt eventuellt luftkyll system maximalt uppgå till 83 decibel på ett avstånd av 900 meter, något man till rimliga kostnader tror sig kunna påverka (MIT 2006)

Risk för stor markanvändning är inte hithörande då reservoarens huvudsakliga utbredning är vertikal, inte heller har störning av djurliv och vegetation på markområdet kunnat påvisas (MIT 2006). Anläggningens ledningar kan placeras ovan eller under jord beroende

på önskad markanvändning (MIT 2006). Mark-sänkning och jordskred utgår två risker som kan avhjälpas genom noga geologiska undersökningar, marksänkning undviks även genom upprätthållande av jämnt tryck i reservoaren (MIT 2006; Geotrainet 2011).

Seismisk aktivitet utgör möjligen den mest omtalade risken som relateras till EGS-anläggningar, och därmed även den mest studerade och dokumenterade. Seismisk aktivitet med hög magnitud kan främst kopplas till högggradiga geotermala system samt kraftiga stimuleringar (MIT 2006; Majer & Peterson 2007). Vattenbrist kan komma att utgöra en betydande risk i område med naturligt små vattenresurser och grundvattennivån kan sänkas om betydande uttag för reservoarvätska görs, något som riskerar att ske vid läckande och öppna system (MIT 2006). Den mest överhängande olycksrisken har tidigare utgjorts av blow-outs (utblåsningar) vid borrning, något som idag till stor del förhindras genom utvecklingen av borrhörteknik och snabbreagerande utblåsningsventiler (MIT 2006).

9 Hur ser möjligheterna ut i den svenska berggrunden?

Sveriges berggrund utgörs av tre enheter, den 545 miljoner år gamla baltiska skölden- vårt urberg, den 400 miljoner år gamla bergskedjan Kaledoniderna samt kambrisk-tertiär sedimentär berggrund. Generellt är berggrunden tjock och samtliga enheter betraktas som kalla då vi inte befinner oss någon aktiv plattgräns. Variationerna i värmefflöde är relativt små, vilket ger att platsval för EGS inte främst kommer bero av hög temperatur (Eliasson et al. 1991). Sannolikt kommer djupborrningar ner till sex-sju km (baserat på en marktemperatur på 7°C) krävas för att nå temperaturer kring 127-147°C (Erlström et al. 2016). Enligt Wastenson (2002) kan den baltiska skölden i Sverige delas in i åtta stycken provinser (Wastenson 2002) Transskandinaviska magmatiska bältet, Svekokarelska provinsen, Kaledonisk berggrund, Sydvästskandinaviska provinsen samt Bleking-Bornholm provinsen, kommer främst belysas här. Till den svenska berggrunden adderas även Fanerozoiska sedimentära och magmatiska bergarter vilken kommer tas upp i en egen del (Fig. 19).

Genom djupborrning erhålls onekligen den mest användbara informationen om bergartsegenskaperna i de olika provinserna. Då antal djupa borrhål är begränsat, och de inte heller finns sammanställda i något offentligt register, är dagens kunskap knapphändig. Om beställaren av borrhålet är med i SSDP

överskottsberäkningar på gravitation (SGU 2009). Den dominerande sprickriktningen är nordnordostlig till sydsydvästlig (SGU 2009). Att Gotlands sedimentära berggrund är mäktigare än Ölands ger Gotland bättre förutsättningar för en hög geotermisk gradient. Sammanställd data indikerar vidare goda förutsättningar på Gotland, detta speciellt i Visbyområdet och öster om Klintehamn. Enligt SGU:s brunnsarkiv (u.å.-a) når endast 34 stycken av ön borrhningar ner i urberget vilket kan göra det svårt att prediktera borrhdjup. Vidare saknas tätområden vilket försvårar länkning i det befintliga fjärrvärmesystemet. Gotlands befolkning uppgår till 58003 personer, något som under omständigheterna trots allt kan utgöra ett för litet underlag för att kostnadsmotivera en anläggning (Statistiska Centralbyrån 2016; pers. kom. Erlström). Ett EGS för elproduktion kan anses möjligt på både Öland och Gotland och avhänger främst av om hydroshearing kan tillämpas på berggrunden, samt om borrhningarna djup kan motiveras ekonomiskt.

Skånes sedimentära berggrund kan i princip begränsas till den sydvästra delen, som främst utgörs av mesozoiska avlagringar bestående av kalksten, skiffer och sandsten (Wastenson 2002; Lindström et al. 2011). Urberget består av den västsvenska gnejsregionens berggrund; främst gnejs men även granitoider och metabasiter (Sivhed et al. 1999). I nordväst-sydvästlig riktning genom Skåne, sträcker sig den väl studerade Tornquistzonen (Lindström et al. 2011). Sydväst om Tornquistzonen är urberget generellt nedsänkt (Lindström et al. 2011). Djupborrningar i landområdets sydvästra del visar på mäktighet upp till tre kilometer för den ovanliggande sedimentära berggrunden (pers. kom Erlström). Nordöst om zonen, i mellersta och norra Skåne går urberget i dagen (Lindström et al. 2011). Diabasgångar och basalter förekommer i urberg och paleozoiska avsättningar, främst i anslutning till Tornquistzonen (Wastenson 2002).

I Skåne finns totalt 20 stycken djupa borrhål (pers. kom. Erlström). Baserat på sydvästra skånes sedimentära mäktighet är EGS främst av intresse här. Temperaturen ligger, på 1000 meters djup, generellt mellan 25 och 30°C i ett större område innefattat av skåne och västra delen av Sverige upp till Göteborgsområdet (Schwarz 2016). I sydvästra regionen har djupborrning DGE-1 gjorts i Rågby utanför Lund. Borrningen är placerad i Romelåsens förkastningszon med ett borrhdjup som uppgår till 3701,8 meter (Erlström & Sivhed 2012). Urberget påträffades vid 1946 meters djup och består av gnejs, gnejsig granit, metabasit, granit och NW-dolerite

(Erlström & Sivhed, 2012). DGE-1 uppnår en temperatur på 85°C vid 3700 meters djup (Erlström & Sivhed 2012). I området finns för övrigt en geotermianläggning, skapad utan hydraulisk stimulering, som varit i drift sedan år 1985 som förser Lund med 20°C vatten. Testborrningar har även gjorts i djupa förkastningszoner i Lund (Rosberg 2010).

FCC-1 och FFC-2 utgör Sydkraft och Eons djupa borrhål i Barsebäck, Malmö (Erlström & Sivhed 2012). Borrhjupet i FCC-1 uppgår till 2090 meter och temperatur uppmäter 63°C (pers. kom Erlström). Både Lund och Malmös marktemperatur ligger på 16°C, vilket ger en drygt 4°C högre geotermal gradient i Malmös berggrund. Enligt Erlström & Sivhed (2012) är mäktigare sedimentär berggrund lokaliserat till det kustnära området mellan Trelleborg och Malmö (Erlström & Sivhed 2012). Baserat på nu existerande berggrundskänedom tros ett borrhdjup ner till minst sex kilometer krävas om inte mer homogena zoner upptäcks. Tornquistzonens större förkastningszoner bör undvikas vid placering av borrhålet.

Borrningar har även gjorts i Köpenhamn, där en geotermianläggning sedan år 2014 är i drift (SGU u.å.-c). Borrhdjup uppgår till 2400 meter och temperaturen till 60°C (SGU u.å.-c).

9.2 Den sydsvenska gnejsregionen

Regionen utgör den svenska delen av Sydvästskandinaviska provinsen. Regionen utbreder sig från norra Skåne till norra Värmland och delas vidare in i en östra och en västra del som skiljs åt av svekonorvegiska skjuvzoner (Lindström et al. 2011). I regionen innefattas även ett liten område som sträcker sig i nordvästlig riktning från Ystad mot Lund (Wastenson 2002). Berggrunden utgörs huvudsakligen av ortognejs samt migmatiserade och omvandlade vulkaniska bergarter vilka uppvisar en ålder mellan 1800-900 miljoner år (Wastenson 2002). Området är mycket heterogent uppbyggt och gränsen mellan gnejs och TBM:s granit kan följas längs regionens hela östsida, den s.k. Protoginonen (Wastenson 2002). Svag förgejsning finner man i den 1600 miljoner år gamla åmålsgraniten och den 1350 miljoner år gamla Askimsgraniten. Regionens yngsta granit, och därmed troligen mest högstrålande, utgörs är den 920 miljoner år gamla Bohusgraniten (Wastenson 2002).

HDR-forskningsprojektet som pågick år 1984-89 i svenska Fjällbacka utfördes i centrala delar av bohusgraniten (Wallroth 1992; Wallroth 1994). Bohusgraniten maximala mäktighet varierar i litteratur mellan fem-åtta km (Lind 1982; Wastenson 2002). Enligt Lindström et al. (1980) innehåller

granitens höga koncentrationer av uran, torium och kalium en värmeproduktion på $6,0\mu\text{W}/\text{m}^3$. Något som vidare kan jämföras med de två graniterna loggade i Stenberg-1; järnagranit ($2\mu\text{W}/\text{m}^3$) och siljangranit ($5\mu\text{W}/\text{m}^3$) (Juhlin 1991). De borrhålen som finns att tillgå i den svenska regionen tros vara fyra stycken på Fjällbacka, samtliga på ytligare djup än 500 meter (Wallrot 1992). Borrlogg från Fjällbacka indikerar omvandling på stora djup, detta då gnejsig berggrund börjar strax under 470 meters djup (Wallroth 1992). Vidare finns borrhinformation från prospektering i motsvarande berggrund i södra Norge (Schwarz 2016). Regionens heterogena berggrund försvårar stimulering och prediktering avsevärt vid skapande av eventuell EGS-reservoar.

9.3 Transskandinaviska magmatiska bältet, TBM

Utgör centrala delar av Sverige, från södra Småland till centrala Jämtland. Blekinge-Bornholm provinsen utgörs av Blekinge och den nordöstra hälften av danska ön Bornholm. Berggrunden i TMB utgörs främst av granit och porfyr, i mindre mängd även gabbro och diorit (Wastenson 2002). Graniterna är till största del yngre än den Svekokarelska orogenesisen, så unga som 1400 miljoner år gamla i delar av östra Småland (Wastenson 2002). Detta innebär att berggrunden i TBM är relativt homogen och har en högre geotermisk konduktivitet än t.ex. den sydvästskandinaviska provinsen.

Kring Siljanringen samt i och kring Vättern återfinns ca 1000 m mäktiga sandstensavlagringar (Wastenson 2002). På Visingsö, i Vättern, uppgår mäktigheten på dessa sandstenar till 1426m (Moczydlowska et al. 2017). Hos SKB finns loggar för det 2500 meter djupa borrhålet KLX02 i lilla Laxmar utanför Oskarshamn där den geotermiska gradienten beräknats till $16^\circ\text{C}/\text{km}$ (Juhlin 1995). För övrigt finns information, ner till 1700 m att hämta från SKB:s Hard Rock Laboratory Äspö, i Oskarshamn (Gustavsson et al. 1997). Värmeflödet är något förhöjt i nordöstra delar av området där bl.a. Siljanringen ligger (Schwarz 2016). I Siljanringen har SKB undersökt möjligheten för gasprospektering och där finns idag två djupa borrhål; Gravberg-1 (djup 7500 m) och Stenberg (djup 6618 m) (Juhlin 1991). Borrhålen utgör Sveriges djupaste och har kommit att ge mycket värdefull information om djupbergartsförhållande och temperaturgradienter. Siljanringens berggrund kan delas in i fyra huvudgrupper; protozoiska plutoniter och ytbergarter, diabaser och

Sedimentär berggrund. Störst värmeproduktion erhålls i plutoniten Siljangranit (Juhlin 1991). Temperaturen i Gravberg-1 uppgår till $85,6^\circ\text{C}$ på 5000 meters djup (Juhlin 1991). Detta visar på att betydligt djupare borrhningar krävs för att nå samma temperaturer i urberg, som i sedimentär berggrund, (jmf. DGE-1, L und). Blekingeprovensens berggrund är mellan 1800-1700 miljoner år gammal och utgörs av basiska och sura vulkaniter, kvartsiter, gnejs och olika graniter (Wastenson 2002). I Blekingeprovisen uppvisar området kring Karlshamn ett måttligt förhöjt värmefflöde, berggrunden i detta område utgörs av den något yngre karlshamnsgraniten med en ålder på ca 1450 miljoner år (Juhlin 1995; Wastenson 2002). På 70-talet utredde KBS, (Kärnbränslesäkerhet) Karlshamnsområdet för möjlig slutförvaring. De kärnborrhningar som gjordes, till maximal 590 meters djup, utgör troligtvis de djupaste borrhningarna i provinsen (Kärnbränslesäkerhet 1979).

9.4 Svekokarelska provinsen

Svekokarelska provinsen utgör berggrunden i östra delar av Sverige samt södra och centrala Finland. I Sverige sträcker sig provinsen från småländska Västervik till Kiruna i norr (Wastenson 2002). Berggrunden är prekambrisk och härstammar huvudsakligen från den Svekokarelska orogenesisen som inträffade för ca 1800 miljoner år sedan (Wastenson 2002). Berggrunden består främst av granitiska djupbergarter tillkomna för 1900-1600 miljoner år sedan samt diabaser, daterade till en ålder mellan 1700-900 miljoner år (Wastenson 2002).

För EGS utgörs intressant berggrund av de yngre graniter som inte påverkats av orogenesisen samt möjliga högdensitetsdiabaser. Kring diabasgångar utvecklas inte sällan spricksystem som kan vara användbara för utformning av reservoaren. Ytbergarterna i provinsen består bl.a. av metamorfa, vulkaniska och sedimentära avlagringar. Bland de metamorforserade bergarterna finns bl.a. lerskiffer (Wastenson 2002). Enligt Schwarz (2016) uppgår temperaturen på ett djup av 1000m till 25°C från Sundsvall och söderut. Ett område norr om Västervik, samt ett större område i västra Ångermanland som sträcker sig norrut in i Lappland uppvisar landets mest förhöjda värmefflöde (Juhlin 1995; Schwarz 2016). Det norra området kan komma att bli intressant för elproduktion, men i dagsläget är det för glesbefolkat. Kan betydande mäktighet på lerlager lokaliseras över Västerviksområdet finns det möjlighet att påträffa en förhöjd temperaturgradient här. Borrhningar gjorda av malmprospekteringsföretag i Bergslagen, norra

Norrbottnen samt Skellefteå, med djup mellan 1130-1540 m, har använts för att undersöka EGS-möjligheter (Schwarz 2016). Potentialen har i samtliga fall beräknats låg (Schwarz 2016). Forsmarks 2200 meter djupa borrhål RHB70, finns geologiskt sammanställt i SKB:s rapport R-10-04 (Svensk kärnbränslehantering 2009; Stephens 2010). Enligt rapporten utgörs berggrunden kring Forsmark utgörs av intrusiva, sedimentära och felsiska vulkaniska bergarter, generellt duktilt påverkade eller metamorfoserade (Stephens 2010). Området är starkt anisotrop och flera duktila bälten med amfibolit löper över området som innesluter små berggrundslinser med mindre duktil påverkan (Stephens 2010). Den geotermala gradienten beräknas ligga emellan 8 to 12° C/km (Svensk Kärnbränsle Hantering AB 2009). Djupborrningar tros saknas för stora delar av området. Möjligen kan data från Espoo-projektet vara behjälpligt då berggrunderna härrör från samma provins.

9.5 Kaledonisk berggrund

Berggrunden utgörs av fjällkedjan samt fjällkedjeranden, som med en bredd på 100-300 km sträcker sig från Stavanger i söder till Nordkap i norr (Lindström et al. 2011). Berggrunden domineras av överskjutande skollor, vilka delas in i en undre, en mellersta samt övre skollberggrund (Wastenson 2002). Skolorna överlagrar en tunn zon av rotfast kambrium som vilar på den baltiska skölden (Lindström et al. 2011; Wastenson 2002). Graden av metamorfos minskar med ökat djup och likaså gör berggrundens transport; ju längre ner i berggrunden man kommer, ju kortare sträcka har skollorna transporterats (Wastenson 2002). Undre skollberggrund har förekomst av prekambrika och siluriska mörka shiffrar, vilka vanligen uppvisar en naturligt hög värmproduktion (Wastenson 2002).

Djupborrinformation finns att tillgå från COSC-1 (Collisional Orogeny in the Scandinavian Caledonides) utanför Åre med ett borrhål på 2495,8 meter (Lorenz 2015b). Den geotermala gradienten i COSC-1 har uppmätts till 20°C/km (Lorenz 2015b). Vidare befinner sig ett andra borrhål, COSC-2, med samma måldjup under planeringsfas (Lorenz 2015a). På planeringsfas befinner sig även djupborrningen DAFNE (Drilling Active Faults in Northern Europe) (International Continental Scientific Drilling Program u.å.). Projektet ligger i norra Finlands sariolisk-jayuliska berggrund, vilken även återfinns i norra Sverige, öster om fjällkedjan.

Värmefflödet i den kaledonska berggrunden är

större än i de flesta delarna av TMB och sydsvenska gnejsregionen, och speciellt intressanta är möjligen de mörka skiffarna. En kombination av faktorer gör dock att den kaledonska berggrunden anses mindre aktuell för EGS i dagsläget. Även om en förhöjd geotermal gradient skulle lokaliseras så befinner sig området ändå i jämförelsevis kall berggrunden, det är dessutom glesbefolkat och eventuell borrning försvåras av terrängen.

9.6 Område med impaktstrukturer och avvikande berggrund

I Sverige finns 44 stycken säkra, troliga eller möjliga nedslagskratrar, s.k. impaktstrukturer (Henkel & Pesonen 1992). Kratrarna kännetecknas av en cirkulär struktur, något som vidare kan vara svårt att upptäcka då erosion, veckning och vittring påverkat berggrunden (Lindström et al. 2011). För att identifiera möjliga impaktstrukturer letar man bl.a. efter förekomst av chockad kvarts, förhöjda halter iridium samt slagkäglor (striering skapade av chockvågorna) (Lindström et al. 2011). Impaktstrukturen utgör ett intressant område för EGS då nedslagen vanligen resulterat i uppsprickning av berggrunden. Enligt Pilkington & Grieve (1992) kan den låga gravitationsanomalin som ofta karakteriserar impaktstrukturer indikera att områdets parautochtona berggrund är uppsprucken, något som då kan användas för att detektera lämplig permeabel reservoarberggrund (Pilkington & Grieve 1992). Annan avvikande berggrund kan vara intressant utifrån geofysiska avvikande egenskaper såsom förhöjd värmproduktion eller sprickbildning kring intrusioner.

Siljansringen utgör den krater som ett 360 miljoner år gammalt meteoritnedslag resulterade i (Juhlin 1991). Kratern har en diameter på ca 60 km och den granitiska berggrunden är kraftigt uppsprucken ner till 6500 meters djup (Juhlin 1991). Utifrån områdets förhöjda termska konduktivitet har möjligheten för traditionell geotermi bedömts lämplig i den 300 meter mäktiga Orsasandstenen norr om kratern (Juhlin 1991). För EGS är den varma Siljangraniten lokaliserad i kratern intressant, inte minst då ett befintligt spricksystem till stort djup kunnat bekräftas.

Björkö utgör en del av strukturerna i Björkfjärdenbukten i Mälaren (Flodén et al. 1993). Strukturerna tros vara resultatet av en 1210 miljoner år gammal nedslagskrater som blivit sedimentfylld (Flodén et al. 1993). Berggrunden utgörs av ca 250 m mäktig mälarsandsten som överlagrar 20-40 m av glaciala och postglaciala sediment (Flodén et al. 1993). Området har undersökts för geotermisk fjärrvärme-

produktion, men undersökningarna är för tillfället nedlagda (Lindström et al. 2011). Enligt slutrapporten för undersökningarna som utfördes år 2004 kan sandstenens mäktighet, baserad på magnetotelluriska mätningar, uppgå till mellan 1,0 - ca 2,5 km (Henkel et al. 2004). Rapporten presenterade även bathymetrisk och flygmagnetisk data som indikerar en stor skjuvzon i områdets sydvästra del (Henkel et al. 2004). Två stycken borrhningar har genomförts, till djup av 920, respektive 960 meter. Berggrundstemperaturen har uppskattats till 105°C på fem kilometers djup, detta beräknat på berggrundens värmeledande förmåga samt mätningar i borrhålen (Henkel et al. 2004). Berggrundens ytligare 1000 m uppvisar stor sprickförekomst men sprickorna är till stor del igensatta och spräckning av berggrunden föreslås i rapporten för att utvärdera den hydrauliska kommunikationen. Den geotermiska gradienten på 15-20°C är normal för kristallin berggrund, men beroende av djupet på det spricksystem som kan ansluta till eventuell skjuvzonen, sandstenens mäktighet samt berggrundens lämplighet för hydroshearing kan området vara intressant för EGS. För att prediktera borrhjup, och därmed ekonomisk lönsamhet, skulle mätning av den geotermala gradienten och andra geofysiska parametrar, i ett djupare borrhål vara behjälpligt.

Dellen utgör ett system av sjöar i centrala Hälsingland där bl.a. chockade mineral, impaktbreccior och uppsmält berggrund samt avvikelser i gravitation- och remanent magnetisering bevisat att området utgör en 90 miljoner år gammal impaktstruktur (Deutsch et al. 1992). Kratern har en diameter på 19 km och områdets berggrund utgörs av granodioritisk massformig Ljusdalsgranit med varierande metamorf grad (Deutsch et al. 1992; Jourdan et al. 2014; Lindström et al. 2011). Dellen har föreslagits, baserat på berggrundens komplexitet, som plattform för ett djupbergslaboratorium med ett integrerat projekt om djupborrning (Jourdan et al. 2014). Plattformens arbete skulle bl.a. innefatta forskning kring utvinning av geotermal energi ur kristallint berg (Henkel et al. 2010). Generellt har området en temperatur på 20-25°C 1000 meter ner i berggrunden och den geotermala konduktiviteten betraktas som högre än söder om området (Schwarz 2016). Luftburna magnetiska mätningar uppvisar en positiv magnetisk anomali över centrala delar av kratern, som kan indikera avvikande berggrund. Den magnetiska anomalin sammanfaller vidare med negativa gravitationsanomalier, vilka tolkas som att Ljusdalsgranit är uppsprucken (Henkel et al. 2010). Temperaturen har på djup mellan 2,5-4,5 km beräknats ligga mellan 60-100°C (Henkel et al. 2010).

Möjlighet för EGS i området är inte uteslutet, men aktuell information, och avsaknad av mätning i djupa hål gör en bedömning i dagsläget mycket svår. Avsaknaden av överlagrande berggrund med låg konduktivitet innebär att borrhjupet utgör en avgörande faktor i sammanhanget.

Dellen och Mien är de enda två områdena i Sverige där man lyckats hitta stora mängder berggrund påverkad av nedslag (Henkel & Pesonen 1992). Mien utgör idag en sjö utanför Tingsryd i Småland. Kratern har en diameter på sju kilometer och dess ålder har daterats till 120 miljoner år (Henkel & Pesonen 1992). Kratern ligger i TMB-provinsen och flera geologiska undersökningar har utförts i områdets ryolitiska berggrund (Åström 1998). Seismiska undersökningar har påvisat en kompressiv och skjuvad berggrund ner till ett djup av 500 meter, men herefter tros spricksystemets utbredning minska med djup (Åström 1998). Avvikande värde för såväl magnetism som gravitation har kunnat påvisats dock saknas uppmät tillförlitlig djupinformation (Åström 1998).

Avvikande berggrund i Sverige består bl.a. av Alnön utanför Sundsvall. Ön utgör resterna av en gammal vulkan. Berggrunden är väl studerad och finns beskriven i Lundqvist (1990) där specialkarta över Alnökomplexets berggrund ingår (Lundqvist 1990). Berggrunden utgörs av 550-600 miljoner år gamla alkaliska och karbonatiska bergarter härstammande från vulkanisk aktivitet, med fyndigheter av bl.a. Titanomagnetit och pyroxenit (Persson et al 2014). Vidare utmärkande för berggrunden på Alnön, Rödön och i det kringliggande vattnet är rödintrusionerna som utgörs av en sorts rapakivgranit. Alnöintrusionerna beskrevs redan år 1895 av A. G Högbom och hör till ett av Sveriges mest studerade geologiska objekt (Persson et al 2014). Intrusionerna uppvisar tillsammans onekligen den största högmagnetiska anomalin i området, med en diameter på sju kilometer (Persson et al 2014). Egenskaper som vidare kunnat tillskrivas rödögraniten är förhöjda halter av kalium och torium (Persson et al 2014). Mellan Alnöintrusionerna och Söråkerintrusionen har, m.h.a. flygmätningar, hög densitet och magnetisk susceptibilitet även kunnat påvisas i berggrunden (Persson et al 2014). Stora luckor i datan, beroende av bl.a. för glesa mätningar har dock förhindrat mer komplexa modelleringar av berggrunden och dess intrusioner (Persson et al 2014).

Området är intressant både vad beträffar den förhöjda värmeproduktionen i graniten samt de avvikande bergarterna och den uppsprickning av berggrund som inte sällan sammanfaller med

intrusioner. Någon djupdata eller information om geotermisk gradient tros dock inte finnas tillgänglig.

10 Slutsatser

- Möjligheterna för EGS är stora och med dagens tekniksprång för djupborringar kommer EGS-system troligen utgöra en betydande energiproducent i framtiden.
- Någon standardmodell för EGS-anläggningar existerar inte. Det finns många olika geologiska, termala, petrofysiska, hydraulisk och geomekaniska miljöer där vatten kan låtas värmas i berggrunden och varje möjlig reservoar måste hanteras separat.
- Det är oerhört viktigt att välja miljövänlig teknik, miljövänliga metoder och miljövänliga medel. Ett hållbart miljötank bör genomsyra hela produktionskedjan. Fokus bör läggas på utvecklande av effektiva biologisk nedbrytbara och miljövänliga tillsatser för att inte skada våra grundvatten och vår natur.
- Utveckling av djup borrhörteknik pågår på internationell nivå. Målet är att kunna möjliggöra borrningar med större diameter, högre hastighet samt att utveckla tekniken kring avlägsnande av borrhörteknik under borrningen.
- Förutsättningarna för EGS i svensk berggrund tros i dagsläget vara störst i område där sedimentär berggrund ansluter till någon form av impakt- eller förkastningsstruktur som resulterat i ett befintligt spricksystem i den underliggande granitiska berggrunden. De mest lämpade områdena utgörs av sydvästra skåne, Siljanområdet samt i området kring Visby på Gotland.
- En statligt instans borde upprättas för insamling och sammanställning av landets befintliga djupborrsdata. Registreringsplikt för djupborringar skulle kunna införas, och likaså krav på geofysiska mätningar i samband med borrningar. En sådan tillhandahållen informationsbas hade vara värdefull vid många anläggningsarbete.
- Ett internationellt samarbete kring djupborringar och EGS hade kunnat underlätta riskbedömningar och effektivisera arbetet väsentligt.

11 Tack

Tack till min handledare Mikael Erlström som bidragit med både givande diskussioner, vägledning och litteratur. Tack även till Britta Smångs, bibliotekarie på Geocentrum för all hjälp med referenser. Tack till studiekamraterna Lisa Christensson, Mimmi Ingered och Hanna Nilsson för meningsfullt utbyte under skrivprocessen.

12 Referenser

- Alm, P. G., 2012: "Logging" Geofysisk borhållsmätning. In: L. t. högskola (red.) Lund. 85 s.
- Altarock Energy, 2011: *Newberry EGS Demonstration*. Hämtad 2017/03/30, från <https://www.youtube.com/watch?v=Oscqx08zBXQ>
- Altarock Energy, 2014: *NEWBERRY EGS DEMONSTRATION, OREGON*. Hämtad 2017/04/30, från <http://altarockenergy.com/projects/newberry-egs-demonstration/>
- Altarock Energy, u.å: *ALTAROCK SERVICES, LLC*. Hämtad 2017/05/05, från <http://altarockenergy.com/altarock-stimulation-services/>
- American Chemical Society, 2015: *Plant Enzymes Protect Fracking Fluids - January 26, 2015*. Hämtad 2017/04/30, från <http://www.cas.org/patentpicks/pp1012615>
- Ataei, M., Kakaie, R., Ghavidel, M. & Saeidi, O., 2015: Drilling rate prediction of an open pit mine using the rock mass drillability index: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 73, 130-138. doi: 10.1016/j.ijrmms.2014.08.006
- Atlas Copco, 2015: Hydraulisk bergborrmaskin. Rapport, 8 sid. Atlas Copco.
- Austin, W. H., 1977: Geothermal power emerging as an alternate energy source. *Canadian Mining Journal* 98, 3036.
- Ayling, B. F., Hogarth, R. A. & Rose, P. E., 2016: Tracer testing at the Habanero EGS site, central Australia: *Geothermics* 63, 15-26. doi: 10.1016/j.geothermics.2015.03.008
- Baker Hughes, 2012. Hydraulic Fracturing: An Environmentally Responsible Technology for Ensuring Our Energy Future. *Report* 10 sid.
- Baker Hughes, 2014: *Geothermal EGS Animation Video*. Hämtad 2017/04/29, från <https://www.youtube.com/watch?v=1BG7agxASrc>
- Baker Hughes, 2017: *Ground-breaking inventions that revolutionized the petroleum industry*. Hämtad 2017/04/21, från <https://www.bakerhughes.com/company/about/history>
- Baker Hughes, u.å.: *JewelSuite Geologic Modeling*. Hämtad 2017/05/04, från <https://>

- www.bakerhughes.com/products-and-services/reservoir-development-services/reservoir-software/jewelsuite-reservoir-modeling-software/jewelsuite-geologic-modeling-software
- Bargar, K. E. & Keith, T. E. C., 1999: Hydrothermal mineralogy of core from geothermal drill holes at Newberry Volcano, Oregon. Washington, 1999 : *U.S. Government Printing Office, 1578*, 1-101
- Baria, R., Jung, R., Tishner, T., Nicholls, J., Michelet, S., Sanjuan, B., Soma, N., Asanuma, H., Dyer, B. & Garnish, J., 2006: Creation of an HDR reservoir at 5000 m depth at the European HDR project. *Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University*. Stanford, United States. 8 sid.
- Berge, A., Adl-Zarrabi, B. & Hagentoft, C.-E., 2013: Determination of specific heat capacity by transient plane source: *Frontiers of Architectural Research*, 476. doi: 10.1016/j.foar.2013.09.004
- Bomgardner, M. M., 2015: Better Chemistry Flows To The Oil And Gas Industry. Hämtad 2017/04/30, från <http://cen.acs.org/articles/93/i15/Better-Chemistry-Flows-Oil-Gas.html>
- Borgholms Kommun, u.å: Information om anläggning som nyttjar grund-, ytvatten, berg/markvärme resp. kyla. *Rapport*, 2 sid. Borgholms kommun; Borgholm.
- Boyle, G. (ed), 2012: *Renewable energy ; power for a sustainable future*. Oxford University Press, Oxford in association with the Open University, Milton Keynes, UK. 479 sid.
- Breede, K., Dzebisashvili, K., Liu, X. & Falcone, G., 2013: A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future: *Geothermal Energy1*, 4. doi: 10.1186/2195-9706-1-4
- Cheniany, A., Hasan, K. S., Shahriar, K. & Khademi Hamidi, J., 2012: An estimation of the penetration rate of rotary drills using the Specific Rock Mass Drillability index: *International Journal of Mining Science and Technology*22, 187-193. doi: 10.1016/j.ijmst.2011.09.001
- Deutsch, A., Buhl, D. & Langenhorst, F., 1992: On the significance of crater ages: New ages for Delen (Sweden) and Araguainha (Brazil): *Tectonophysics*216, 205-218. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90167-5](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(92)90167-5)
- Dezayes, C., Gentier, S. & Genter, A., 2005: Deep Geothermal Energy in Western Europe : The Soultz Project. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, *Rapport BRGM/RP-54227-FR48*, 48 sid.
- Driconeq, u.å. -b: ROTATIONSBORRNING – STÖRRE HÅLDIAMETER. Hämtad 2017/04/23, från <https://se.driconeq.com/borrning/rotationsborrning/>
- Driconeq, u.å.-a: DTH-BORRNING – EFFEKTIVT
- Dusseault, M. B., 2016: *Fracking vs. Hydroshearing – What's the Difference*. Hämtad 2017/04/01, från <http://www.cangea.ca/fracking-vs-hydroshearing.html>
- Eliasson, T., Eriksson, K.G., Lindquist, G., Malmquist, D. and Parasnis, D. 1991: Sweden. In: Hurtig, E., Cermák, V., Haenel, R. and Zui, V. (eds.), *Geothermal Atlas of Europe*, Herman Haack Verlagsgesellschaft, Gotha, 78 sid.
- Engqvist, P., Fogdestam, B. & Karlqvist, L., 1982: *Hydrogeologisk karta över Gotlands län. Beskrivning och bilagor till hydrogeologiska kartan över Gotlands län = Description and appendices to the hydrogeological map of Gotland county*. SGU, Uppsala. 60 sid.
- Erlström, M., Mellqvist, C., Schwarz, G., Gustafsson, M. & Dahlqvist, P., 2016: Geologisk information förgeoenergianläggningar – en översikt. *Rapport*, 56 sid. .
- Erlström, M. & Sivhed, U., 2012: Pre-Rhaetian Triassic strata in Scania and adjacent offshore areas – stratigraphy, petrology and subsurface characteristics. *Rapport 132*, 80 sid. Växjö.
- Erlström, M. & Sveriges Geologiska, U., 2009: *Beskrivning till regional berggrundskarta över Gotlands län. Volym 221*Sveriges geologiska undersökning (SGU), Uppsala. 60 sid.
- Finnish Government, 2016: *Study completed on effects of EU 2030 energy and climate targets*. Hämtad 2017/04/30, från http://valtioneuvosto.fi/en/article/-/asset_publisher/10616/selvitys-eu-n-2030-energia-ja-ilmastotavoitteiden-vaikutuksista-valmistunut
- Flodén, T., Söderberg, P. & Wickman, F. E., 1993: Björkö, a possible Middle Proterozoic impact structure west of Stockholm, Sweden: *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*115, 25-38. doi: 10.1080/11035899309454826
- Forssell, J., 2015: Avvikelsemätning av bergborrhål En prototypimplementering med noggrannhetsanalys *Chalmers University of Technology Report*, 98 sid. Göteborg.
- Fossen, H. (ed), 2010: *Structural geology*. Cambridge University Press, Cambridge. 463 sid.
- Geophires, u.å.: *GEOPHIRES*. Hämtad 2017/05/05, från <http://koenraadbeckers.net/geophires/index.php>
- Geotec, u.å.: *Vad kostar bergvärme och vad är geoenergi?* Hämtad 2017/04/24, från <http://geotec.se/geoenergi/fragor-och-svar-om-geoenergi/#toggle-id-18>
- Geotrained, 2011: *GEOTRAINER TRAINING MANUAL FOR DESIGNERS OF SHALLOW GEOTHERMAL SYSTEMS*. *Rapport IEE/07/581/SI2.499061*, 192 sid. Bryssel.
- Goldensoftware, u.å: *A PRODUCT FOR EVERY PRO-JECT*Hämtad 2017/05/05, från <http://>

- www.goldensoftware.com/products
- Gustafson, G., Stanfors, R., Wikberg, P. & Svensk Kärnbränslehantering, A. B., 1997: *Aspo hrl - geoscientific evaluation 1997/2 : results from pre-investigations and detailed site characterization: summary report*. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm. 117 sid.
- Henkel, H. & Pesonen, L. J., 1992: Impact craters and craterform structures in Fennoscandia: *Tectonophysics*216, 31-40. doi: 10.1016/0040-1951(92)90153-W
- Henkel, H., Piazzolo, S., Wörman, A. & Jing, L., 2010: A deep rock laboratory in the Dellen impact crater: *GFF*132, 45-54. doi: 10.1080/11035890903469963
- Henkel, H., Bergman, B., Stephansson, O. & Lindström, M., 2004. BJÖRKÖ ENERGIPROJEKT Slutrapport avseende geovetenskapliga undersökningar 2000-2004. *Report TRITA-LWR 3010* 65 sid.
- Hoseinie, S. H., Aghababaei, H. & Pourrahimian, Y., 2008: Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RDi): *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*45, 1-10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.04.001>
- Inches to Centimeters Converter, u.å.: *Inches to cm (centimeters) converter* Hämtad 2017/04/24, från <http://www.inches-to-cm.com/>
- International Continental Scientific Drilling Program, u.å.: *DRILLING PROJECTS*. Hämtad 2017/05/13, från <http://www.icdp-online.org/projects/world/europe/fennoscandia/>
- International Energy Agency, 2011: Technology Roadmap Geothermal Heat and Power. *International Energy Agency Report*, 52 sid. Paris.
- International Energy Association, 2015: *South Korea - Direct Uses* Hämtad 2017/04/29, från https://www.geothermal-energy.org/direct_uses/south_korea.html.
- Jeanloz, R. & Stone, H., 2013: Enhanced Geothermal Systems *Report JSR-13-320*, 147 sid. Virginia.
- Jourdan, F., Mark, D. F. & Verati, C., 2014: *Advances in ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating : from archaeology to planetary sciences*. The Geological Society, London. 378 pp.
- Juhlin, C., 1991: *Scientific summary report of the deep gas drilling project in the Siljan Ring impact structure : naturgas*. Vattenfall, (Vällingby) 257 sid.
- Juhlin, C., 1995: Very deep hole concept Geoscientific appraisal to conditions at large depths - Deep databases, 1000-5000 m. *Geophysics Report U-96-0S*, 43 sid. Uppsala.
- Jung, R. 2013: EGS-Goodbye or Back to the Future 95. *I. InTech*.
- Keith, T. E. C. & Bargar, K. E., 1988: Petrology and hydrothermal mineralogy of US Geological Survey Newberry 2 drill core from Newberry Caldera, Oregon: *Journal of Geophysical Research*93, 10174-10190
- Khilyuk, L. F., Chilingar, G. V., Robertson Jr, J. O. & Endres, B. 2000: CHAPTER 18 - Paths of Gas Migration. *I Gas Migration*, 264-278. Gulf Professional Publishing, Houston.
- Kim, H. C. & Lee, Y., 2007: Heat flow in the Republic of Korea: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*112, n/a-n/a. doi: 10.1029/2006JB004266
- Kärnbränslesäkerhet, 1979: *Kärnbränslecykelns slutsteg : förglasat avfall från uppärbetning : material angående SKI:s beredning av KBS' geologiska kompletteringsrapport*. Kärnbränslesäkerhet (KBS), Stockholm. 255 sid.
- Lagen.nu, u.å.: *Förordning (1998:905) om miljökonsekvensbeskrivningar*. Hämtad 2017/05/19, från <https://lagen.nu/1998:905>
- Landocean Energy Services, u.å.: *LD-SIMO2D Digital Seismic Lab*. Hämtad 2017/05/05, från <http://www.ldocean.com.cn/en/Product1-4.aspx>
- Landström, O., Larson, S. A., Lind, G. & Malmqvist, D., 1980: Geothermal investigations in the Bohus granite area in southwestern Sweden: *Tectonophysics*64, 131-162
- Ledningskollen.Se, u.å.: *Kolla innan du gräver*. Hämtad 2017/05/05, från <https://www.ledningskollen.se/>
- Lind, G., 1982: *Gravity interpretation of the crust in south-western Sweden*. Kungälv : Gotab, Göteborg. 93 sid.
- Lindström, M., Lundqvist, J., Lundqvist, T., Calner, M. & Sivhed, U., 2011: *Sveriges geologi från urtid till nutid*. Lund : Studentlitteratur, Spanien. 628 sid.
- Lorenz, H., Juhlin, C., Almqvist, B. S. G., Berthet, T., Gee, D. G., Klonowska, I., Tsang, C. F., Rosberg, J. E., Bjelm, L., Conze, R., Pascal, C., Pedersen, K., Roberts, N. M. W. & Tsang, C. F., 2015a: COSC-1 - drilling of a subduction-related allochthon in the Palaeozoic Caledonide orogen of Scandinavia: *Sci. Drill. Scientific Drilling*19, 1-11.
- Lorenz, H., Juhlin, C., Almqvist, B. S. G., Berthet, T., Gee, D. G., Klonowska, I., Tsang, C. F., Rosberg, J. E., Bjelm, L., Conze, R., Pascal, C., Pedersen, K., Roberts, N. M. W. & Tsang, C. F., 2015b: Operational Report about Phase 1 of the Collisional Orogeny in the Scandinavian Caledonides scientific drilling project (COSC-1). *Report 10.2312/ICDP.2015.002*, 55 sid.
- Lund, J. W. & Boyd, T. L., 2016: Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review: *Geothermics*60, 66-93. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
- Lundqvist, T., 1990: *Beskrivning till berggrundskartan över Västernorrlands län*. Sveriges geolo-

- giska undersökning. 429 sid.
- Majer, E. L. & Peterson, J. E., 2007: The impact of injection on seismicity at The Geysers, California Geothermal Field: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44, 1079-1090. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.07.023>
- Malmö Stad, u.å.: *Tjänster & blanketter*. Hämtad 2017/05/06, från <http://malmo.se/Tjanster--blanketter.html>
- Massachusetts Institute of Technology, 2006: *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century : an Assessment*. Massachusetts Institute of Technology. 372 sid.
- Massachusetts Institute of Technology, u.å.: *EGS MODELING for WINDOWS*. Hämtad 2017/05/05, från <http://web.mit.edu/hjherzog/www/doc/doc.html>
- Mindat, u.å.: *Glossary*. Hämtad 2017/05/03, från <https://www.mindat.org/glossary.php>
- Moczyłowska, M., Pease, V., Willman, S., Wickström, L. & Agić, H., 2017: A Tonian age for the Visingsö Group in Sweden constrained by detrital zircon dating and biochronology: implications for evolutionary events: *Geological Magazine*, 1-15. doi: 10.1017/S0016756817000085
- Naturvårdsverket, 2003: Tillståndsprövning och anmälan avseende miljöfarlig verksamhet. *Rapport*, 149 sid. Stockholm.
- Naturvårdsverket, 2008: Vattenverksamheter. *Rapport*, 133 sid. Stockholm.
- Naturvårdsverket, u.å.: *Sveriges miljömål*. Hämtad 2017/05/06, från <http://www.miljomal.se/Miljomalen/>
- Norbeck, J. H., 2016. HYDROMECHANICAL AND FRICTIONAL FAULTING BEHAVIOR OF FLUID-INJECTION-INDUCED EARTHQUAKES. *Rapport*, 260 sid. Stanford University.
- Persson, K., Johansson, R., Mellqvist, C. & Bergman, T., 2014: *Beskrivning till berggrundskartan Sundsvall–Timrå–Härnösand*. Sveriges Geologiska Undersökning. 28 sid.
- Pilkington, M. & Grieve, R. A. F., 1992: The geophysical signature of terrestrial impact craters: *Reviews of Geophysics* 30, 161.
- Potter, R., Robinson, E. & Smith, M., 1974: Method of extracting heat from dry geothermal reservoirs. *Report Number: US 3786858*, Google Patents, United States.
- Qi, L., Chih-Shiue, Y., Yufei, M., Joseph, L., Szczesny, K., Ho-Kwang, M. & Russell, J. H., 2009: Enhancing the mechanical properties of single-crystal CVD diamond: *Journal of Physics: Condensed Matter* 21, 364215
- Ramachandran, K., Yevesaran, B., Kadirgama, K., Ramasamy, D., Che Ghani Saiful, A. & Anamalai, K., 2017: State of art of cooling method for dry machining: *MATEC Web of Conferences, Vol 90, p 01015 (2017)*, 01015. doi: 10.1051/mateconf/20179001015
- Richter, A., 2017: South Korea's first geothermal plant at Pohang could start operation this year. Hämtad 2017/04/29, från <http://www.thinkgeoenergy.com/south-koreas-first-geothermal-plant-at-pohang-could-start-operation-this-year/>
- Riksdagsförvaltningen, u.å.: *Förordning (1998:899) om miljöfarlig verksamhet och hälsoskydd*. Hämtad 2017/05/19, från https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-1998899-om-miljofarlig-verksamhet_sfs-1998-899
- Rojas, F., 2015a: *Chinese firm signs EPC contract for Pohang EGS project in South Korea*. Hämtad 2017/04/29, från <http://www.thinkgeoenergy.com/chinese-firm-signs-epc-contract-for-pohang-egs-project-in-south-korea/>
- Rojas, F., 2015b: *Finnish 40 MW district heating project to be operational in 2017*. Hämtad 2017/04/29, från <http://www.thinkgeoenergy.com/finnish-40-mw-district-heating-project-to-be-operational-in-2017/>
- Rosberg, J.-E., 2010: *Well testing, methods and applicability*. Lund : Engineering Geology, Lund University, 165 sid.
- Rose, P., Mella, M. & McCullough, J., 2006: A COMPARISON OF HYDRAULIC STIMULATION EXPERIMENTS AT THE SOULTZ, FRANCE AND COSO, CALIFORNIA ENGINEERED GEOTHERMAL SYSTEMS, *Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*, Stanford, California, January 30-February, 1, 2006 SGP-TR-179
- Rudmark, L., 1983: *Jordartskartan 5H Borgholm NV/NO*. Uppsala : SGU ; Stockholm : LiberKartor (distr.), 1983 ; (Växjö : Davidsson)
- Rämö, O. T., Lehtinen, M. & Nurmi, P. A., 2005: *Pre-cambrian Geology of Finland : key to the evolution of the Fennoscandian shield*. Elsevier, Amsterdam. 736 sid.
- Schlumberger, 2012: 2012 Annual Report. *Report* 100 sid.
- Schlumberger, u.å.: *Petrel Petrophysical Modeling Build accurate petrophysical models*. Hämtad 2017/05/05, från http://www.software.slb.com/products/petrel/petrel-geology-and-modeling?entry=ad_google_sis_software_petrel&gclid=COTH9_iC2dMCFRdnGQod1CsP0A
- Schwarz, G., 2016: CHPM2030 DELIVERABLE D 1.2 REPORT ON DATA AVAILABILITY

- Rapport*, 241 sid. Hungary.
- Shao, H., Kabilan, S., Stephens, S., Suresh, N., Beck, A. N., Varga, T., Martin, P. F., Kuprat, A., Jung, H. B., Um, W., Bonneville, A., Heldebrant, D. J., Carroll, K. C., Moore, J. & Fernandez, C. A., 2015: Environmentally friendly, rheoreversible, hydraulic-fracturing fluids for enhanced geothermal systems: *Geothermics* 58, 22-31. doi: <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.07.010>
- Sivhed, U., Wikman, H. & Erlström, M., 1999: *Beskrivning till berggrundskartorna 1C Trelleborg NV och NO samt 2C Malmö SV, SO, NV och NO*, Sveriges Geologiska Undersökning, Uppsala. 143 sid.
- Song, Y., Lee, T. J., Jeon, J. & S, Y. W., 2015: Background and Progress of the Korean EGS Pilot Project. *Rapport*, 5 sid. Melbourne
- ST1, u.å.: -a *St1's geothermal heating project approaching pilot plant stage*. Hämtad 2007/04/29, från <http://www.st1.eu/news/st1s-geothermal-heating-project-approaching-pilot-plant-stage>
- ST1, u.å.-b.: *St1 and Fortum to start a pilot project for geothermal heat production in Espoo*. Hämtad 2017/04/30, från <http://www.st1.eu/news/st1-and-fortum-to-start-a-pilot-project-for-geothermal-heat-production-in-espoo>
- ST1, u.å.-c.: *St1 begins the drilling of geothermal deep-rock wells in Otaniemi, Espoo*. Hämtad 2017/04/03, från <http://www.st1.eu/news/st1-begins-the-drilling-of-geothermal-deep-rock-wells-in-otaniemi-espoo>
- Statens Energimyndighet, 2010: Handlingsplan för förnybar energi. *Energimyndigheten Report ER2010:08*, 95 sid. Energimyndigheten.
- Statens Energimyndighet, 2011: *Handlingsplan för förnybar energi*: Hämtad 2017/04/05, från <http://www.energimyndigheten.se/>
- Statens Offentliga Utredningar, 2016: Ett klimatpolitiskt ramverk för Sverige. *Report SOU 2016:21*, 356 sid. SOU, Stockholm.
- Statistics Finland's Px-Web Databases, 2017: *Statistics Finland's PX-Web databases*. Hämtad 2017/04/29, från http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/en/StatFin/StatFin_vrm_vaerak/087_vaerak_tau_134.px/table/tableViewLayout1/?rxid=4c0b75c8-3b11-4d50-a86c-542772d755ac
- Statistiska Centralbyrån, 2016: *Folkmängd i riket, län och kommuner 31 december 2016 och befolkningsförändringar 1 oktober-31 december 2016*. Hämtad 2017/05/19, från <http://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/befolkning/befolkningens-sammanstallning/befolkningsstatistik/pong/tabell-och-diagram/kvartals-och-halvarsstatistik-kommun-lan-och-riket/kvartal-4-2016/>
- Stephens, M. B., 2010: *Forsmark site investigation : bedrock geology - overview and excursion guide*. Svensk kärnbränslehantering (SKB), Stockholm. 47 sid.
- Stober, I., Fritzer, T., Obst, K. & Schulz, R., 2011: Tiefe Geothermie Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. *Rapport*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Berlin, 84 sid.
- Stockholms Stad, u.å.: *Gör detta innan du ansöker om tillstånd för värmepump*. Hämtad 2017/05/06, från <http://www.stockholm.se/ByggBo/dinbostad/Varmepumpar/Forberedelser-du-bor-gora-innan-du-ansoker-om-tillstand/>
- Styrud, 2017: *Facktermer*. Hämtad 2017/04/24, från <http://www.styrud.se/facktermer/>
- Styrud, u.å.: *KÄRNBORNING. Rapport*, 2 sid. Sävedalen.
- Sundberg, J., 1988: *Thermal properties of soils and rocks*. Geologiska Institutionen, Göteborg. 327 sid.
- Sundberg, J., Thunholm, B. & Johnson, J., 1985: Värmeöverförande egenskaper i svensk berggrund. *Rapport R97:1985*, 112 sid. Byggforskningsrådet, Stockholm.
- Svensk Kärnbränslehantering AB, 2009: *Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase : SDM-Site Forsmark*. Svensk kärnbränslehantering AB (SKB), Stockholm. 545 sid.
- Sveriges Geologiska Undersökning, 2016: NORMBRUNN –16 VÄGLEDNING FÖR ATT BORRA BRUNN. *Rapport*, 34 sid.
- Sveriges Geologiska Undersökning, u.å.-a: *Brunnsarkivet*. Hämtad 2017/05/13, från <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-brunnar.html>.
- Sveriges Geologiska Undersökning, u.å.-b: *Sveriges berggrund*. Hämtad 2017/05/15 från <https://www.sgu.se/om-geologi/berg/sveriges-berggrund/>
- Sveriges Geologiska Undersökning, u.å.-c: *Geotermi*. Hämtad 2017/05/20, från <https://www.sgu.se/samhallsplanering/energi/fornybar-geoenergi-och-geotermi/geotermi/>
- Statens Offentliga Utredningar, 2016: Ett klimatpolitiskt ramverk för Sverige. *Rapport SOU 2016:21*, 360 sid. Statens Offentliga Utredningar, Stockholm
- Ulusay, R., Aydan, O., Gerçek, H., Hindistan, M. A. & Tuncay, E., 2016: *Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future*. CRC Press/Balkema, Netherlands. 1330 sid.
- Uralmash, 2017: *THE UNBREAKABLE RECORD* Hämtad 2017/04/28, från <https://www.uralmash.ru/en/about/history/the-unbreakable-record/>
- U.S Department of Energy, 2012a: What is an Enhanced Geothermal System (EGS)? *Rapport*, 2 sid. U.S Department of Energy.
- U.S Department of Energy, 2012b: Annual report 2012, year in review. *Rapport*, 6 sid. Geother-

- mal Technology Office
- U.S Department of Energy, 2013: *AltaRock Energy Announces Successful Multiple-Zone Stimulation of Well at the Newberry Enhanced Geothermal Systems Demonstration*. Hämtad 2017/05/05, från <https://www.energy.gov/eere/geothermal/articles/altarock-energy-announces-successful-multiple-zone-stimulation-well>
- U.S Department of Energy, u.å.-a: *LOW-TEMPERATURE AND COPRODUCED*. Hämtad 2017/04/21, från <https://www.energy.gov/eere/geothermal/low-temperature-and-coproduced>
- U.S Department of Energy, u.å.-b: *ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEMS DEMONSTRATION PROJECTS*. Hämtad 2017/04/30, från <https://energy.gov/eere/geothermal/enhanced-geothermal-systems-demonstration-projects>
- U.S. Department of Energy, u.å.-c: *GEOHERMAL BASICS*. Hämtad 2017/04/18, från <https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics>
- Wallroth, T., 1992: *Hydromechanical breakdown of crystalline rock : a study based on experiments on hot dry rock geothermal energy*. Chalmers tekniska högskola; Geologiska Institutionen, Göteborg, 217 sid.
- Wallroth, T., 1994: Geotermisk energiutvinning ur kristallint berg, hot dry rock. *Etapprapport 1993/94*. 73 sid. Chalmers tekniska högskola; Geologiska Institutionen, Göteborg.
- Wallroth, T., Alm, P., Lindblom, U. & Olsson, R., 1996: Hot dry rock geothermal energy - Joule II. *Final report*. 7 sid. Chalmers tekniska högskola & Göteborgs universitet; Geologiska Institutionen, Göteborg.
- Wassara, u.å.: *Technology*. Hämtad 2017/04/20, från <http://www.wassara.com/Technology/>
- Wasserburg, G. J., Gordon, J. F. M., Hoyle, F. & Fowler, W. A., 1964: Relative Contributions of Uranium, Thorium, and Potassium to Heat Production in the Earth. *American Association for the Advancement of Science*. 143 (3605):465-7
- Wastenson, L. & Fredén, C., 2002: *Sveriges nationalatlas. [Kartografiskt material]*. Vällingby, Sveriges nationalatlas (SNA), Vällingby. 208 sid.
- Watson, B. A., 2016: FRACKING AND CRACKING : STRICT LIABILITY FOR EARTHQUAKE DAMAGE DUE TO WASTEWATER INJECTION AND HYDRAULIC FRACTURING: *Texas Journal of Oil, Gas & Energy Law* 11, 1-29.
- Wohletz, K. & Heiken, G., 1992: *Volcanology and geothermal energy*. University of California Press, 432 sid.
- Vattenfall, 2017: *Vattenfalls kraftverk*. Hämtad 2017/04/09, från <http://kraftverk.vattenfall.se/#/types=Coal/view=list/sort=name>
- Wikipedia, 2006: The 120-MWe Nesjavellir power station in southwest Iceland. Hämtad 2017/05/21, från https://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_power#/media/File:NesjavellirPowerPlant_edit2.jpg.
- Wikipedia, 2009: *Geothermie Prinzip.svg*, hämtad 2017/04/16, från <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=82497111>
- Wikipedia, 2013: *HydroFrac.png*. Hämtad 2017/05/15, från <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HydroFrac.png>. *JOURNAL INTERNATIONAL*, 215.
- Zillman, D., Lucas, A. & Beirne, S., 2015: 2014: An eventful year for energy law and policy: *Journal of Energy & Natural Resources Law* 33, 82.
- Åström, K., 1998: Seismic signature of the Lake Mien impact structure, southern Sweden: *GEO-PHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL*, 215.

Tidigare skrifter i serien

”Examensarbeten i Geologi vid Lunds universitet”:

462. Lundberg, Frans, 2016: Cambrian stratigraphy and depositional dynamics based on the Tomten-1 drill core, Falbygden, Västergötland, Sweden. (45 hp)
463. Flindt, Anne-Cécile, 2016: A pre-LGM sandur deposit at Fiskarheden, NW Dalarna - sedimentology and glaciotectionic deformation. (45 hp)
464. Karlatou-Charalampopoulou, Artemis, 2016: Vegetation responses to Late Glacial climate shifts as reflected in a high resolution pollen record from Blekinge, south-eastern Sweden, compared with responses of other climate proxies. (45 hp)
465. Hajny, Casandra, 2016: Sedimentological study of the Jurassic and Cretaceous sequence in the Revinge-1 core, Scania. (45 hp)
466. Linders, Wictor, 2016: U-Pb geochronology and geochemistry of host rocks to the Bastnäs-type REE mineralization in the Riddarhyttan area, west central Bergslagen, Sweden. (45 hp)
467. Olsson, Andreas, 2016: Metamorphic record of monazite in aluminous migmatitic gneisses at Stensjöstrand, Sveconorwegian orogen. (45 hp)
468. Liesirova, Tina, 2016: Oxygen and its impact on nitrification rates in aquatic sediments. (15 hp)
469. Perneby Molin, Susanna, 2016: Embryologi och tidig ontogeni hos mesozoiska fisködlor (Ichthyopterygia). (15 hp)
470. Benavides Höglund, Nikolas, 2016: Digitization and interpretation of vintage 2D seismic reflection data from Hanö Bay, Sweden. (15 hp)
471. Malmgren, Johan, 2016: De mellankambriska oelandicuslagren på Öland - stratigrafi och facietyper. (15 hp)
472. Fouskopoulos Larsson, Anna, 2016: XRF - studie av sedimentära borrhärdar - en metodikstudie av programvarorna Q-spec och Tray-sum. (15 hp)
473. Jansson, Robin, 2016: Är ERT och Tidsdomän IP potentiella karteringsverktyg inom miljögeologi? (15 hp)
474. Heger, Katja, 2016: Makrofossilanalys av sediment från det tidig-holocena undervattenslandskapet vid Haväng, östra Skåne. (15 hp)
475. Swierz, Pia, 2016: Utvärdering av vattenkemisk data från Borgholm kommun och dess relation till geologiska förhållanden och markanvändning. (15 hp)
476. Mårdh, Joakim, 2016: WalkTEMundersökning vid Revingehed provpumpningsanläggning. (15 hp)
477. Rydberg, Elaine, 2016: Gummigranulat - En litteraturstudie över miljö- och hälsopåverkan vid användandet av gummigranulat. (15 hp)
478. Björnfors, Mark, 2016: Kusterosion och äldre kustdyners morfologi i Skälderviken. (15 hp)
479. Ringholm, Martin, 2016: Klimatutlöst matbrist i tidiga medeltida Europa, en jämförande studie mellan historiska dokument och paleoklimatarxiv. (15 hp)
480. Teilmann, Kim, 2016: Paleomagnetic dating of a mysterious lake record from the Kerguelen archipelago by matching to paleomagnetic field models. (15 hp)
481. Schönström, Jonas, 2016: Resistivitetsoch markradarmätning i Ängelholmsområdet - undersökning av korrosiva markstrukturer kring vattenledningar. (15 hp)
482. Martell, Josefin, 2016: A study of shockmetamorphic features in zircon from the Siljan impact structure, Sweden. (15 hp)
483. Rosvall, Markus, 2016: Spår av himlakroppskollisioner - bergarter i nedslagskratrar med fokus på Mien, Småland. (15 hp)
484. Olausson, My, 2016: Resistivitets- och IPmätningar på den nedlagda deponin Gustavsfält i Halmstad. (30 hp)
485. Plan, Anders, 2016: Markradar- och resistivitetsmätningar – undersökningar utav korrosionsförhöjande markegenskaper kring fjärrvärmeledningar i Ängelholm. (15 hp)
486. Jennerheim, Jessica, 2016: Evaluation of methods to characterise the geochemistry of limestone and its fracturing in connection to heating. (45 hp)
487. Olsson, Pontus, 2016: Ekologiskt vatten från Lilla Klåveröd: en riskinventering för skydd av grundvatten. (15 hp)
488. Henriksson, Oskar, 2016: The Dynamics of Beryllium 10 transport and deposition in lake sediments. (15 hp)
489. Brådenmark, Niklas, 2016: Lower to Middle

- Ordovician carbonate sedimentology and stratigraphy of the Pakri peninsula, north-western Estonia. (45 hp)
490. Karlsson, Michelle, 2016: Utvärdering av metoderna DCIP och CSIA för identifiering av nedbrytningszoner för klorerade lösningsmedel: En studie av Färgaren 3 i Kristianstad. (45 hp)
491. Elali, Mohammed, 2016: Flygsanddyners inre uppbyggnad – georadarundersökning. (15 hp)
492. Preis-Bergdahl, Daniel, 2016: Evaluation of DC Resistivity and Time-Domain IP Tomography for Bedrock Characterisation at Önnelöv, Southern Sweden. (45 hp)
493. Kristensson, Johan, 2016: Formation evaluation of the Jurassic Stø and Nordmela formations in exploration well 7220/8-1, Barents Sea, Norway. (45 hp)
494. Larsson, Måns, 2016: TEM investigation on Challapampa aquifer, Oruro Bolivia. (45 hp)
495. Nylén, Fredrik, 2017: Utvärdering av borrhålskartering avseende kalksten för industriella ändamål, File Hajdarbrottet, Slite, Gotland. (45 hp)
496. Joakim, 2017: A geophysical survey (TEM; ERT) of the Punata alluvial fan, Bolivia. (45 hp)
497. Skoglund, Wiktor, 2017: Provenansstudie av detritala zirkoner från ett guldförande alluvium vid Ravlunda skjutfält, Skåne. (15 hp)
498. Bergcrantz, Jacob, 2017: Ett fönster till Kattegatts förflutna genom analys av bottenlevande foraminiferer. (15 hp)
499. O'Hare, Paschal, 2017: Multiradionuclide evidence for an extreme solar proton event around 2610 BP. (45 hp)
500. Goodship, Alastair, 2017: Dynamics of a retreating ice sheet: A LiDAR study in Värmland, SW Sweden. (45 hp)
501. Lindvall, Alma, 2017: Hur snabbt påverkas och nollställs luminiscenssignaler under naturliga ljusförhållanden? (15 hp)
502. Sköld, Carl, 2017: Analys av stabila isotoper med beräkning av blandningsförhållande i ett grundvattenmagasin i Älvkarleby-Skutsjär. (15 hp)
503. Sällström, Oskar, 2017: Tolkning av geofysiska mätningar i hammarborrhål på södra Gotland. (15 hp)
504. Ahrenstedt, Viktor, 2017: Depositional history of the Neoproterozoic Visingsö Group, south-central Sweden. (15 hp)
505. Schou, Dagmar Juul, 2017: Geometry and faulting history of the Long Spur fault zone, Castle Hill Basin, New Zealand. (15 hp)
506. Andersson, Setina, 2017: Skalbärande marina organismer och petrografi av tidigcampanska sediment i Kristianstadsbassängen – implikationer på paleomiljö. (15 hp)
507. Kempengren, Henrik, 2017: Föroreningsspridning från kustnära deponi: Applicering av Landsim 2.5 för modellering av lakvattentransport till Östersjön. (15 hp)
508. Ekborg, Charlotte, 2017: En studie på samband mellan jordmekaniska egenskaper och hydrodynamiska processer när erosion påverkar släntstabiliteten vid ökad nederbörd. (15 hp)
509. Silvé, Björn, 2017: LiDARstudie av glaciala landformer sydväst om Söderåsen, Skåne, Sverige. (15 hp)
510. Rönning, Lydia, 2017: Ceratopsida dinosauriers migrationsmönster under krittiden baserat på paleobiogeografi och fylogeni. (15 hp)
511. Engleson, Kristina, 2017: Miljökonsekvensbeskrivning Revinge brunnsfält. (15 hp)
512. Ingered, Mimmi, 2017: U-Pb datering av zirkon från migmatitisk gnejs i Delsjöområdet, Idefjordenterrängen. (15 hp)
513. Kervall, Hanna, 2017: EGS - framtidens geotermiska system. (15 hp)



LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen
Lunds universitet
Sölvegatan 12, 223 62 Lund