

GEOENERGI

Geologisk information användbar för bedömning och design av geoenergianläggningar – en översikt

Claes Mellqvist, Mikael Erlström, Gerhard Schwarz, Mattias Gustafsson & Peter Dahlqvist

juni 2015

SGU-rapport 2015:24



SGU

Sveriges geologiska undersökning
Geological Survey of Sweden

Omslagsbild: Exempel på borrhålslager för säsongslagring av både värme och kyla. Illustration: Anna Jonson, ArtAnna.

Sveriges geologiska undersökning
Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-17 9000
fax: 018-17 92 10
e-post: sgu@sgu.se
www.sgu.se

INNEHÅLL

Sammanfattning	5
English summary	5
Inledning och bakgrund	6
Olika typer av anläggningar	8
Bergvärme	8
Borrhålslager	9
Jordvärme	10
Grundvattenvärme	10
Akviferlager	11
Vattenvärme	11
Geotermi	12
Brunnstyper	13
Exempel på SGUs information	14
Berggrunden	15
Berggrundens uppbyggnad och egenskaper	15
Bergarternas mineralogiska sammansättning	18
Geofysiska parametrar	18
Mätning och analys av de termiska egenskaperna	23
Jordlagren	25
Jordlagrens termiska egenskaper	25
Jordlagrens mäktighet	26
Grundvattnet	28
Grundvattendata	30
Hydrogeologiska kartor	30
Vattenskyddsområden	31
Förorenad mark	32
Geologiska och fysiska faktorerers inverkan på geoenergisystem	33
Värmeledning	33
Termisk påverkan	34
Exempel på bearbetad SGU-information	34
Kartor för värmeledning – bergarter	36
Värmeledningskarta för Stockholm	36
Värmeledningskarta för Skåne	37
Utvärdering av värmeledningskartor	39
Jorddjupsmodell för Skåne	41
Datorgenererad jorddjupsmodell	41
Manuellt framtagen jorddjupsmodell	41
Utvärdering av jorddjupsmodeller	41
Bergarter och geoenergiborrning i skånsk berggrund	45
Diskussion	47
Tack	50
Referenser	50

SAMMANFATTNING

Denna rapport ger en överblick av vilka typer av geologisk information som kan användas för att bedöma förutsättningarna för geoenergi i Sverige. Syftet är att ge en samlad bild av vilken typ av information som SGU kan tillhandahålla och vilka utvecklingsinsatser som pågår inom området. I rapporten redovisas även förslag till olika utvecklingsprojekt som behövs för att öka kunskapen om bl.a. termisk påverkan och hur grundvattnet påverkas av geoenergianläggningar.

De möjligheter och problemställningar kring geoenergi som belyses i rapporten härrör från det ökade antalet frågor i ämnet som SGU får från andra myndigheter, branschorganisationer och allmänhet. Det finns ett stort behov av råd och riktlinjer för bedömning av design, tillstånd, tillsyn och miljöpåverkan (t.ex. grundvatten, termisk påverkan, föroreningar) i samband med geoenergi. Rapporten kan ses som en delredovisning av ett pågående arbete med dessa frågor. Underlaget som presenteras i rapporten kan också ses som ett underlag till ökat samarbete med andra myndigheter och organisationer för att kunna besvara olika frågor om geoenergi.

Hittills saknar vi i Sverige, i motsats till andra europeiska länder, en tydlighet i hur tillstånd och tillsyn av geoenergianläggningar ska hanteras och av vem. Ett exempel är hur den termiska rådgivningen, eller förfoganderätten, hanteras för den värme som finns i jord, berg och grundvatten. SGU anser att det finns ett stort behov av en samordnande, nationell funktion som är bemyndigad att driva tillstånds- och tillsynsfrågor och som kan förmedla råd och riktlinjer i samband med anläggning av geoenergi. Vårt förslag är att SGU kan ha en sådan nationell funktion.

ENGLISH SUMMARY

This report provides an overview of different types of geological information relevant to the assessment of the conditions for shallow geothermal energy in Sweden. The aim is to present an overall picture of the type of information that SGU can provide and the on-going development. The report also proposes various R & D projects that are needed to increase knowledge about e.g. thermal effects and how groundwater is affected.

The opportunities and problems concerning geothermal energy as highlighted in the report are derived from the increased number of issues that SGU receives from other agencies, industry associations and the public. Generally, these issues demonstrate a great need for advice and guidance on the assessment of design, permits, supervision, and environmental hazards (e.g. groundwater, thermal effects, pollution). This report may be seen as a further step in working on these issues. The documentation presented can also be seen as a basis for cooperation with other agencies and organizations to answer these questions.

So far, we lack in Sweden, in contrast to other European countries, a clarity how permits and supervision of shallow geothermal plants are conducted and which authority owns the question, e.g. who owns the heat resources in the soil, rock and groundwater. SGU considers that there is a great need for a coordinated function that is authorized to pursue the matter and that can convey advice and guidance on various issues related to shallow geothermal energy. Our proposal is that SGU could act as such a national function.

INLEDNING OCH BAKGRUND

Begreppet geoenergi är i Sverige vanligen förknippat med utnyttjande av den energi som finns lagrad i jord, berg och grundvatten och den periodvisa lagringen av överskottsvärme eller -kyla i den övre delen av jordskorpan. I den övre delen av jordskorpan, ner till ett tiotal meter, är temperaturvariationer i marken i hög grad årstidsberoende av solens uppvärmning (t.ex. Eskilson 1987, Fetter 2001). Därunder är temperaturen i jordskorpan beroende av värme från jordens inre (t.ex. Signorelli 2004, Banks 2008). När värme utnyttjas från större djup än ca 400 m, används i stället begreppet geotermi. I Sverige har geotermi störst förutsättningar i sedimentär berggrund där t.ex. varmt formationsvatten i djupt liggande porösa och permeabla sandstenslager kan utnyttjas.

Sverige ligger i ett stabilt urbergsområde med tjock jordskorpa. Här har vi inte samma höga geotermiska gradient som i länder med andra geologiska förutsättningar – t.ex. områden med tunn jordskorpa eller tektoniskt aktiva områden, som i södra Europa och på Island. I Sverige varierar temperaturen i marken ner till några tiotals meters djup mellan ca 3 °C och 10 °C. Därunder ökar temperaturen med 15–30 °C/km. Temperaturgradienten är något högre i sedimentära berggrundsområden i jämförelse med den i urbergsområden. För att nå temperaturer lämpliga för elproduktion, högre än 120 °C, krävs i Sverige borrhningar till 5–7 km djup. Detta medför stora investeringskostnader och osäkerheter vid genomförandet, t.ex. om vattnets rörlighet, mängd och kvalitet vid dessa djup. I Sverige används därför än så länge geotermi för uppvärmningsändamål endast i ett fåtal områden där det går att finna djupt liggande sprick- eller porakviferer, t.ex. förkastningszoner och sandsten, med 20–70-gradigt vatten. Geotermiska system är dessutom oftast anpassade till storskalig uppvärmning vilket kräver fjärrvärmesystem eller industrier till vilka värmen kan överföras. Detta gör att geotermi är relativt begränsad till platser där dessa olika förutsättningar sammanfaller, till skillnad mot tillämpningen av den grunda geoenergin.

Även gas, olja, torv och kol ingår, med ett geologiskt definitionssätt, i begreppet geoenergi. Internationellt förknippas kol, olja och gas nästan entydigt med begreppet ”geoenergy”. För att särskilja begreppen bör man därför använda begreppet förnybar geoenergi om energi från jord, berg och grundvatten. Energimyndigheten angav också 2007 att jord-, berg- och grundvattenvärme tillhör gruppen förnybara energislag. Förnybara energikällor förknippas, för det stora flertalet, med vatten-, vind-, sol- och bioenergi. Däremot får den förnybara geoenergin oftast relativt liten uppmärksamhet som en betydelsefull energiresurs i förhållande till övriga energikällor.

Sverige är sedan slutet av 1900-talet ledande i Europa vad gäller värmepumpsteknik och antalet anläggningar med förnybar geoenergi. Potentialen för denna resurs bedöms framför allt av entreprenörer vara mycket stor, bl.a. av branschorganisationen Geotec, som med stöd av ett antal experter tagit fram en övergripande rapport (Barth m.fl. 2012) som beskriver den förnybara geoenergin, dess andel av energianvändningen och vilka förutsättningar som finns i Sverige. I rapporten presenteras bland annat statistik över antalet anläggningar och effekter på koldioxidutsläpp, elanvändning m.m.

Det finns emellertid behov av en objektiv bedömning av förutsättningarna för utbyggnad av förnybar geoenergi ur ett hållbarhetsperspektiv. En fortsatt utbyggnad kan t.ex. medföra att det ökande antalet värmepumpar gör oss ytterligare elberoende. Den kan även begränsa utbyggnaden av större fjärrvärmenät och eventuellt påverka grundvattnet negativt. Man har hittills sett den förnybara geoenergin som en ersättning, till stor del, för uppvärmning med fossila bränslen eller el men i ett längre perspektiv bör en mer nyanserad bild tas fram av effekterna av en fortsatt expansion. En kombination av förnybar geoenergi med grön el är t.ex. ett framtida önskvärt scenario, som bland annat behandlas i ett EG-direktiv om användning av energi från förnybara energikällor (EG 2009).

Förnybar geoenergi och geotermi bidrar inte idag till elproduktionen i Sverige, eftersom systemen är s.k. lågtemperatursystem. Men även om det inte produceras någon el i våra geoenergi- och geotermianläggningar, avlastar de användningen av direktverkande el som används för uppvärmning. På våra breddgrader utgör uppvärmning en stor del av behovet vilket gör förnybar geoenergi till en mycket lämplig energiform. Dessutom har förnybar geoenergi den fördelen att den inte är lokalt begränsad eftersom förutsättningar finns överallt i landet. Möjligheten till ett utnyttjande bestäms dock av ett antal faktorer som till stor del styrs av de lokala geologiska förutsättningarna, förutom samhällsfaktorer som infrastruktur, vattenskyddsområden, bebyggelse m.m.

Det finns idag ett stort antal förnybara geoenergisystem i Sverige. Uppgifter om mellan 500 000 och 800 000 befintliga småskaliga anläggningar nämns i olika sammanhang. För att uppnå EUs klimatmål med halverade utsläpp av växthusgaser från 1990 års nivå till år 2050 krävs också ett ökat användande av förnybara energislag. Men en fortsatt utbyggnad av den förnybara geoenergin måste då ske på ett hållbart sätt, både med tanke på elanvändning till värmepumpar och hur samspelet med andra intressen som t.ex. grundvattenskydd fungerar.

En viktig del för att uppnå en hållbar utbyggnad av förnybar geoenergi är kunskap om de platsspecifika geologiska förutsättningarna. Idag baseras tyvärr utformningen av anläggningarna ofta på bristfälliga geologiska underlag om t.ex. jorddjup, grundvattenförhållanden och markens värmeledande egenskaper. Metodik och kunskap samt beräkningsmodeller för termisk påverkan har inte hunnit ikapp den snabba utbyggnad som skett. Det gäller inte minst de stora brunnsparter med ibland hundratals borrhål för både värme och kyla som nu byggs runt om i landet. Beräkningar av borrhål, effektuttag och påverkansområde görs ofta på standardiserade och schematiska värden på värmeledningsförmåga och markens övriga egenskaper, främst grundvattenförhållanden. En felaktig design kan resultera i dyra borkostnader, termisk kortslutning, påverkade grundvattenmagasin och för stor termisk påverkan av omgivningen. När detta inträffar får det stora ekonomiska och miljömässiga effekter och risk för en negativ inställning till dessa energisystem.

För att kunna besvara frågor om förnybar geoenergi har SGU påbörjat ett arbete med att ta fram och tillhandahålla information som är anpassad för att bedöma förutsättningarna i Sverige. I detta arbete ingår att ta fram riktlinjer för borrhållning (Normbrunn), en nationell jorddjupsmodell och information om berggrundens termiska egenskaper. Det senare baseras bl.a. på mineralogiska data och analys av bergarters termiska egenskaper (ledningsförmåga och termisk diffusion). Som ett led i arbetet med förnybar geoenergi handledde SGU ett mastersarbete vid Lunds universitet där Skåne använts som pilotområde för hur bergarternas termiska egenskaper kan analyseras och användas (Andolfsson 2013).

Olika typer av geoenergianläggningar har kommit att allt mer visa konflikter mellan motstående intressen som man har att ta hänsyn till för att skydda viktiga grundvattentillgångar. Geoenergianläggningar kan t.ex. komma att påverka vattenkvalitet och integriteten mellan olika akviferer. Tryckförändringar, förändringar av vattenkvalitet och kortslutningar av olika magasin samt termiska effekter är några av de faktorer som bör beaktas vid utformningen av geoenergianläggningar. I dessa sammanhang kommer ofta frågan om återfyllning och tätning av borrhål upp.

Vidare efterfrågas kunskap och lämplig metodik för att bedöma den termiska påverkan i berggrunden, t.ex. hur djupt man bör borra för att få optimal effekt för ändamålet. Frågor om den termiska påverkan i berggrunden är särskilt svåra att besvara när det rör sig om sedimentär berggrund med en lagerserie som består av flera olika bergarter med varierande termiska och fysikaliska egenskaper. Vi vet idag att porositet, grundvattenströmning och mineralogi kraftigt påverkar de termiska egenskaperna i berget. Dessa påverkar i sin tur hur mycket energi man får ut av en anläggning och hur stort påverkansområdet blir.

Vid dimensionering av bergvärmesystem används i regel standardiserade modellantaganden eller, vid större anläggningar, också s.k. TRT-mätningar (termisk responstest) för att bedöma effektuttaget i borrhål. TRT-mätningar har visat sig ge mätvärden, särskilt för sedimentär berggrund, som skiljer sig från värden som tas fram vid en bedömning utifrån enbart bergarternas termiska egenskaper. För att den förnybara geoenergin ska kunna utvecklas och optimeras som ett hållbart alternativ som energikälla är det därför viktigt att ta fram metodik och modellberäkningar på ett antal fall med olika geologisk uppbyggnad vad gäller berggrund, struktur och grundvattensituation.

Rapporten ger en översikt av pågående utvecklingsarbete och presenterar geologisk information som kan användas som stöd för en del av de frågeställningar som belysts ovan. Rapporten ger bland annat en beskrivning av berggrundens termiska egenskaper där Skåne har, på grund av sin komplexa geologiska uppbyggnad och den stora tillgången på data över området, ingått som pilotområde. Även resultaten från ett SGU-finansierat FoU-projekt avseende bergarternas värmeledningsförmåga i Storstockholm (Schwarz m.fl. 2010) och information från ett omfattande arbete med databasuppbyggnad avseende bergarters termiska egenskaper har ingått (Sundberg m.fl. 1985). Ett annat pågående SGU-finansierat forskningsprojekt syftar till att uppdatera informationen om det djupa temperaturfältet och de termiska parametrarna i Sveriges berggrund, samt att öka kunskapen om Sveriges låg-entalpienergipotential.

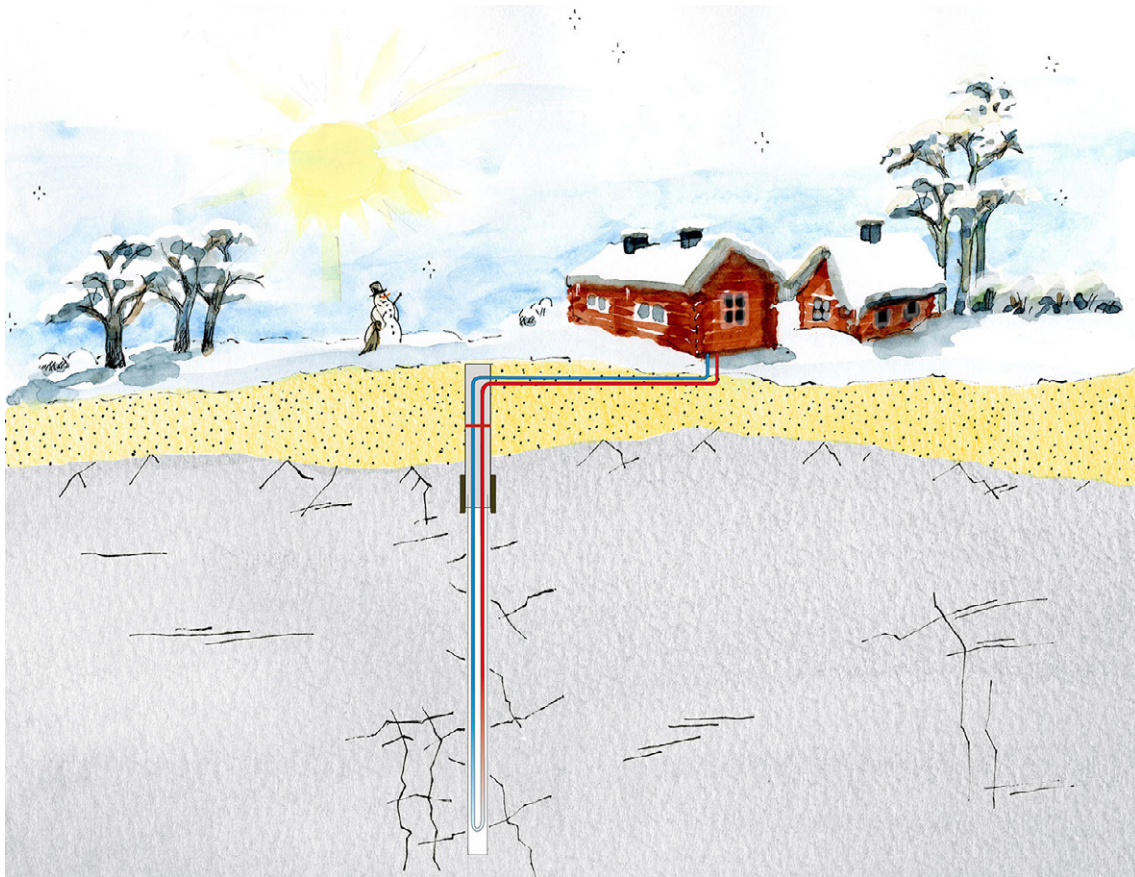
I rapporten presenteras också SGUs medverkan i det europeiska nätverksprojektet Sub-Urban (www.nag-city.com). Sub-Urban är ett fyraårigt projekt som startade 2013 och syftar till kunskapsöverföring mellan olika länders geologiska undersökningar kring tätortsgeologi där också grundvatten- och geoenergifrågor ingår. En övergripande målsättning är att utforma en "Best Practice" för många av dessa frågor. Sub-Urban finansieras av COST (European Cooperation in Science and Technology).

Frågor om termisk rådighet och krav på miljösäkring av borrhål, skydd av grundvattenakviferer samt problem vid borrning och rekommendationer av borrhjup m.m. har blivit allt vanligare från kommuner, myndigheter, entreprenörer och allmänhet. Antalet konfliktärenden och tvister ökar också i takt med att fler anläggningar byggs. Det finns således ett påtagligt behov av råd och riktlinjer samt kompetens för bedömning av påverkan. Generellt behövs mer forskning och utveckling om dessa frågeställningar, som är rent tekniska, ingenjörsmässiga eller geologiska. Framför allt saknas övergripande forskning som behandlar frågor om bäst anpassad teknik (BAT) för karaktärisering och övervakning av system för bergvärme och kyla. För att bedöma och beräkna termisk påverkan och optimera borrhjup kontra energiuttag, krävs forskning inom såväl geologisk som teknisk vetenskap.

OLIKA TYPER AV ANLÄGGNINGAR

Bergvärme

Bergvärme är den vanligaste formen av geoenergi i Sverige. Den används i huvudsak för uppvärmning av villor och till viss del av större fastigheter (fig. 1). Bergvärmebrunnar har oftast en diameter på mellan 115 och 165 mm. I brunnen monteras en kollektorslang som fungerar som värmeväxlare. Brunnsdjupet är vanligen 100–300 m beroende på vilket energiuttag som ska göras och på de geologiska förutsättningarna. Medianvärdet är enligt SGUs brunnsarkiv ca 175 m. I kollektorslangen cirkuleras en köldbärandevätska, oftast bioetanol och vatten. En del av energin i köldbärandevätskan extraheras genom en värmepump så att den förhållandevis låga temperaturen från berget höjs till en användbar temperatur i byggnaden. När systemet är slutet används samma köldbärandevätska hela tiden, vilket medför att underhållet är litet. Vanligen placeras borrhålen med ett avstånd på minst 20 m från varandra, detta för att minimera risken för termisk kortslutning mellan borrhålen. I en del fall, framför allt när flera borrhål används i samma anläggning, kan avståndet mellan borrhålen minskas.

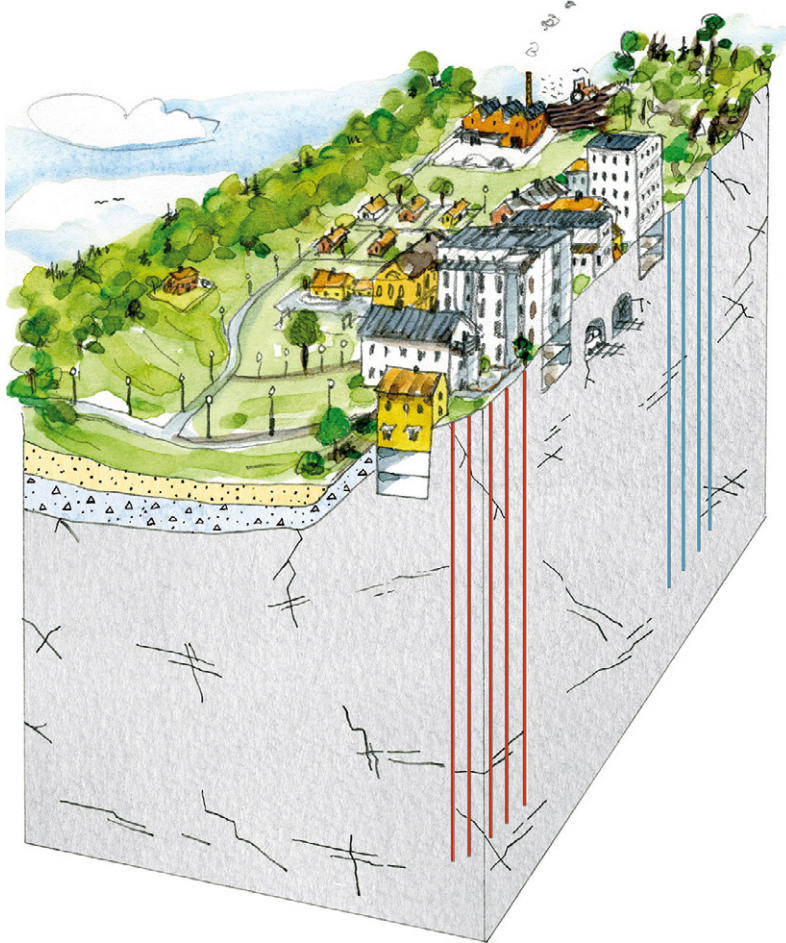


Figur 1. Exempel på bergvärmeanläggning för ett enskilt hushåll. Illustration: Anna Jonson, ArtAnna.

Genom värmen som tas ut ur berget under vintern kyls omgivningen kring bergvärme-hålet. Ur anläggningens effektsynpunkt eftersträvas en balans mellan uttag och återladdning av värme. Återladdningsprocessen beror på den rådande temperaturgradienten i berget och sker kontinuerligt från sidan samt underifrån. Dess storlek är mycket beroende av bergets värmeledningsförmåga. Under sommaren återladdas värmen även med hjälp av solen. Andelen solenergi i ett balanserat system uppgår till några procent (Eskilsson 1987).

Borrhålslager

I ett borrhålslager BTES (Borehole thermal energy storage) baseras funktionen på bergets värmelednings- och värmelagringsförmåga. Antalet borrhål uppgår här till tio- och även hundratals, där varje borrhål har en egen kollektorslang. Fördelen mot ordinär bergvärme är att man med ett stort antal tätt sittande borrhål (några meters inbördes avstånd) skapar förutsättningar för en aktiv säsongslagring av värme och kyla genom att värma respektive kyla en större bergvolym (fig. 2). När värme tas från berggrunden under den kalla årstiden kyls bergmassan ner vilket gör att man under sommaren kan reversera till upptag av kyla och termiskt återladda bergmassan. Systemet blir (upp till en viss gräns) effektivare ju större det är. Borrhålslager kräver inga större ytor och är ofta placerade under t.ex. parkeringsplatser eller grönområden. Dimensionering av systemet med antal hål, djup och inbördes avstånd beror, förutom själva energi-behovets storlek, på de geologiska förhållandena och bergets termiska egenskaper. Det finns även möjlighet att lagra energi genom överskottsvärme från t.ex. industrier, fjärrvärme eller solen.



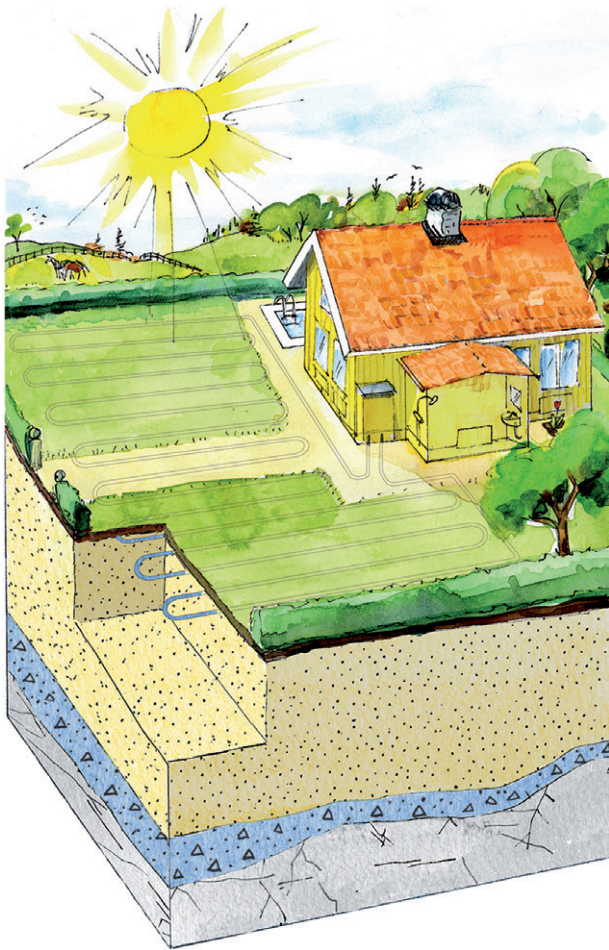
Figur 2. Exempel på borrhålslager (BTES) för säsongslagring av både värme och kyla. Illustration: Anna Jonsson, ArtAnna.

Jordvärme

Jordvärme används i stället för bergvärme i områden med stora jorddjup eller när en större markyta kan utnyttjas. Kollektorslangarna grävs ned på ett djup av ca 1 m (fig. 3). I vissa fall kan även slangarna läggas i flera lager ned till ca 5–10 m djup. Under driften av anläggningen kan marktemperaturen kring slangen sänkas under fryspunkten för vatten, där det frigörs ytterligare värmeenergi som finns i vattnet. Isbildningen kan dock samtidigt innebära en försämring av värmepumpens verkningsgrad. Det ska beaktas att växtlighet ovanför kollektorslangarna kan påverkas genom att temperaturen i marken sänks. Vid användningen av jordvärme, till skillnad från bergvärme, sker återladdningen med värmeenergi i marken under sommaren enbart genom strålningsvärme från solen. Den för höga marktemperaturen under sommarhalvåret medför att systemet inte kan användas för kylning.

Grundvattenvärme

Med grundvattenvärme menas att grundvattnet används som energibärare i stället för kollektorslangar som behövs för berg- eller jordvärmeanläggningar. Det grundvatten som finns i porer och sprickor i jord och berg bildar ett grundvattenmagasin eller akvifer när det finns i tillräckligt stor mängd. Vid tillgång till uttagbara mängder grundvatten, pumpas vattnet upp ur en eller flera brunnar, kyls av och återförs till samma grundvattenmagasin. Systemen kan utföras i större skala och används för både värme och kyla i t.ex. varuhus eller industri.



Figur 3. Exempel på jordvärmeanläggning för ett enskilt hushåll. Illustration: Anna Jonson, ArtAnna.

Akviferlager

I akviferlagersystem ATEs (Aquifer thermal energy storage) används cirkulerande grundvatten som värmebärare och värmelagringen sker i jord, berg och grundvatten (fig. 4). Systemet använder en eller flera kalla respektive varma brunnar. Sommartid, när man behöver komfortkyla, återförs värme genom varmt vatten i systemet, något som sedan används för uppvärmning vintertid. Systemet är slutet och inget vatten förs bort. Förutsatt att grundvattnet i magasinet normalt inte rör sig, förflyttas vatten endast från ett område till ett annat i akviferen.

Vattenvärme

Vattenvärme bygger på principen att en kollektorslang placeras på sjö-, havs- eller åbotten eller nere i botten slammet, där temperaturen generellt är ännu något högre än i vattnet. Funktionen är ungefär densamma som för jordvärme.

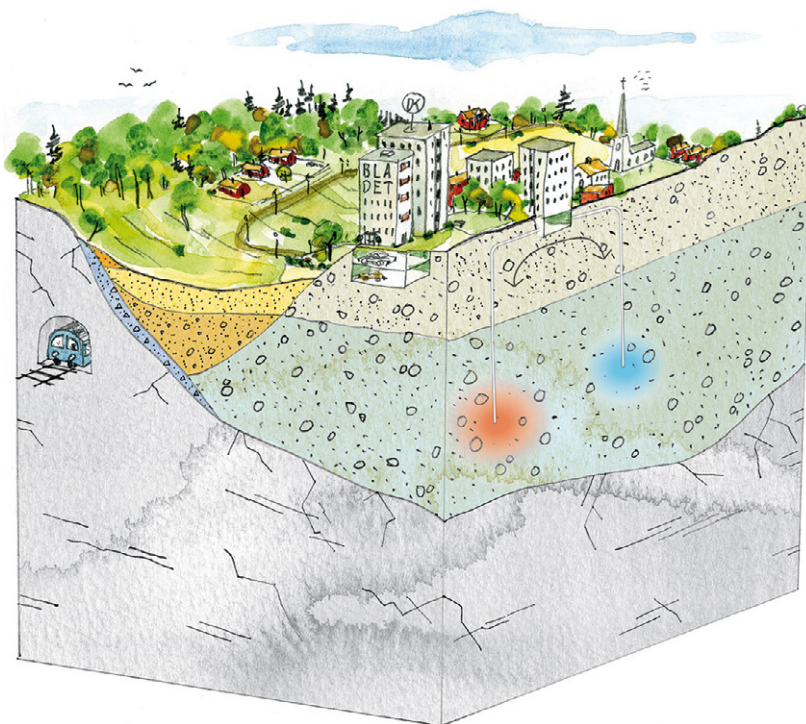
Bottenförankringen är mycket viktig. Slangen förses med tyngder för att förhindra att den flyter upp. Ju djupare den ligger i botten slammet, desto mindre är risken för skador. Om kollektorslangen läggs i sjö- eller havsbotten bör den märkas ut ordentligt. Risken är annars stor att kollektorn skadas av ankare eller fiskeredskap. Även is kan ge upphov till skada om slangen ligger oskyddad i strandkanten. Dessa anläggningar finns i mycket liten omfattning i Sverige och den information som SGU kan bidra med för dessa är mycket begränsad.

Geotermi

Till skillnad från geoenergi, som baseras till en del på värmen som alstras av solen och lagras i jord och berg ner till tiotalet meters djup, utgörs geotermisk energi enbart av värme producerad och transporterad till jordskorpan genom geologiska processer i jordens inre, framför allt radioaktivt sönderfall. Värmen i berggrunden ökar med djupet och normalt ökar temperaturen i svensk berggrund med 15–30 °C/km. Vid en medeltemperatur i markytan på 10 °C är temperaturen på 2 km djup ca 40–70 °C. I andra länder med tunnare jordskorpa eller i områden med vulkanisk eller annan geologisk aktivitet kan temperaturen vara avsevärt högre. I vissa områden, t.ex. på Island, kan el produceras i geotermisystem med höga temperaturer i relativt grunda borrhål där också tillräckligt stora mängder vattenånga påträffas. I Sverige behövs borrhål på motsvarande 5–7 km för att temperaturen i berggrunden ska vara tillräckligt hög för detta.

Geotermisk energi passar utmärkt till framför allt storskaliga system knutna till fjärrvärmesystem. Man kan använda geotermi för både uppvärmning och elproduktion, beroende på den temperatur som grundvattnet har på det aktuella djupet i berggrunden. En förutsättning för att kunna utnyttja den stora värmemängden lagrad i den djupa berggrunden är dock att få upp energin i tillräckligt stor mängd till ytan. De bästa möjligheterna för geotermi finns därför inom områden med sedimentär berggrund där det förekommer djupt liggande akviferer som utgörs av porösa och genomsläppliga sandstenslager. Inom områden med kristallin berggrund krävs antingen naturligt uppsprucken, vattenförande berggrund eller att man lyckas spräcka berggrunden hydrauliskt. En annan möjlighet är att man anlägger ett multihålsystem, men även detta kräver cirkulation av grundvattnet i tillräckligt stor mängd.

Utvinning av geotermisk energi görs genom att pumpa upp grundvattnet från djupa borrhål. Värmen avges i en värmeväxlare och det avkylda grundvattnet återförs till samma djup i berggrunden som det kom ifrån (fig. 5). Kretsloppet är ett slutet system under tryck vilket



Figur 4. Exempel på akviferlager (ATES) i åsmaterial. Illustration: Anna Jonson, ArtAnna.

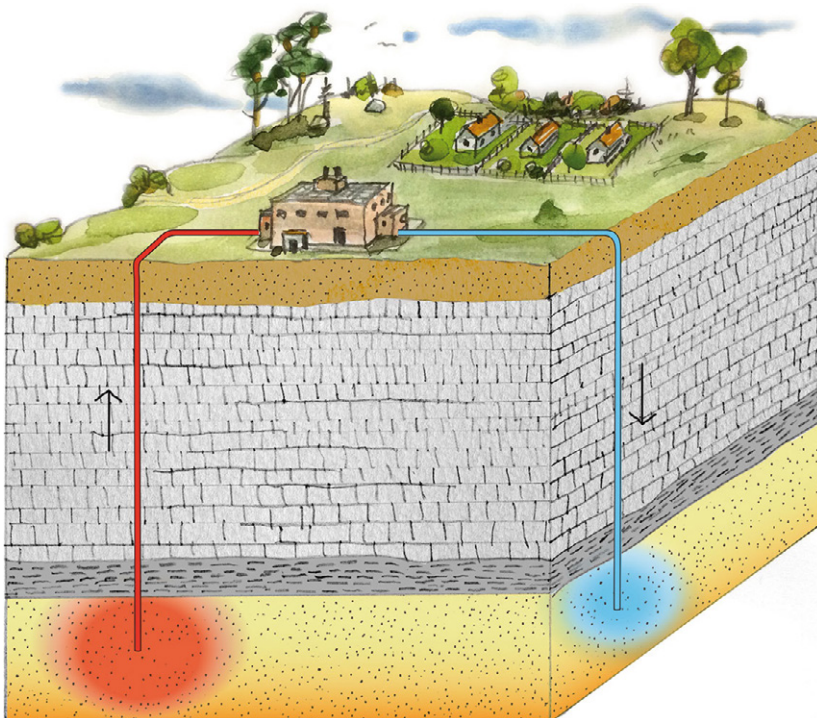
hindrar kemiska utfällningar och utsläpp av gaser som är lösta i vattnet. Borrhålen för produktion och återinjektion placeras på sådant avstånd, oftast någon kilometer från varandra, att den kalla sidan inte kan påverka temperaturen kring produktionsbrunnen under systemets livslängd, normalt 25–30 år. I ett multihålsystem i den kristallina berggrunden cirkulerar däremot vattnet i ett kretslopp, där det kalla återinjekterade vattnet successivt värms upp mot produktionssidan.

I Sverige har geotermi hittills utnyttjats i begränsad omfattning. I Skåne har Lunds kommun haft ett system i gång sedan mitten av 1980-talet och idag försörjs fjärrvärmenätet till en fjärdedel med geotermisk energi. Här utnyttjas ca 22-gradigt grundvatten från sandstenslager på 400–800 m djup. Anläggningen har en effekt på 45 MW och har sedan starten producerat 7 210 GWh värme, motsvarande energiinnehållet i 800 000 m³ olja och ett minskade koldioxidutsläpp med ca 1,3 miljoner ton. Andra, liknande projekt har varit på gång i Skåne men har ännu inte realiserats. I Köpenhamn finns sedan 2004 ett system där drygt 60-gradigt vatten från 2 400 m djup utnyttjas.

Förutom i Skåne kan förutsättningar för geotermi i sedimentär berggrund framför allt finnas på Gotland och i Siljansområdet, även om de termiska parametrarna inte är lika gynnsamma här. I kristallin berggrund har forskning och tester utförts på Björkö väster om Stockholm (Henkel m.fl. 2004) och i Göteborgsområdet (HDR-projektet, hot dry rock, Wallroth m.fl. 1999). Testborrningar i djupa förkastningszoner har utförts i Lund (Bjelm & Rosberg 2006).

Brunnstyper

Det finns fyra huvudtyper av brunnskonstruktioner som används i Sverige: bergborrade brunnar, filterbrunnar, grävda brunnar och rörspetsar. Valet av brunnskonstruktion bestäms av de geologiska förutsättningarna samt kvantitets- och kvalitetskraven. För geoenergi används bergborrade brunnar för slutna bergvärmesystem. I de fall man väljer att använda grundvatten



Figur 5. Exempel på geotermianläggning där ett permeabelt lager i en sedimentär bergartssekvens utnyttjas för värmeutbyte. Illustration: Anna Jonson, ArtAnna.

(öppna system) i jordlager är filterbrunnar den vanligaste typen. I områden med sedimentär berggrund med god vattenföring kan även bergborrade brunnar användas till öppna system. Grävda brunnar och rörspetsbrunnar används sällan för geoenergi.

I en bergborrad brunn utnyttjas berggrunden som vattenmagasin. I de flesta fall används tryckluftsdreven sänkhammare med en kombination av rotation och slag. En bergborrad brunn utförs i två steg:

- Steg 1 innebär borrning genom jordlagren ner till fast berg. Den vanligaste metoden vid denna borrning kallas odex-metoden som innebär att foderrören drivs ner samtidigt med borrningen. Foderrören bör drivas ner minst 2 m i fast berg för att man ska kunna försäkra sig om att de ytligast liggande sprickorna i berget passeras. Därefter gjuts foderrören fast i berget med cement. Gjutningen görs för att täta mellan foderröret och berget. Tätningen förhindrar att ytligt liggande grundvatten samt jord och bergmaterial tränger in i borrhålet. Vid små jorddjup är det extra viktigt att borra ner foderrören djupt i berg eftersom risken för förorening i allmänhet ökar med minskat jorddjup. I Normbrunn-07 (SGU 2008) föreskrivs att det minsta avståndet med foderrör, från markytan räknat, ska vara 6 m.
- Steg 2 innefattar borrning av själva brunnen i berggrunden tills tillräckligt borrhålsdjup uppnåtts. För bergborrade brunnar är de vanligast förekommande dimensionerna 4,5" (115 mm), 5,5" (140 mm) eller 6,5" (165 mm). Observera att det är diametern på borrkronan. Borrhålet kan ha större diameter i dåligt konsoliderad berggrund, företrädesvis i sedimentär berggrund eller lervittrade zoner i kristallint urberg.

Bergborrade brunnar är den vanligaste brunnstypen idag. I kristallin berggrund brukar denna brunnstyp normalt ge 100–1000 l vatten per timme. Om större sprickzoner påträffas kan dock kapaciteten vara avsevärt högre. Effektiviteten hos slutna geoenergisystem beror till viss del på vattenföringen i berget, men framför allt måste det finnas vatten eller återfyllningsmaterial i borrhålet som möjliggör överföringen av värmen från borrhålsväggen (berggrunden) till kollektorn. Grundvattennivåns läge spelar därför en betydligt större roll än brunnens vattenkapacitet. Ett grundvattenflöde, antingen mellan olika nivåer i borrhålet eller i akviferer som borrhålet penetrerar, kan höja borrhålets energieffektivitet avsevärt. Vid borrning genom eller i saltvat-tenakviferer råder försiktighetsprincipen och stor hänsyn ska tas så att vatten från olika akviferer inte blandas.

Filterbrunnar anläggs i huvudsak i grova porösa jordlager som sand och grus. I vissa fall kan de även anläggas i uppsprucket ytberg eller i sedimentära bergarter med god vattentillgång. Brunnskonstruktionen har fått sitt namn av att intaget av vatten sker genom slitsade plast- eller rostfria stålrör vilka benämns filter eller sil. Slitsens bredd anpassas efter kornstorleksfördelningen i jordlagren för att förhindra att material kommer in i brunnen. Eftersom filterbrunnar ofta ger stora mängder vatten används de i samband med akviferlagring av värme eller i större grundvattenvärmeanläggningar som anläggs i jordlager och vissa typer av lös sedimentär berggrund.

EXEMPEL PÅ SGUs INFORMATION

I detta avsnitt ges exempel på information som SGU tillhandahåller som kan vara relevant för bedömning av förutsättningarna för olika typer av förnybar geoenergi.

Vilken typ av geologiskt underlag som behövs är beroende av vilken typ av geoenergianläggning som planeras. För energiuttag från, eller energilagring i berggrunden är information om de bergarter som finns på platsen och deras termiska egenskaper viktig för dimensioneringen av anläggningen. Vid kostnadsberäkningen är uppgifter om bergets värmeledningsförmåga samt jorddjup de mest avgörande parametrarna eftersom dessa styr borrhålsdjupet och material-

behovet. Uppgifter om jorddjup finns bland annat i SGUs brunnsarkiv, på jordartskartor och i de jorddjupskartor som presenteras nedan. Jorddjupen kan variera på små avstånd, ofta mer än vad som framgår av kartan, men uppgifterna kan ändå ligga till grund för en översiktlig bedömning av förutsättningarna för geoenergi. I SGUs grundvattenkartor beskrivs främst större grundvattentillgångar i jordlagren, vilka kan användas till akviferlager. Homogenitet, sprickighet och grundvattenflöde är faktorer som kan ha stor påverkan på en anläggnings effektivitet men som i en detaljerad skala inte kan bedömas utifrån SGUs underlag som generellt är mer översiktliga.

Berggrunden

SGU tillhandahåller en stor mängd information om Sveriges berggrund. Inom kartläggningsverksamheten har åtskilliga kartor och kartbeskrivningar producerats. Äldre information har digitaliserats och databaser har skapats för att uppfylla de krav som ställs av användarna. Analyser av olika slag, för att bland annat bestämma bergets ålder, deformationshistorik, kemiska och mineralogiska sammansättning, har utförts i stor utsträckning och resultaten är samlade i SGUs databaser.

SGUs berggrundskartor visar en tolkad, heltäckande tvådimensionell modell av de bergarter som finns i ett visst område. Utifrån kartorna kan man översiktligt se fördelningen i berggrunden med avseende på sammansättning, homogenitet, kornstorlek och struktur. I kartorna framgår även förekomst av större deformationszoner i berggrunden.

I SGUs kartdatabas presenteras en något förenklad bild av den information som finns i de tryckta kartorna, men databasen blir mer användbar i samband med regionala sammanställningar och hantering i geografiska informationssystem (GIS).

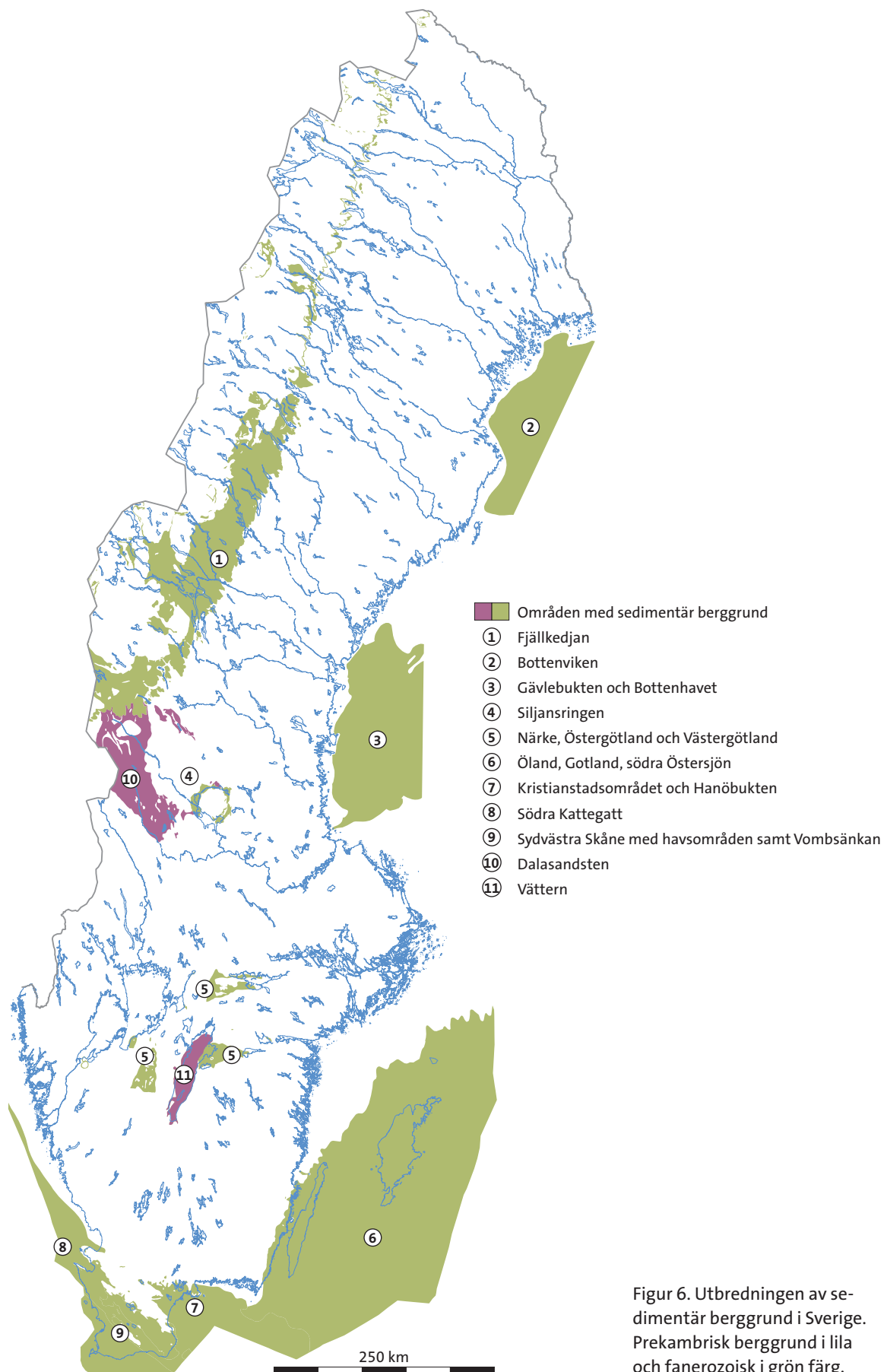
Mer detaljerad information om berggrunden finns i SGUs hälldatabas som är en databas över alla platser där någon geolog besökt en håll (bergblottning) och dokumenterat bergarternas olika egenskaper. I många fall har även prover tagits för olika analytiska ändamål.

Berggrundens uppbyggnad och egenskaper

Bergarterna klassificeras i tre huvudtyper utifrån hur de har bildats: magmatiska, sedimentära och metamorfa bergarter. Magmatiska bergarter är bildade genom stelning av smältor (magma). Om smältan når upp till jordytan bildas vulkaniska bergarter, t.ex. basalt och ryolit. På jordytan kyls smältan relativt snabbt och bergarterna blir då finkorniga. Om smältan stelnar nere i jordskorpan bildas t.ex. granit och gabbro. I detta fall kan kristalltillväxten ske under längre tid, eftersom avsvälningen sker långsammare, och bergarten får en grövre kornighet. Sedimentära bergarter, t.ex. kalksten, lerskiffer och sandsten, bildas genom att sediment, som avlagrats på jordytan eller i vatten, kompakteras och cementeras till en bergart. Metamorfa bergarter, t.ex. gnejs, amfibolit och marmor, bildas genom omvandling av magmatiska eller sedimentära bergarter vid höga tryck och temperaturer, t.ex. vid en bergskedjebildning.

De vanligaste bergarterna i Sverige består av kristallina bergarter som granit och gnejs av olika slag. Sedimentär berggrund förekommer i mindre omfattning (fig. 6). Den är i många fall mer porös och mer vattenförande i jämförelse med den kristallina berggrunden vilket har betydelse för de termiska egenskaperna. Det är därför ur geoenergisynpunkt viktigt att veta vilken typ av bergart som finns i ett område. Det kan också vara avgörande för vilken metod som ska användas vid t.ex. energilagring, där valen mellan akvifer- eller borrhållager kan finnas. Grundvattnets rörelse har dessutom stor betydelse för effektiviteten i ett geoenergisystem.

Områden med sedimentär berggrund finns framför allt i Skåne, på Öland och Gotland, i Västergötland, Östergötland, Närke, Dalarna samt i Jämtland och fjällkedjan (fig. 6). Typiskt för den sedimentära berggrunden är dess lagrade uppbyggnad, där de individuella lagrens struktur, bergartssammansättning, porositet, densitet och vatteninnehåll är faktorer som kraftigt

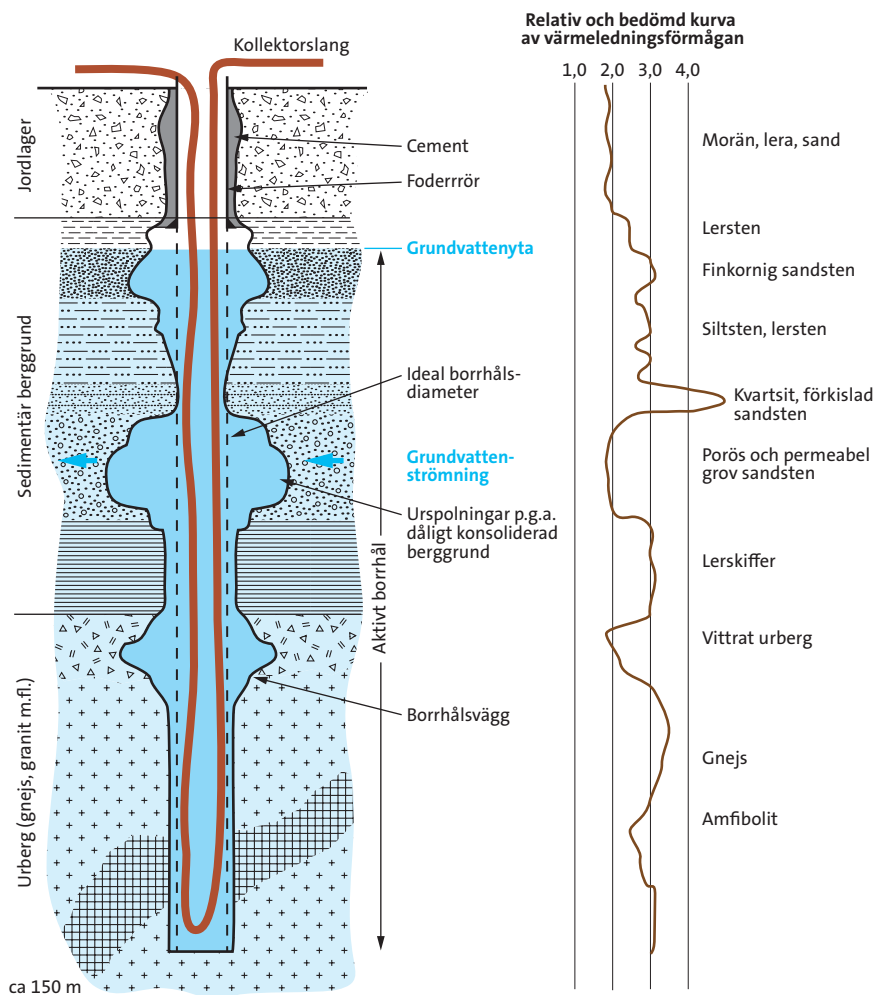


Figur 6. Utbredningen av sedimentär berggrund i Sverige. Prekambrisk berggrund i lila och fanerozoisk i grön färg.

styr de termiska egenskaperna. Enskilda lager i en sedimentär berggrund kan ha en mycket stor inverkan på effektuttaget och hur den påverkar omgivningen termiskt. I t.ex. sydvästra Skåne förekommer i tertiär kalksten med relativt låg värmeledningsförmåga lager med förkislad kalksten och flinta med avsevärt högre värmeledningstal. Dessa avsnitt kan få en relativt stor påverkan på effektuttag och påverkansområdets utbredning (fig. 7).

Den sedimentära berggrunden överlagras, där den förekommer, med varierande lagertjocklek den kristallina berggrunden. Det är vanligt att förekomsterna är tunna, vilket kan medföra att en borrhning skär genom både sedimentära och kristallina bergarter med olika egenskaper. Detta kan då försvåra dimensionering av borrhålet för det tänkta effektuttaget.

Förutom lagring och vatteninnehåll skiljer sig den sedimentära berggrunden från den kristallina genom att den ofta uppvisar en mycket varierande hårdhet. Det kan på flera platser vara svårt att borra, antingen p.g.a. extremt hård berggrund, t.ex. kambrisk kvartsit, eller på grund av för lösa bergarter, som ofta påträffas i den yngre sedimentära berggrunden i Skåne. De senare kan leda till ras och svårigheter att få ett öppet borrhål. Dessutom är det vanligt att borrhål i



Figur 7. Schematisk, icke skalenlig, illustration av ett borrhål med både sedimentär och kristallin berggrund. I figuren visas olika faktorer som kan styra effektuttag och påverkansområde: grundvattenförhållanden, berggrundens hårdhet, lagring, vittring och bergarternas värmeledningsförmåga. Kurvan till höger återspeglar en modell över variationerna i värmeledningsförmåga.

dåligt konsoliderad berggrund blir större än idealdiametern vilket kan påverka överföringen av värme och kyla mellan borrhål och berggrund (fig. 7).

I delar av Sverige förekommer djupvittrad berggrund samt sprick- och förkastningszoner som kan vara besvärliga att hantera med borrhning. Ras och förekomst av leror gör att det ofta uppstår problem med att nå tillräckligt djupt i sådana områden. Kaolinvittring kan vara betydande i t.ex. Skåne. Här finns uppgifter om uppemot 100 m med kaolinvittrad berggrund. Vittringen förekommer ofta mycket lokalt, vilket gör det svårt att förutsäga omfattningen. Sannolikheten för vittring är störst i anslutning till sprick- och förkastningszoner.

Lokalt, exempelvis i Östergötland, innehåller den sedimentära berggrunden biogen gas (se Erlström 2014) vilket kan skapa problem i samband med borrhning och installation av geo-energisystem.

Bergarternas mineralogiska sammansättning

Bergarternas mineralfördelning tas fram genom så kallade punkträkningsanalyser eller modalanalyser. Analyserna utförs på 30 mikrometer tunna bergartspreparat (tunnslip) som undersöks med hjälp av punkträkningsutrustning och ett polarisationsmikroskop. Varje mineral Korn som hamnar i mikroskopets hårkors registreras. Preparatet förflyttas med ett förbestämt avstånd och en ny registrering görs. Antalet räknade punkter brukar vara runt 500. Punkträkningen syftar till att ge ett statistiskt underlag för beräkning av den procentuella mineralfördelningen i ett bergartsprov. Resultatet anges i volymprocent.

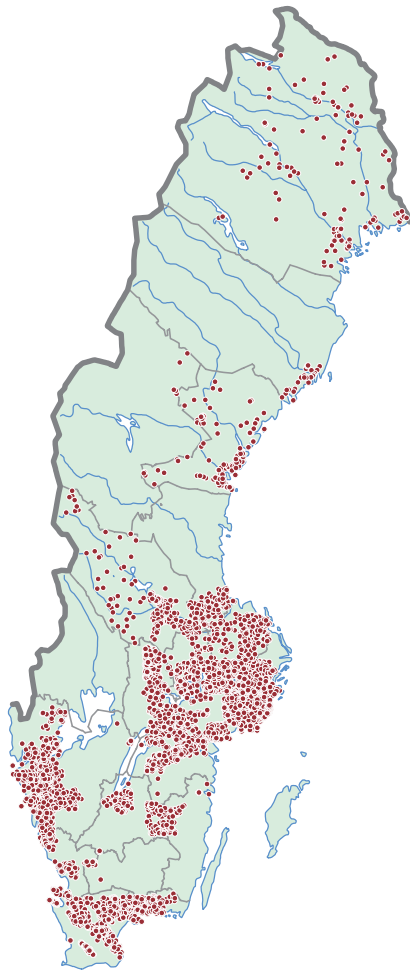
I nuläget finns ca 6 500 analysresultat lagrade i en databas på SGU (se fig. 8). Dessa kommer i huvudsak från en databas som togs fram under 1980-talet med syfte att visa olika bergarters värmeledande egenskaper (Sundberg m.fl. 1985). En stor mängd analysresultat samlades då in från äldre publicerade data i kartbladsbeskrivningar, främst SGUs kartserie Af, och resultaten användes sedan som underlag till värmeledningskartor, dels som bilaga i SGUs kartserie Ah, dels i några rapporter (t.ex. Lilja 1981, Karlqvist m.fl. 1982). Dessa data har successivt kompletterats med motsvarande information från olika bergkvalitetsundersökningar gjorda under början av 2000-talet.

Förutom mineraldata från modalanalyser har ett försök gjorts med att använda data från SGUs geokemidatabas för att få fram bergarternas mineralogiska sammansättning. Det finns tusentals analysdata på bergarter från olika delar av Sverige i databasen. Att beräkna mineralfördelningen med hjälp av dessa data är dock svårt. Framräknade halter av mineralsammansättningen avviker alltför mycket mot de reella halterna vilket leder till motsvarande felaktigheter i beräkning av värmeledningsförmågan. En annan möjlighet är att bestämma bergartens mineral-sammansättning med hjälp av röntgendiffraktionsanalys (XRD). I kombination med kemidata kan det ge tillförlitliga data om mineralfördelningen som kan användas för beräkningen av värmeledningsförmågan (Schwarz m.fl. 2010). XRD-analysen är dock en tidskrävande metod som inte direkt är kvantitativ. I nuläget saknar SGU samlad information av XRD-data om svenska bergarter.

Geofysiska parametrar

Det möjliga effektuttaget ur en bergborrad energibrunn är främst beroende av värmeledningsförmågan i borrhålets direkta omgivning. Den styrs av såväl bergmaterialets sammansättning av olika mineral som av dess fysiska egenskaper som t.ex. porositet och permeabilitet. Sammantaget är det dessa parametrar som bestämmer borrhålets nödvändiga djup utifrån ett önskat effektuttag. Här ges några korta förklaringar av de termiska egenskaperna av betydelse för i huvudsak bergvärmeanläggningar.

Värmeledningsförmågan (λ) mäts i Watt per meter och Kelvin (W/m K) och karakteriserar bergets egenskap som ledare av värmeenergi. Vissa bergarter ger ett bättre utbyte av värme bero-

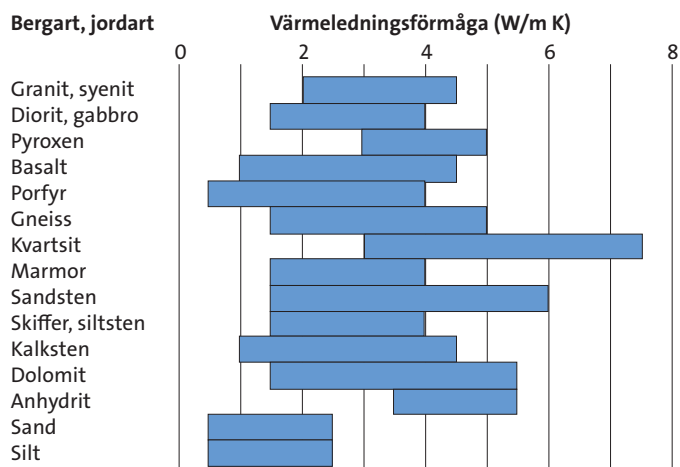


Figur 8. Provtagningspunkter för punkträkningsanalys (n = 6 500). Geografiskt underlag från Lantmäteriets digitala översiktsskarta.

ende på att värmeledningsförmågan hos bergarterna varierar, t.ex. mellan 1,7 och 3,4 W/m K för basalt respektive granit (t.ex. Schön 2004), se figur 9. Mineralogisk sammansättning, struktur, porositet och vattenhalt hos bergarten är faktorer som påverkar värmeledningsförmågan. Det mest betydelsefulla mineralet för värmeledningsförmågan i vanliga bergarter är kvarts. Värmeledningsförmågan är därför högst i kvartsrika bergarter som t.ex. kvartsit eller sandsten. Värmeledningsförmågan för de kristallina bergarterna varierar inte lika mycket som för de sedimentära bergarterna. Lösa sediment, t.ex. torr sand, har de lägsta λ -värdena. I vattenförande sedimentlager är λ beroende av vilka mineral som bygger upp kornen i sedimenten samt volymförhållandet mellan porvatten och korn. Det finns även en empirisk funktion mellan bergartens värmeledningsförmåga och dess densitet där värmeledningsförmågan ökar med ökad densitet. Delvis motsatta förhållanden gäller för kristallina, granitoida, bergarter med varierande kvartsinnehåll men avvikelser kan dock finnas för vissa basiska bergarter som innehåller ”tungta” mineral som pyroxen och olivin med relativt höga λ -värden (se tabell 1, se även Sundberg m.fl. 2009).

Värmediffusivitet (temperaturledningsförmågan) är en egenskap som beskriver temperaturändringen i ett bergmaterial som funktion av tid när värme tillförs som följd av en gradient i temperaturen. Den räknas i m^2/s .

Temperaturen i berggrunden har en generell betydelse för värmeuttaget eftersom den möjliga temperatursänkningen i borrhålet är avgörande för anläggningens effektuttag. Berggrundens (grundvattnets) temperatur på tiotals meters djup kan i den södra delen av Sverige förenklat antas vara lika med årets genomsnittliga utomhustemperatur (fig. 10). Marktemperaturen är



Figur 9. Bergarternas värmeledningsförmåga beror på mineralinnehåll, porositet, densitet samt vattenhalt (figur modifierad efter Schön 2004). Torra och porösa sediment har den lägsta värmeledningsförmågan, med ett minimumvärde under 1 W/m K. Hård och tät kvartsrik sandsten, t.ex. kvartsit, uppvisar generellt de högsta värdena, med ett maximum av mer än 7 W/m K. Som jämförelse: värmeledningsförmågan för vatten är ca 0,55 W/m K, för is ca 2,2 W/mK och för luft ca 0,025 W/m K.

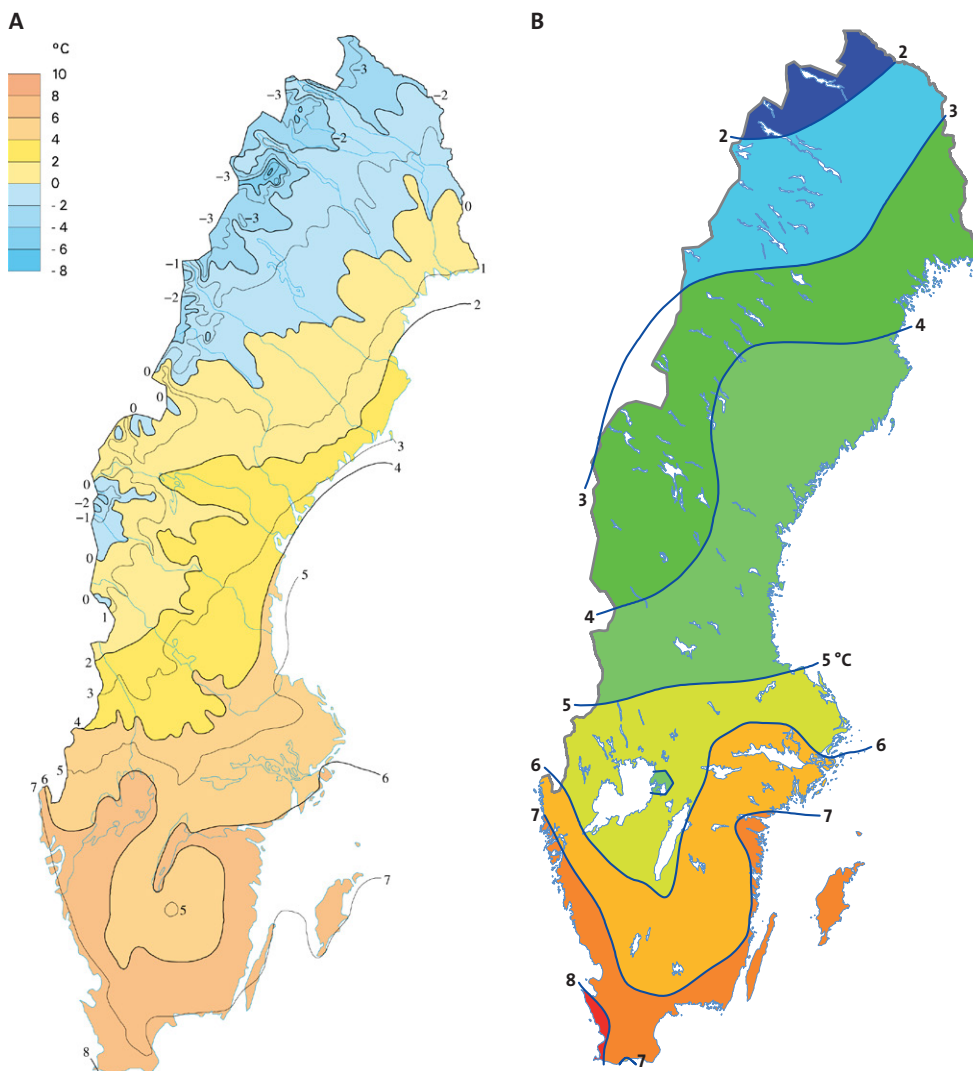
Tabell 1. Sammanställning av λ -värden som används för olika mineral vid beräkningen av bergarternas värmeledningstal.

Mineral	λ -värde (W/m K)	Referens	Mineral	λ -värde (W/m K)	Referens
Albit	2,1	a)	Olivin	4,5	f)
Allanit	3,0	b)	Opakmineral	3,0	b)
Amfibol	2,8	f)	Ortoklas	2,3	a)
Andalusit	7,6	a)	Ortopyroxen	4,3	f)
Anortit	2,1	c)	Plagioklas	2,3	f)
Apatit	1,4	a)	Prehnit	3,6	f)
Biotit	2,0	a)	Pumpellyit	3,0	b)
Cordierit	2,0	f)	Pyrit	19,2	d)
Diopsid	4,7	a)	Pyroxen	4,3	e)
Epidot	2,8	a)	Sericit	2,3	***)
Flusspat	9,5	a)	Serpentin	3,5	a)
Granat	3,3	a)	Sillimanit	9,1	a)
Hematit	11,3	a)	Skapolit	2,6	f)
Hornblände	2,8	a)	Titanit	2,3	a)
Kalcit	3,6	a)	Zirkon	5,5	a)
Kalifältspat	2,5	a)	Övrigt	3,0	
Klinopyroxen	4,3	*)			
Klinozoisit	2,8	**)			
Klorit	5,2	a)			
Kvarts	7,7	a)			
Kyanit	14,2	a)			
Magnetit	5,1	a)			
Mikroklin	2,5	a)			
Monazit	1,1	f)			
Muskovit	2,3	a)			

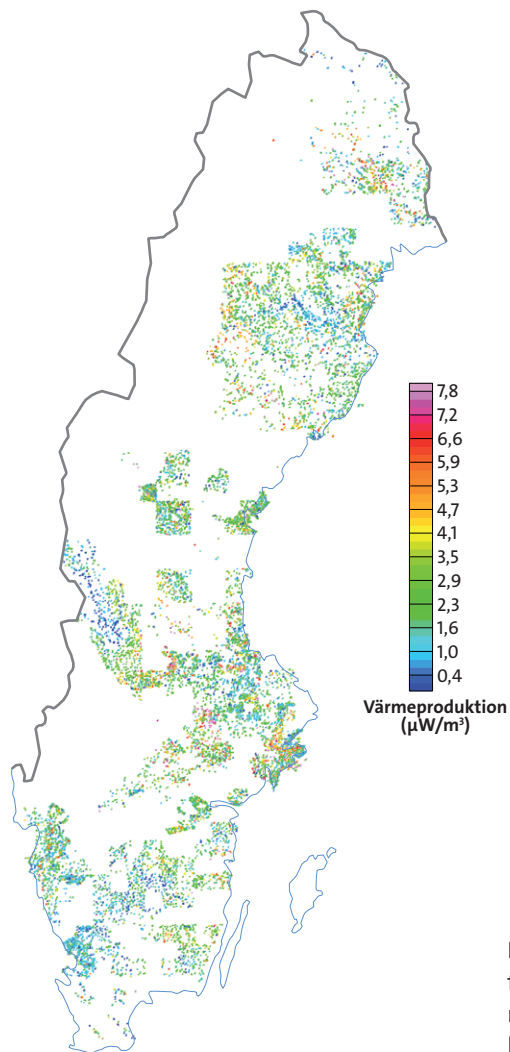
a) Horai 1971
b) Sundberg m.fl. 2008
c) Dreyer 1974
d) Clauser & Huenges 1995
e) Sundberg m.fl. 1985
f) Horai & Simmons 1969
*) Samma som pyroxen
**) Samma som epidot
***) Samma som muskovit

2015 skiljer sig från ca 9–10 °C i söder till mindre än 3 °C i norr. På djupet tilltar temperaturen i Sverige med 15–30 °C/km.

Det geotermiska *värmeflödet* är ett mått för den värmeenergi som alstras från jordens inre. I de relativt ytliga delarna av jordskorpan, ned till några tiotals meter djup, sker ”återladdningen” med värmeenergi som mest kommer från solen. Ett värmeflöde uppstår alltid i riktning mot fallande temperatur. Värmeflödet från jordens inre dominerar vid ungefär 20 m djup, där den årliga, meteorologiskt betingade periodiseringen av marktemperaturen har avtagit. Temperaturen även vid större djup kan dock under vissa geologiska förhållanden påverkas ”uppifrån”, t.ex. genom grundvattenflödet, och på så vis kan också värmeflödet påverkas. I djupa borrhål är ett högt värmeflöde, tillsammans med hög temperatur, avgörande för ett högt energiuttag. I Sverige varierar värmeflödet vid jordytan mellan 20 och 100 mW/m² (Eliasson m.fl. 1991), med ett medelvärde på ca 50 mW/m². Dessa värden kan jämföras med ett medelvärde på 60 mW/m² i Centraleuropa.



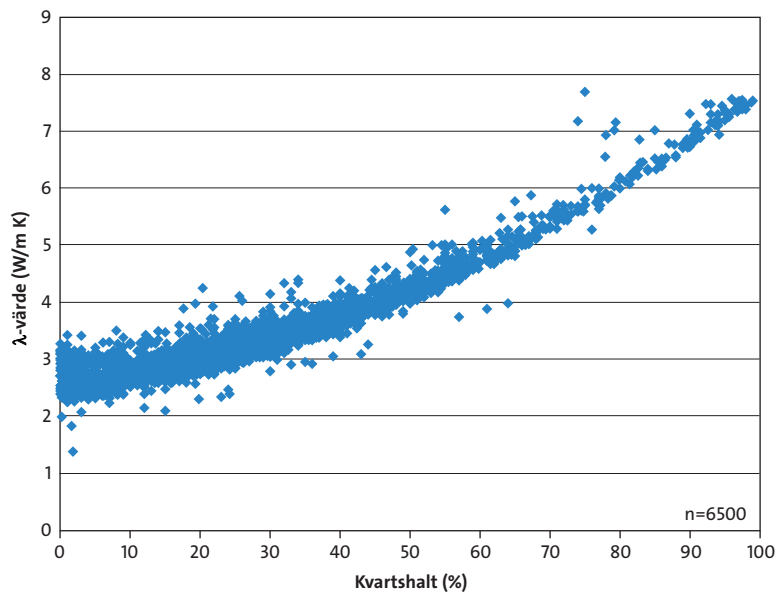
Figur 10. A. Årsmedelvärden i lufttemperatur för perioden 1961–1990 (källa www.smhi.se). B. Grundvattentemperaturen i grader Celsius i Sverige som medianvärde för perioden 1975–1995 (datakälla SGU). Det ska noteras att årsmedeltemperaturen i luften sedan dess har stigit med ca 1 °C. Den temperaturökningen framträder även i grundvattnets temperatur.



Figur 11. Värmeproduktion beräknad för markytan från radiometriska mätdata på blottad berggrund (hällar) i Sverige (Schwarz m.fl. 2010).

Värmekapacitet (specifik värme) definieras genom värmemängden (räknad i Joule, J) som behövs för att höja temperaturen i ett kilo (1 kg) av ett bergmaterial en grad Kelvin (1 K). Omvänt uttryckt är det ett mått för hur mycket värmeenergi som kan lagras i (eller dras ur) ett bergmaterial för att uppnå en viss temperaturändring. Värmekapacitet räknas fysikaliskt i J/kg K. Värmekapaciteten är därmed direkt knuten till bergartens densitet och ofta används den med schablonvärden. Granit har en värmekapacitet på i medeltal 1 kJ/kg K, medan den för vatten är fyra gånger högre. Bortsett från vattens låga värmeledningsförmåga, understryker detta värde vattnets betydelse i samband med geoenergianläggningar.

Förutom värmeledning kan även *värmeproduktion* i berggrunden ha betydelse för bergvärmeanläggningar. I yngre graniter och pegmatiter kan det finnas förhöjda halter av uran, torium och kalium. Vid radioaktivt sönderfall av dessa element frigörs värme som leder till relativt högre temperaturer i berggrunden. Detta i sin tur ökar verkningsgraden i bergvärmeanläggningen. Halterna av de nämnda elementen mäts genom radiometriska mätningar som utförs inom SGUs geofysiska kartläggning, antingen genom mark- eller flygmätningar. För delar av Sverige finns information om värmeproduktionen i berggrunden (fig. 11).



Figur 12. Förhållandet mellan kvartshalt och värmeledningsförmåga (λ -värde) för olika bergarter från hela Sverige, där λ är framräknat som ett geometriskt medelvärde baserat på mineralfördelningen. Antal prover är 6 500.

Mätning och analys av de termiska egenskaperna

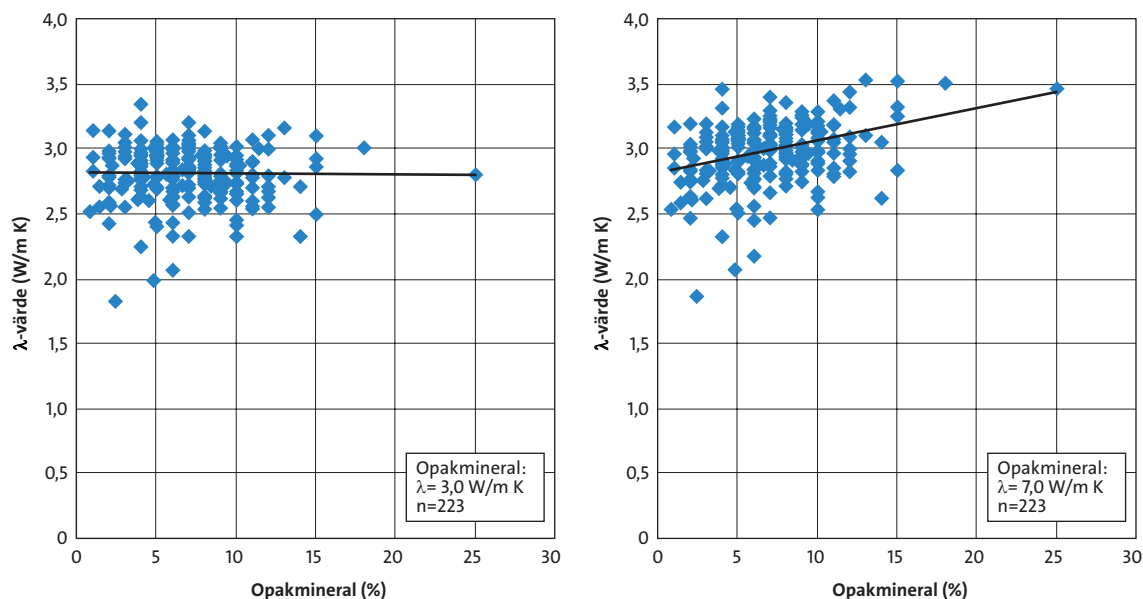
Bergarternas värmeledningsförmåga kan beräknas teoretiskt med hjälp av information om deras mineralogiska sammansättning (Horai & Baldrige 1972). Värmeledningsförmågan kan även mätas i laboratorium på bergartsprover eller in situ i borrhål.

En bergarts värmeledningsförmåga (λ -värde mätt i W/m K) kan beräknas utifrån standardvärden på de mineral som ingår i bergarten. Standardvärden för dessa mineral finns angivet i olika publikationer och standardverk (se tabell 1). I huvudsak är det halten av mineralet kvarts i bergarten som har störst inverkan på λ -värdet (fig. 12). Mineralet kvarts har ett relativt högt λ -värde på 7,7 W/m K (Horai 1971) vilket medför generellt att kvartsrika bergarter har goda värmeledande egenskaper medan kvartsfattiga uppvisar lägre värden.

De λ -värden som använts i beräkningarna för de olika bergartsbildande mineralen redovisas i tabell 1. Vissa mineralgrupper, t.ex. opaka mineral (ogenomskinliga under mikroskopet), särskiljs inte i de volymläkningar som görs och som baseras på mikroskopering och en punkträkningsanalys på tunnslip.

Ett schablonvärde på 3,0 W/m K har använts för de opaka mineralen (se Sundberg m.fl. 2008). De vanligast förekommande opaka mineralen uppvisar en stor variation i λ -värde, där t.ex. magnetit har ett λ -värde på 5,1 W/m K (Horai 1971) och pyrit 19,2 W/m K (Clauser & Huenges 1995). I de flesta fall är det basiska, kvartsfattiga bergarter som har en hög andel opaka mineral, t.ex. diabaser. Halten är vanligen endast några få procent vilket därför inte har något påtaglig inverkan på bergartens sammanvägda värmeledningsförmåga. I diagrammet i figur 13 visas λ -värden på diabaser från hela Sverige, där det tillämpade schablonvärdet på 3,0 W/m K för opaka mineral jämförs med ett annat fiktivt schablonvärde på 7,0 W/m K. Det är en tydlig skillnad i λ -värde när halten opaka mineral är högre och går över 10 % men i det här sammanhanget måste värdena också ställas i relation till diabasernas ringa förekomst i berggrunden jämfört med andra bergarter.

Det finns olika laborativa metoder för att mäta bergarters värmeledningsförmåga. De mest kända metoderna är ”divided bar”, ”needle probe”, ”hot disk transient plane source TPS” och optisk skanning. Alla metoderna är lämpliga för att undersöka anisotropin i bergarterna. Samt-



Figur 13. λ -värdets förändring i förhållande till halten opaka mineral i diabaser från hela Sverige. Schablonvärdet av λ för opaka mineral är 3,0 W/m K i det vänstra och 7,0 W/m K i det högra diagrammet.

liga dessa metoder kräver olika förberedelsearbeten och prepareringar som kan vara ganska omfattande, innan proven kan analyseras.

På SGU används optisk skanning för att mäta värmeledningsförmågan på bergarter. Metoden kallas för TCS (thermal conductivity scanning, Popov m.fl. 1999). Jämfört med de övriga, ovan nämnda metoderna är TCS enkel, snabb och tillräckligt exakt (mätfel anges med mindre än 3 %) samt mycket kostnadseffektiv. Ytterligare en fördel med TCS är, att man även kan mäta på borrhärlor. De teoretiskt beräknade värmeledningstal har verifierats och kvalitetssäkrats med hjälp av TCS-mätningar. Detta har varit möjligt eftersom referensstuffer i SGUs samlingar från samma prov, som det finns tunnslip på, har funnits tillgängliga för analys. Ett exempel på jämförelser mellan beräknade och uppmätta data redovisas nedan i anslutning till avsnittet Kartor för värmeledning – bergarter.

Geofysiska mätningar av gammastrålningen i borrhålen kan också användas för en bedömning och beräkning av värmeledningen i berggrunden. Metoden är särskilt lämplig i sedimentär berggrund där det ofta är lagerföljder med enskilda lager som har avvikande värmeledande egenskaper. Genom en kombination med gammastrålningsdata och data från en densitetslogg, t.ex. Sonic-log, kan värmeledningsförmågan beräknas. Ofta behöver resultaten kalibreras med enstaka TCS-analyser eller annan direkt mätning på borrhärlor (se t.ex. Hartmann m.fl. 2005). Metoden med att använda logdata baseras på att gamma-kurvan ger indirekt information om kvartshalten i berggrunden och att densitetsloggen ger tätheten. Borrhälsloggningar är tids- och kostnadseffektiva metoder som kan vara lämpliga där man misstänker varierande berggrundsförhållande i ett energiborrhål. Speciellt lämpad bedöms metoden kunna vara i områden med yngre sedimentär berggrund. Metodiken används för närvarande inte i Sverige.

Mätvärden på värmeledningsförmågan som är framtagna från beräkningar och analyser av bergarter i laboratorier kan avvika betydligt från de värden som kan fås vid en mätning av borrhålens termiska egenskaper. Avvikelserna beror oftast på en skalfaktor där in situ-förhållandena beror på en mycket större bergvolym och där andra faktorer som sprickighet, vattenhalt och grundvattenrörelser inverkar.

Mätningar in situ av värmeledningsförmågan i borrhål kan göras med s.k. TRT-mätning (termisk responstest). Mätningarnas resultat används i huvudsak som underlag till design och optimering av större anläggningar för värme (och kyla) i berg eller för kontroll av befintliga anläggningar. TRT-mätningen utförs under kontrollerade förhållanden, där värmemängden som tillförs borrhålet och temperaturen registreras via en uppvärmd kollektorslinga i borrhålet. Mätningen utförs under 2–3 dagar. Resultaten används för att beräkna berggrundens värmeledningsförmåga, även kallad den skenbara eller effektiva värmeledningsförmågan (Saner m.fl. 2005), samt termisk resistivitet mellan den värmebärande vätskan i kollektorslangen och borrhålet.

Jordlagren

Jordlagren i Sverige bildades i stort sett helt under den senaste nedisningen. Inlandsisen började dra sig tillbaka från de södra delarna av landet för ca 15 000 år sedan och för ca 8 000 år sedan var i princip hela landet isfritt. I samband med att isen drog sig tillbaka täcktes stora delar av Sverige av vatten. Högsta kustlinjen (HK) markerar gränsen mellan landområden ovan och under den högsta vattennivån i samband med isens avsmältning. Områdena under HK täcktes av Västerhavet eller av successiva stadier av Östersjön, omväxlande med och utan kontakt med Västerhavet. I de flesta delar av Sverige är morän den äldsta och vanligaste jordarten och den ligger i allmänhet direkt på berggrunden. Moränjordar består oftast av kantigt material och är en blandning av alla kornstorlekar, från lerpartiklar upp till stora block. I stora delar av Sverige dominerar moränen av sand och silt. Morän är ofta dessutom den helt dominerande jordarten i terrängens högst belägna partier.

När inlandsisen smälte bildades stora mängder vatten som forsade fram genom isen i isälvar. Isälvarna följde ofta dalgångar i berggrunden. Det strömmande vattnet i isälvarna eroderade underliggande berggrund och eroderat material transporterades och sorterades av vattenrörelserna innan det slutligen avsattes som olika typer av isälvs sediment i tunnlar och framför iskanten. Isälvsavlagringarna byggs till största delen upp av sand och grus och utgör idag ofta betydande grundvattenmagasin.

Efter istiden har den av isen nedtryckta jordskorpan höjt sig. Jordlagren har påverkats av vågornas svallning och erosion. Moränen vid och under den högsta kustlinjen är ofta helt eller delvis omlagrad av vågor och strömmar vilket resulterat i att bl.a. morän i bränningszonen sval-lats. Sorterat sand- och grusmaterial avsattes på sluttningarna nedanför den högsta kustlinjen. I nästan hela Sverige sker fortfarande en viss landhöjning.

I de delar av landskapet som var täckta av vatten avsattes stora mängder lera och silt på de djupast belägna bottarna. Dessa sediment består både av äldre glaciala sediment som transporterats ut av smältvatten från inlandsisen, och yngre postglaciala sediment som avsattes långt efter det att inlandsisen lämnat området. Genom landhöjningen har dessa forna bottnar torrlagts och utgör i många områden flacka lerslätter. Dessa områden med finkorniga lerhaltiga jordarter har hög vattenhållande förmåga och utgör viktig jordbruksmark.

Fortfarande sker en omlagring och avsättning av jordarter. Längs vattendrag och kuster eroderar strömmande vatten och vågor jordarterna. När växligheten hade etablerat sig, efter det att isen smält av, fanns förutsättningar för bildning av organogena jordarter som torv och gyttja. Dessa jordarter är de yngsta avlagringarna och är i vissa områden av Sverige relativt utbredda, speciellt i områden där äldre sjöar vuxit igen och bildat myrmarker och mossar.

Jordlagrens termiska egenskaper

Värmeledningsförmågan i jordlagren påverkas i huvudsak av deras vattenhalt och porositet. En hög vattenhalt medför att kontakten mellan de enskilda mineral- och bergartskornen i jordarten

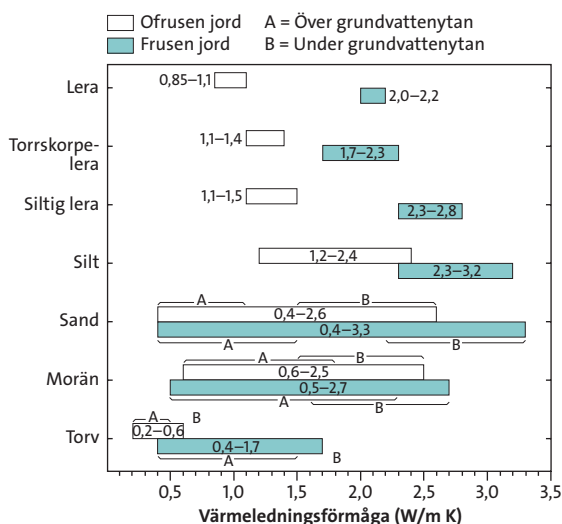
förbättras eftersom vatten leder värme ca 20 gånger bättre än luft. Tätare jordarter med en mindre andel total porvolym uppvisar en relativt bättre värmeledningsförmåga eftersom den större kontaktytan mellan mineral- och bergartskornen gynnar värmeledningen. Marken som fryser, innehåller vatten, antingen som vätska eller ånga. Isbildningen i marken medför att jordartens värmeledningsförmåga förbättras jämfört med ofrusen jordart (fig. 14), eftersom isens värmeledningsförmåga är fyra gånger högre jämfört med vattnets. Samtidigt minskas dock markens värmekapacitet genom att värme har frigjorts under vattens frysning (fig. 15). En frysning av siltjordar kring jordvärmeslingan kan dock i vissa fall leda till tjälskador kring kollektorslangen (Rosén m.fl. 2001).

Värmeledningsförmågan i jordlagren är följaktligen bättre i den vattenmättade delen under grundvattenytan. Generellt sett håller finkorniga jordar (silt och lera) vatten bättre än grövre jordar som sand och grus och har de bästa förutsättningarna för jordvärme. Jordar med ett högt innehåll av silt kan suga upp mycket vatten, även från djupet. Morän har normalt sett ett tillräckligt stort innehåll av lera och silt för att kunna ha en vattenhållande förmåga, men i de fall moränen är grovkornig kan dess vattenhållande förmåga vara jämförbar med sand. Sandlager under grundvattenytan kan dock ha en mångdubbelt bättre ledningsförmåga jämfört med en sand ovanför grundvattenytan.

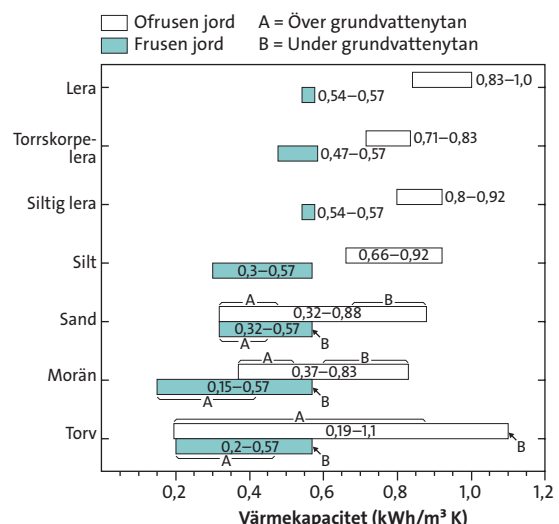
Jordlagrens mäktighet

Jordlagrens mäktighet varierar kraftig i Sverige. I dalgångar, sprickdalar och under HK samt i områden med lätteroderad berggrund kan jordlagerföljderna vara över 100 m men vanligtvis är mäktigheten på jordlagren mellan 5 och 20 m i merparten av Sverige (fig. 16).

Jordlagrens mäktighet är av stor betydelse vid anläggning för geoenergi. Vid installation av bergvärmeanläggningar är det inte gynnsamt med för stora jorddjup eftersom det medför ökade kostnader att borra genom jordlagren med foderrör. Jordvärmeanläggningar (fig. 3) kräver dock att jordlagren har en viss mäktighet för att man ska kunna använda energin i jordlagren. Det



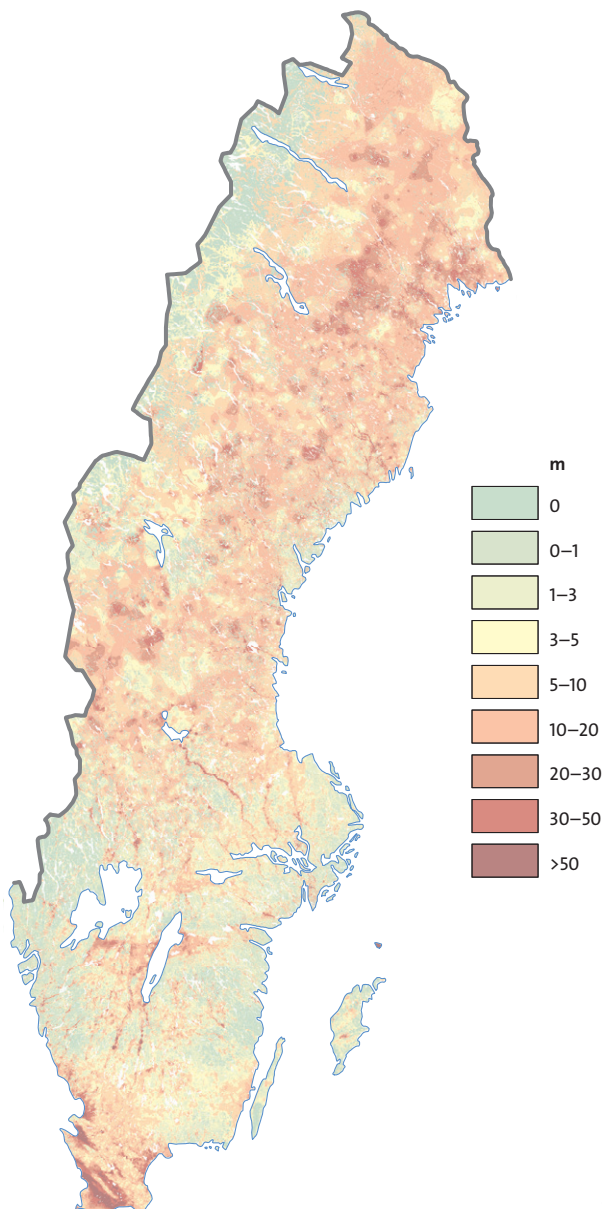
Figur 14. Värmeledningsförmåga för olika jordarter i ofrusen och frusen tillstånd. För genomsläppliga jordarter anges normalt variationsområde ovan (A) respektive under (B) grundvattenytan. Modifierad från Rosén m.fl. (2001).



Figur 15. Värmekapacitet för olika jordarter i ofrusen och frusen tillstånd. För genomsläppliga jordarter anges normalt variationsområde ovan (A) respektive under (B) grundvattenytan. Modifierad från Rosén m.fl. (2001).

djup som krävs varierar med hur kollektorsystemet utformas och vilka förutsättningar som råder på fastigheten. När markytan är begränsad kan kollektorerna läggas i flera nivåer för att utnyttja markytan mer effektivt.

Information om jordlagrens mäktighet är mycket efterfrågad, särskilt i samband med geoenergiborrningar, där en betydande del av den totala borrhöstkostnaden ligger på jordborrning med foderrörsdrivning. Jordlagrens uppbyggnad och mäktighet är beroende av flera geologiska faktorer, som kan variera kraftigt både i regional och lokal skala. Den senaste istidens påverkan på landskapet och avsättningen av sediment, framför allt i anslutning till isavsmältningen är en betydelsefull faktor. En annan viktig parameter är uppbyggnaden av den underliggande berggrunden. Inom områden med prekambrisk kristallin berggrund påträffas ofta de största jordmäktigheterna i anslutning till sprickdalar och förkastnings- och vittringszoner. Inom områden med sedimentär berggrund är däremot jordlagrens mäktighet tydligt knuten till bergarternas konsolideringsgrad. I Skåne, t.ex., finns områden med lös sedimentär berggrund som i många



Figur 16. Nationell jorddjupskarta. Datorgenererad jorddjupsmodell enligt metodik beskriven i Daniels & Thunholm (2014).

fall har en likartad uppbyggnad som jordlagren, vilket dessutom leder till att foderrörsdrivning inte enbart måste göras i jordlagren utan även ett stycke ner i berggrunden.

SGU hämtar information om jordlagrens mäktighet från brunnldata i SGUs brunnssarkiv. I brunnssarkivet finns bl.a. uppgifter om djup ner till berggrundsytan. Antalet brunnsuppgifter i arkivet varierar kraftigt från område till område. Från Skåne finns t.ex. ett omfattande underlag med information om drygt 30 000 brunnar i nuläget.

Under senare år har SGU tagit fram en rikstäckande jorddjupsmodell (fig. 16), som till stora delar bygger på brunnldata, men även på information i jorddatabasen om berg i dagen (häll- ytor) och den hydrogeologiska parameterdatabasen. Den senare innehåller bl.a. uppgifter om jordlagrens djup och mäktighet från sonderingsborrningar och geofysiska undersökningar (refraktionsseismik och georadar). Eftersom det finns ett tydligt samband mellan jordlagrens mäktighet och jordartstyp tar jorddjupsmodellen även hänsyn till jordlagrens uppbyggnad (jordlagerföljder) och bildningssätt. Daniels & Thunholm (2014) presenterar i en SGU-rapport hur den rikstäckande modellen tagits fram och hur jordlagrens mäktighet beräknats med utgångspunkt från data som ingår i modellen. Osäkerheten i modellen varierar givetvis i förhållande till datatätheten. Inom områden med homogen berggrund och jordlagerföljd har modellen en hög tillförlitlighet trots ett glesare dataunderlag, medan det i geologiskt komplexa områden krävs ett betydande dataunderlag för ett tillförlitligt resultat. Tillförlitligheten och osäkerheten i modellen beskrivs mer utförligt i Daniels & Thunholm (2014).

Vissa välkända geologiska företeelser, såsom den Mellansvenska israndzonen, framträder som ett öst–västligt stråk med stora jorddjup och kan följas genom Östergötland, Västergötland och Dalsland. Flera av de nord–sydligt orienterade isälvsavlagringar som korsar Mälaren framträder tydligt som stråk med relativt stora jorddjup (se fig. 16).

Längs västkusten syns tydligt ett sprickdalslandskap med lerfyllda dalgångar med stora jorddjup vilka till stor del omges av hällmark. Områden där man kan förvänta sig större jorddjup är dels i sprickdalgångar, som t.ex. Göta älv, Klarälvsdalen och flera Norrlandsälvar, dels i områden med isälvsmaterial. De största kända jorddjupen i Sverige är nästan 200 m och finns i trakterna av centrala Jönköping. I områden med lerjordar är mäktigheten ofta mellan 5 och 20 m. Uppemot 100 m tjocka lerlager förekommer i Göteborgsområdet och på Uppsalaslätten.

Områden där berggrunden går i dagen, eller endast är täckta av tunna jordlager, är generellt sett vanliga i Sverige. Tunna jordtäcken förekommer t.ex. i en bred öst–västlig zon genom norra Götaland och södra Svealand, medan utbredda, mäktiga jordlager dominerar i stora delar av Norrlands inland. Dessa skillnader har sin förklaring i variationer i såväl inlandsisarnas dynamik som deras förmåga att erodera och transportera material från underlaget.

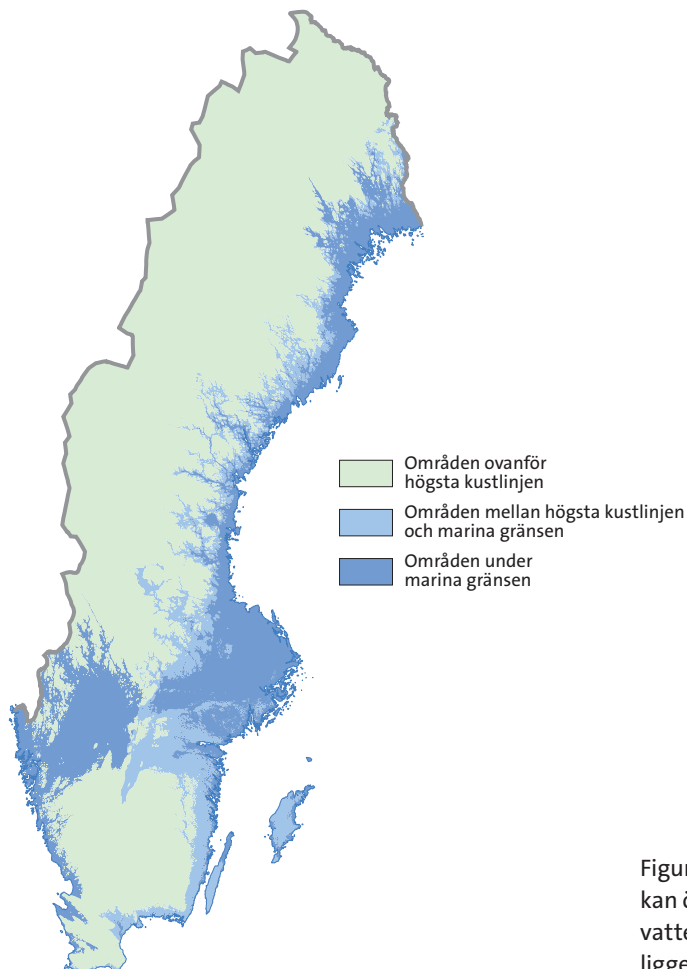
Grundvattnet

Allt grundvatten härrör från nederbörd som trängt ner i marken. Vattnet förflyttar sig i marken från högre till lägre nivåer för att slutligen rinna ut i bäckar, sjöar eller hav. Avgörande för vattnets rörelser i marken är jordlagren och berggrundens porutrymme och genomsläpplighet. I jordlagren förekommer grundvattnet i porutrymmet, det vill säga utrymmet mellan de enskilda kornen som bygger upp jordarten. Generellt kan grovkorniga jordarter som sand och grus innehålla stora mängder tillgängligt vatten, till skillnad från finkornigare jordarter som silt och lera. I morän, som är den vanligaste jordarten i Sverige, varierar porvolymen kraftigt, vilket också leder till varierande vatteninnehåll. För geoenergi som baseras på grundvattensystem, är endast områden med mycket goda möjligheter för utvinning av grundvatten av intresse. I grundvattenbaserade säsongslager (ATES, fig. 4) är det viktigt att magasinet har tillräckligt stor volym, så att det säsongsvis går att flytta magasinerat vatten från den ”varma” till den ”kalla” sidan och vice versa utan att magasinet antingen svämmer över eller blir torrlagt.

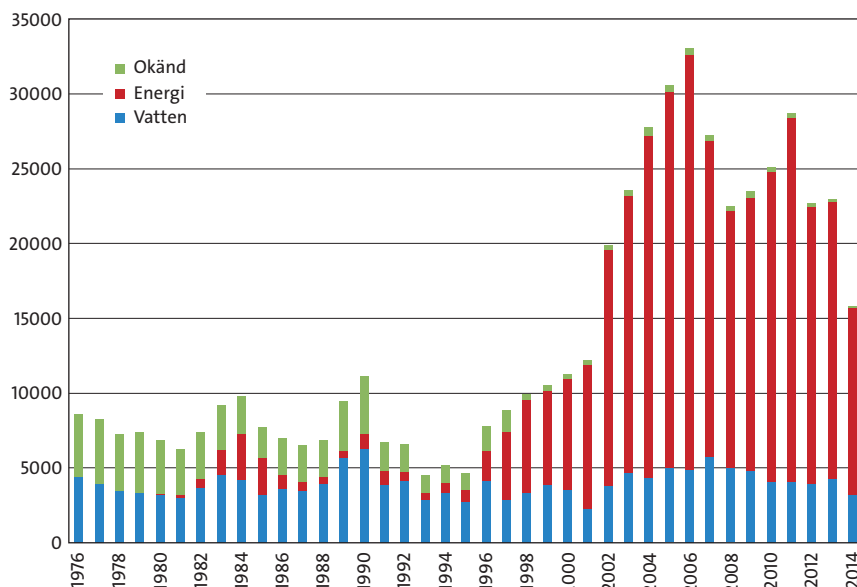
I den prekambriiska kristallina berggrunden förekommer grundvattnet i huvudsak i större eller mindre sprickor. Tillgången på vatten beror på berggrundens sprickighet då vattenföringen sker utmed enskilda sprickor eller sprickzoner. I porösa bergarter, t.ex. sandsten, kan även vattentransport ske genom berggrundens porer. Detta medför att vattentillgången i dessa bergarter ofta är avsevärt större än i kristallina bergarter.

Grundvattnets kvalitet skiljer sig ofta mellan berggrunden och jordlagren. Generellt kan sägas att djupare liggande (berg-)grundvatten har ett bättre skydd mot föroreningar från jordbruk, avlopp etc. jämfört med ytligare (jord-)grundvatten. Detta beror främst på att djupare grundvatten har haft en längre uppehållstid i marken och hunnit neutralisera sur nederbörd och andra eventuella föroreningar. Å andra sidan kan det i grundare, grävda brunnar i jordlagren, finnas lägre halter av "geologiska föroreningar" såsom metaller, radon, salt etc. som härrör från mineral i berggrunden. Förekomsten av saltpåverkat grundvatten varierar mycket i landet men det är vanligt förekommande i kustnära och lågt liggande områden och i borrhål som är djupare än 150 m (fig. 17).

För geoenergi har vattnets kvalitet inte samma betydelse som för brunnar för dricksvattenproduktion, men man måste ändå ta hänsyn till vattnets kvalitet när man installerar en geoenergianläggning. Borrhål för geoenergi som når djupare nivåer med salt grundvatten kan påverka närliggande dricksvattenbrunnar som inte når ned till det salta grundvattnet. I områden med risk för salt grundvatten krävs därför att man vid borrning mäter vattnets salthalt (konduk-



Figur 17. Risken för saltvattenpåverkan ökar med brunnsdjup och ökat vattenuttag, särskilt i områden som ligger under den marina gränsen.



Figur 18. Antal inlagrade (inklusive inte lägesbestämda) brunnar i SGUs brunnarsarkiv (registrerade fram till oktober 2014, databasuttag februari 2015).

tivitet) vid olika borrhjup för att registrera om borrhningen når nivåer med salt grundvatten. Om så är fallet ska den delen av brunnen där salt grundvatten påträffats återfyllas för att minimera risken för påverkan i omkringliggande dricksvattenbrunnar.

Grundvattenvärmeanläggningar kan påverkas av förhöjda kloridhalter genom ökad korrosion på värmeväxlare och ledningssystem. Vid geoenergianläggningar som bygger på akviferlager kan även höga järn- eller manganhalter utgöra problem. Järn och mangan kan fällas ut på insidan i returbrunnarna vilket medför en successiv minskning av deras kapacitet. Vid akviferlager, där brunnarna används växelvis, är risken för igensättning mindre på grund av flödesväxlingen.

Grundvattendata

I SGUs brunnarsarkiv finns information om ca 560 000 brunnar (oktober 2014). I arkivet finns data om bland annat teknisk utformning, djup, vattenkapacitet, grundvattennivå, geografisk läge, jorddjup och uppgifter om lagerföljd. Uppgifterna i brunnarsarkivet gäller dock främst bergborrade brunnar. Uppgifterna har skickats in till SGU genom brunnborrare sedan 1976 enligt lagen om uppgiftsskyldighet (SFS 1975:424, SFS 1985:245). Databasen utökas med cirka 25 000 brunnsuppgifter varje år, varav 4 000 utgörs av dricksvattenbrunnar (fig. 18).

Informationen i SGUs brunnarsarkiv användas redan som ett viktigt bedömningsunderlag när nya geoenergi-brunnar ska borraras i ett område. Kunskap om jorddjup, bergartstyp och grundvattennivåer från brunnar i omgivningen ger värdefull information för val av borrhålsdesign och utförande och möjliggör en säkrare bedömning av borrhjup och borrhkostnad. Idag finns brunnarsarkivet som digital karttjänst på SGUs webbplats. Informationen finns även tillgänglig via en mobilapplikation (se Geokartan på SGUs webbplats www.sgu.se).

Databaser med uppgifter om grundvattenkällor och om grundvattenkemi finns också på SGU, liksom ett analogt arkiv med utredningar om grundvattenförhållanden.

Hydrogeologiska kartor

SGU har sedan början av 1970-talet bedrivit kartläggning av Sveriges grundvattentillgångar. Kartläggningen är inriktad på förekomster och strömningsriktningar. Informationen redovisas i hydrogeologiska kartor i regional skala på länsnivå (1:250 000) eller som detaljerade kartor i

skala 1:50 000. Länskartorna bygger på en sammanställning av befintlig information, där bl.a. kartor för ungefärlig vattenkapacitet i bergborrad brunn ingår. De mer detaljerade kartorna (antingen på kommun- eller grundvattenmagasinsnivå) omfattar i huvudsak grundvattenmagasin i sand- och grusavlagringar. De detaljerade kartorna, till skillnad från länskartorna, baseras helt på SGUs egna undersökningar för att man säkrare ska kunna bestämma grundvattenmagasins utbredning och hur grundvattnet strömmar. Framför allt baseras dessa kartor på resultat från olika geofysiska mätningar (seismik, georadar och VLF), borrhålsundersökningar och inventering av grundvattenytor samt kemisk analys av vatten från befintliga brunnar.

För geoenergi är de hydrogeologiska kartorna främst användbara för avgränsning av områden där akviferlager i jordlagren kan vara ett lämpligt alternativ. Kartorna innehåller även information för bedömning av grundvattenströmning och vattenföring, både i berggrund och i jordlager, vilket kan ge stöd för beräkning av effektuttag och påverkansområde.

Vattenskyddsområden

Vatten av god kvalitet för vattenförsörjningen är en av de viktigaste naturresurserna i Sverige. För att säkerställa skyddet av denna resurs krävs att vattnet används på ett sådant sätt att det inte riskerar att skadas. Det innefattar bland annat att det ska skyddas mot direkta eller indirekta riskfaktorer som kan påverka dess kvalitet eller kvantitet negativt.

I anslutning till de allmänna vattentäkterna i Sverige har kommunerna och länsstyrelserna möjlighet att inrätta vattenskyddsområden för att reglera verksamheter och åtgärder för att skydda vattnet. Även områden som inte idag används för vattenförsörjning, men kan komma att användas i framtiden kan förklaras som vattenskyddsområden.

Anläggning för geoenergi är ofta reglerad i föreskrifterna till vattenskyddsområdena. Normalt sett är anläggningar förbjudna inom den primära zonen medan tillstånd krävs för anläggningar inom den sekundära skyddszonen. I de fall det finns en tertiär zon är borrning endast undantagsvis reglerad. Vissa restriktioner inom tertiär zon kan finnas för undermarksarbeten nära någon av uttagpunkterna i den allmänna vattentäkten, och när jordlagren utgörs av mäktiga lerlager.

SGU är remissinstans i samband med tillståndsgivning för geoenergianläggningar inom vattenskyddsområden. Det som SGU bedömer och granskar i sådana remissärenden är följande:

- Risker i samband med byggandet av anläggningen.
- Den påverkan som anläggningen medför på de geologiska förhållanden och vilka driftsrelaterade risker som finns.

Risker som kopplas till byggfasen omfattar borrning, schaktning och grävning. Riskerna är begränsade till den tid då arbetet utförs och utgörs främst av risk för förorenings-spridning från de vätskor (oljor, lösningsmedel, fetter m.m.) som används i maskiner och vid borrning. Hantering av borrhålsam och risken för markskador är också något som kan föras till denna bedömning.

En geoenergianläggning kan påverka de geologiska förhållandena på olika sätt. Exempelvis kan en anläggning baserad på ytjordvärme medföra förändrade infiltrationsförhållanden på grund av en störning (omlagring) av de naturliga jordlagerförhållandena. I synnerhet i områden med flera olika sedimentära bergarter och i områden med risk för saltvattenpåverkan kan en blandning av vatten från olika lager få negativa effekter på vattenkvaliteten. En sådan påverkan kan vara bestående och dess omfattning beror i huvudsak på anläggningens konstruktion, dvs. brunnsdesign.

Vid normal drift av geoenergianläggningar utgör läckage av vätskor från kollektorslangar den enskilt största riskfaktorn för kontaminering av mark och grundvatten. För system med uttag

och återinjektion av grundvatten är den största riskfaktorn vattenkvalitetsförändringar på grund av lokala förändringar i temperatur- och strömningsförhållanden i akviferen.

SGUs uppfattning är att risken för att en geoenergianläggning ska påverka en vattentäkt negativt är mycket starkt kopplad till de lokala geologiska förhållandena och anläggningens utförande och design. Det är därför svårt att ge generella råd och riktlinjer beträffande tillstånd och utförande av anläggningar i anslutning till vattentäkter och vattenskyddsområden. Ett slutligt avgörande om en energibrunn kan tillåtas inom ett vattenskyddsområde måste fattas efter en bedömning av de lokala förhållandena och baseras på de riskfaktorer som specificerats i punkterna ovan. Om kommunen finner att energibrunnar kan tillåtas inom ett skyddsområde kan sannolikheten för påverkan och effekterna av identifierade risker minimeras genom att det ställs krav på hur arbetet genomförs och på hur anläggningen utformas. Det kan t.ex. ställas krav på att bormaskin och kompressor ska stå på ett tätt underlag, att energibrunnen ska återfyllas med tätande material, att borrhningen utförs i enlighet med SGUs vägledning Normbrunn och att brunnsborrharen ska vara certifierad eller ha motsvarande kompetens.

Den potentiella risken för påverkan av grundvattnet inom ett vattenskyddsområde ökar dock med ett ökat antal anläggningar. Alla markentreprenader medför en viss risk för påverkan av grundvattnet. Var för sig är risken hanterbar men den ökar med ökat antal entreprenader, detta trots att krav på design och utförande följs. Antalet möjliga anläggningar inom ett vattenskyddsområde måste därför sannolikt vara reglerat utifrån gällande förutsättningar, t.ex. geologiska förhållanden, borrhdjup, avstånd mellan brunnar, temperaturpåverkan, aktiva-passiva system m.m.

I de remissvar som SGU gett avseende geoenergi kan man konstatera att i de fall det rör sig om anläggningar inom primär skyddszon har SGU i samtliga fall, utom ett, rekommenderat att det inte ges tillstånd till borrhningen. I remissvar som rör borrhningar inom den sekundära skyddszonen har SGU i huvudsak tillstyrkt anläggningens utförande, dock ofta med krav på åtgärder som kan minska risken för en eventuell påverkan på vattentakten, exempelvis återfyllning av hela borrhålet. Det är dock viktigt att det finns tydliga beskrivningar och avgränsningar av skyddsområdena eftersom detta är avgörande för rätt bedömning vid tillståndsgivning. Äldre och felaktiga avgränsningar och föreskrifter kan leda både till att områden som inte borde omfattas av restriktioner skyddas i onödan och att områden där det borde finnas reglering av verksamheter inte omfattas av några restriktioner.

Förorenad mark

Inför borrhningar och undermarksbyggande på fastigheter, där man misstänker att det finns förorenad mark, ska man innan arbete påbörjas ha kännedom om den eventuella föroreningens utbredning.

En brunn ska placeras och utformas på så sätt att den inte kan orsaka spridning av förekommande föroreningar. Ur en sluten energibrunn sker inget vattenuttag, vilket minskar risken för att en förorening transporteras mot den. Däremot är det viktigt att beakta att borrhning av ett eller, framför allt, flera hål i berggrunden kan innebära spridning av föroreningar som finns i det överliggande jordtäcket. I samband med eller efter utförd borrhning kan föroreningar komma ner i sprickor som utgör hydrauliska kontaktvägar med vattenförande sprickor och transporteras långa sträckor från sin ursprungsplats.

När det finns en risk för föroreningsspridning är det viktigt att säkerställa att foderrören tätas ordentligt mot bergets överyta och att de har en sådan längd att risken för inflöde av grund- och ytvatten från jordlagren minimeras. Detta för att förhindra att eventuella föroreningar kan påverka djupare liggande grundvatten. I samband med undersökningsborrning (t.ex. för TRT-mätning) bör man därför notera om det finns ytliga vattenförande sprickor och med hjälp av denna information anpassa längden på foderrören för energilagrets övriga hål.

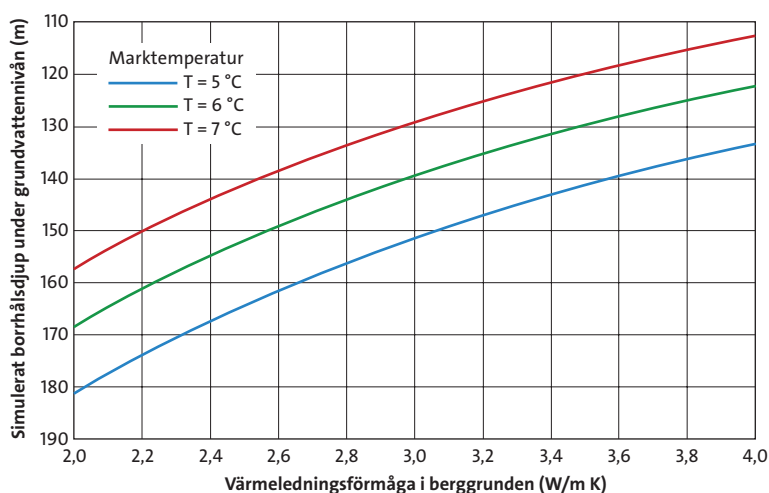
I flera länder pågår försök som kombinerar sanering av mark- och grundvattenföroreningar med geoenergi. Ett exempel är staden Utrecht i Nederländerna där man har skapat vad man kallar en "bio-washing machine" där grundvattnet renas från lättflyktiga organiska föroreningar (VOC) genom en kombination av ATES och biologisk nedbrytning. Denna lösning ger bra synergieffekter. Samtidigt som man renar grundvattnet får man också energi från systemet, vilket gör att man snabbt kan avskrika investeringarna och får en mer koldioxidneutral stadskärna med hjälp av energilagringen. För mer information se <http://www.citychlor.eu/projects/pilot-project-7-aquifer-thermal-energy-storage.htm>

GEOLOGISKA OCH FYSISKA FAKTORERS INVERKAN PÅ GEOENERGISYSTEM

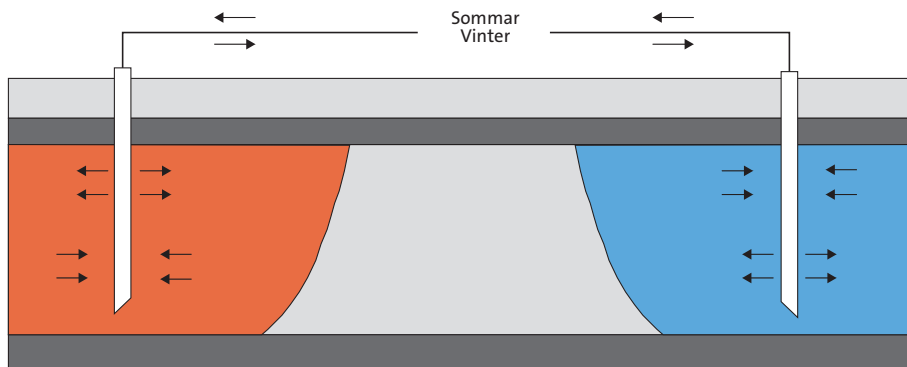
Värmeledning

Vid dimensionering av ett bergvärmesystem används i regel en branschgemensam programvara. Berggrundens värmeledningsförmåga har stor betydelse för dimensioneringen, men har hittills enbart beaktats schablonartat. God kunskap om berggrundens termiska egenskaper är framför allt betydelsefull på de platser där man planerar för större anläggningar med flera borrhål. Den enskilde villaägaren som planerar att installera bergvärme har ofta inga större valmöjligheter vad gäller borrhålsplacering, men har däremot användning för data om värmeledningsförmåga för att få information om vilket brunnsdjup som krävs.

En genomtänkt design och utförande av bergvärmearläggningen sparar installations- och driftskostnader. Vid dimensioneringen är berggrundens temperatur, värmeledningsförmåga och vattenföring avgörande faktorer. Dessa parametrar bestämmer borrhålets nödvändiga djup. Berggrundens temperatur på 100 m djup kan förenklat antas vara lika med årets genomsnittliga utomhustemperatur. För att kunna bedöma t.ex. vattenföringen i berget och grundvattenytans läge krävs information ur befintliga databaser, t.ex. SGUs brunnarkiv, eller ytterligare undersökningar. Med rätt kunskap om bergarternas värmeledningsförmåga kan brunnsdjupen anpassas mycket bättre till anläggningens energiomsättning. Borrhålsdjupet som krävs för att uppnå en bestämd energieffekt kan variera med upp till 40 % (fig. 19).



Figur 19. Simulerat borrhålsdjup i förhållande till berggrundens värmeledningsförmåga och temperatur (5–7 °C) vid 100 m djup för att täcka ett energibehov av 25 MWh årligen för uppvärmningen av en villa (efter Kalskin Ramstad m.fl. 2008). Energisimulering utförd med programmet Earth Energy Designer (EED). Grundförutsättningar: Energiförbehovet för uppvärmning och varmvatten för ett hus (villa) är 25 000 kWh. Säsongsvis verkningsgrad för värmepump = 3,3. Borrhålsdiameter = 140 mm.



Figur 20. Principskiss med ett akviferlager, där varm- och kallvatten (värme och kyla) tas ut ur, respektive tillförs grundvattenmagasinet, under förutsättningen att själva grundvattenreservoaren är stationär (efter BINE 2003). Pilarna anger uttag eller tillförsel av vatten under sommar respektive vinter. Vid Arlanda flygplats används en typ av lager där varm- och kallvatten delvis avgränsas med hjälp av en mindre berggrygg.

Termisk påverkan

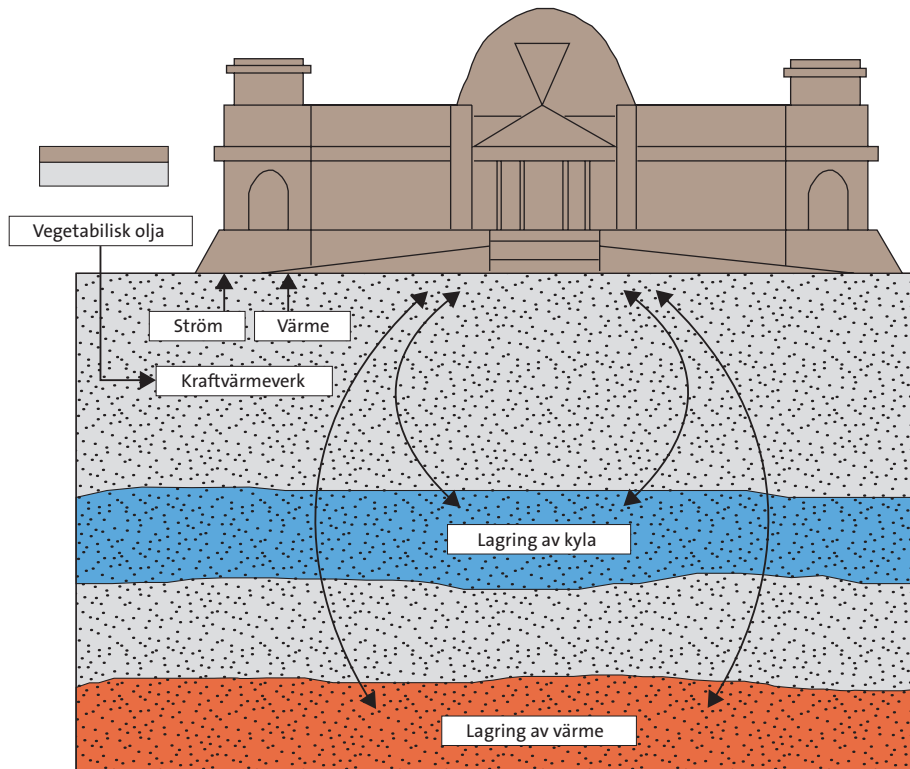
Dimensioneringen av geoenergianläggningen är avgörande för att den ska fungera tekniskt och vara ekonomiskt lönsam. I detta sammanhang bör nämnas att geoenergianläggningar som borrhåls- eller akviferlager för utvinning eller lagring av värme och kyla kan påverka varandra. I bergbore värmeanläggningar är berggrundens värmeledande egenskaper och avståndet mellan hålen och grundvattnets rörelseförmåga mest avgörande för anläggningens effektuttag. För enskilda energibrunnar rekommenderas i Sverige ett avstånd på minst 20 m. I större anläggningar där flera borrhål samverkar (BTES) är avståndet mellan hålen oftast 5 m eller mindre. Akviferlager (ATES) har i regel ett mindre antal borrhål och det är, förutom värmeledningsförmågan, framför allt permeabiliteten och grundvattnets rörelse som avgör energieffekten i lagret och utbredningen av området som påverkas. I vissa typer av akviferlager kan grundvattenmagasin på olika sidor av en barriär (fig. 20) eller nivåer (fig. 21) användas som kall respektive varm del i systemet. På så sätt kan termisk kortslutning undvikas.

Hur den termiska växelverkan mellan rörligt grundvatten och energibrunnen påverkar effektuttaget är fortfarande relativt dåligt undersökt. Det strömmande grundvattnet kan ge upphov till en effektiv advektiv värmetransport som ger en olikformad temperaturpåverkan i brunnens omgivning (se fig. 22). Samtidigt höjs den termiska effekten i energibrunnen signifikant och brunnens djup kan reduceras.

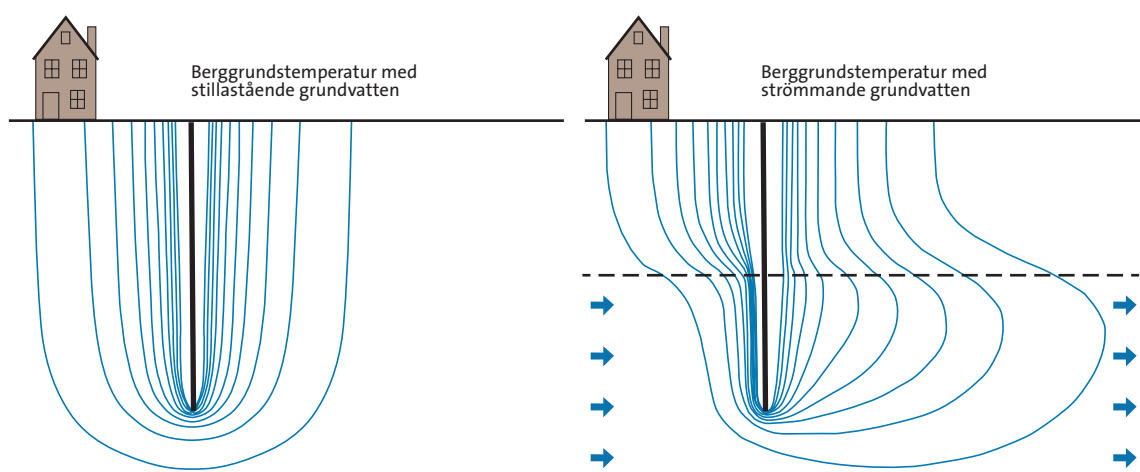
Strömmande grundvatten kan dock medföra termisk påverkan av intilliggande energibrunnar nedströms (fig. 23). I områden med strömmande grundvattenförhållanden kan effekten försämrats om energibrunnarna används för lagring av värme eftersom denna kan ledas bort av det strömmande vattnet.

EXEMPEL PÅ BEARBETAD SGU-INFORMATION

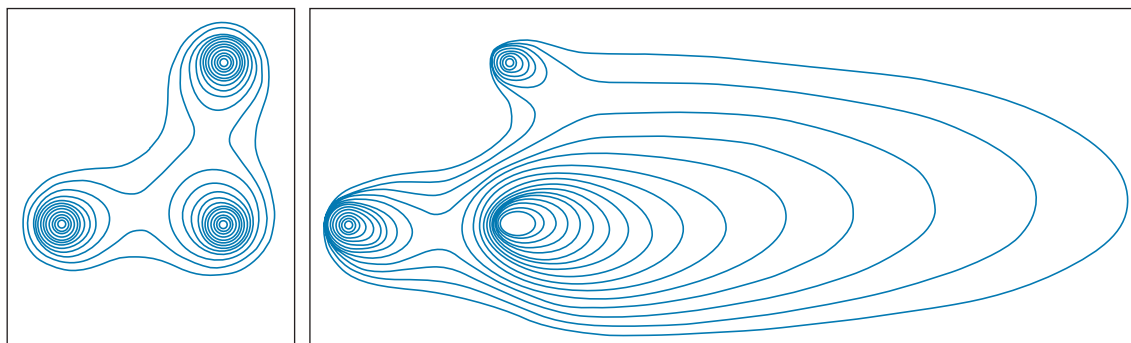
SGU har under åren 2013–2014 bearbetat och sammanställt information om framför allt jordlagrens mäktighet och bergarternas värmeledande förmåga. Arbetet har hittills omfattat analys av befintliga mineralfördelningsdata, TCS-mätningar och framtagning av olika datorgenererade tematiska modeller. Förutom en nationell jorrdjupsmodell har det för två områden, Stockholm och Skåne, tagits fram exempel på kartor för värmeledning. För Skåne har även en jämförelse mellan den nationella jorrdjupsmodellen och en manuellt framtagen modell gjorts. Beskrivningen av de termiska egenskaperna för Skånes bergarter baseras till största delen på ett masters-



Figur 21. Illustration som visar ett typexempel med akviferlager i två magasin, kyla- och värmelager, med ett mellanliggande tätt ler- och siltlager under riksdagshuset i Berlin, Tyskland. Anläggningen är ansluten till ett mindre kraftvärmeverk som drivs med vegetabiliska oljor (efter BINE 2003).



Figur 22. Schematiska tvärsnitt som visar temperaturpåverkan i omgivningen av en energibrunn med stillastående och strömmande grundvatten i berggrunden. Linjerna visar isothermerna i berggrunden. Flödesriktningen i höger tvärsnitt är markerad med pilar. I modellen har en flödeshastighet på 0,01 m/d använts (efter Bauer 2011).



Figur 23. Schematiska horisontalsnitt för tre energibrunnar i L-form. Isotermerna kring brunnarna visar tydligt effekten av stillastående (vänster) respektive strömmande grundvatten (höger). I modellen till höger har en strömningshastighet på 0,05 m/d använts (efter Bauer 2011).

arbete vid Lunds universitet (se Andolfsson 2013). Förutom detta arbete har även en förstudie av borrhårens i olika typer av bergarter i Skåne gjorts. Syftet med förstudien var att se om det finns ett samband mellan foderrörsdrivningsdjup och olika bergartsområden. En kort sammanställning av arbetet presenteras nedan.

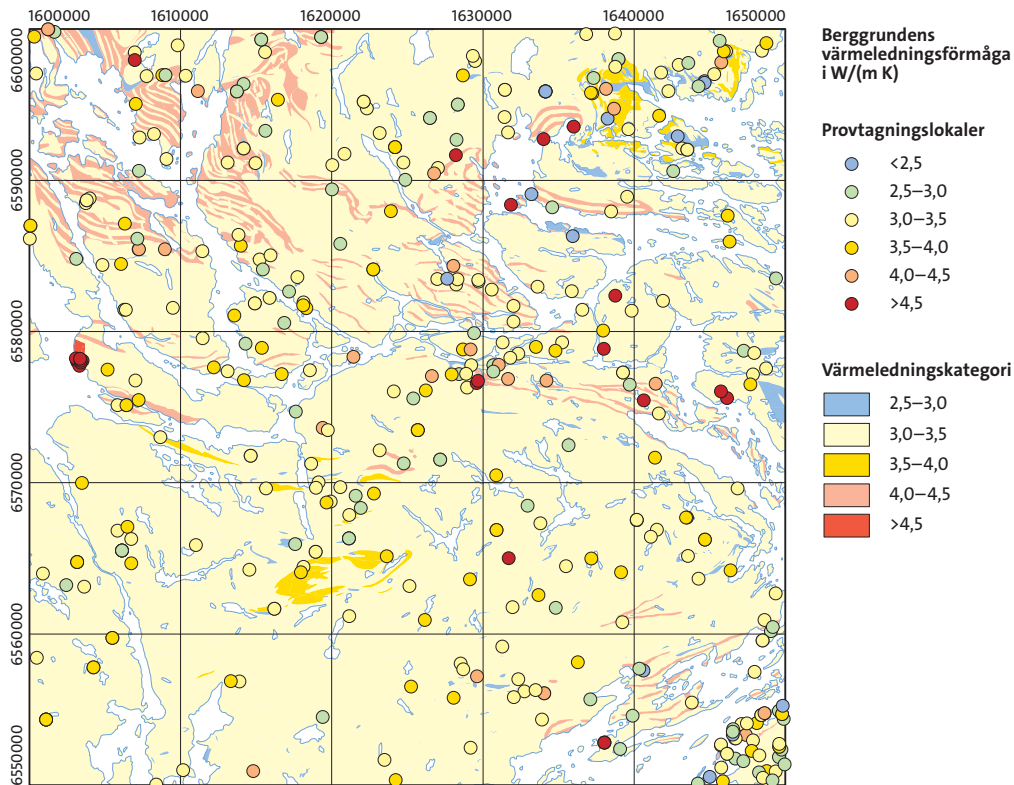
Kartor för värmeledning – bergarter

En översiktlig presentation av bergarternas värmeledande egenskaper visas för Stockholm och Skåne som pilotområden. Först och främst kan data från de analyser som anger ett λ -värde för ett koordinatsatt bergartsprov användas för att ta fram en karta som baseras på analysresultaten för respektive bergart och dess förekomst. Eftersom proverna vanligtvis är ojämnt geografiskt fördelade och λ -värden är knutna till specifika bergarter med en rumslig och relativt tydlig avgränsad utbredning efter bergartsgränser, är det olämpligt att använda sig av interpolationsmetoder för att illustrera variationer i berggrundens värmeledning. Genom att i stället gruppera de analyserade bergarterna efter bergartstyp går det att bedöma den variation, eller det intervall av λ -värden, som varje bergartsgrupp ger. De olika intervallen ligger sedan till grund för klassificeringen av ytor på den tematiska kartan.

Värmeledningskarta för Stockholm

Data som visar mineralfördelning och bergarter i området kring Stockholm, tillsammans med information från TCS-mätningar på ett urval bergartsprov, har använts för framställning av en karta som visar värmeledningsförmågan i berggrunden (fig. 24). Bergarternas värmeledningsförmåga har indelats i fem klasser, från 2,5 till mer än 4,5 W/m K. Områdenas utbredning baseras på berggrundskartan (Persson m.fl. 2001). I kartbilden visas också punktinformation med analysvärdet för provtagna bergarter (Schwarz m.fl. 2010).

Bergarterna i området domineras av metasedimentära och granitoida gnejser samt granit. Värmeledningsförmågan för dessa bergarter varierar kraftigt. Medelvärdet ligger mellan 3,0 och 3,5 W/m K. Mindre vanliga bergarter i regionen består av kvartsrika gnejser av sedimentärt ursprung och gnejsiga graniter med ett medelvärde på värmeledningsförmågan mellan 3,5 och 4,5 W/m K. För områden med basiska (kvartsfattiga) bergarter, t.ex. gabbro och diorit, är motsvarande värde mellan 2,5 och 3,0 W/m K. Små förekomster av sandsten (Ekerö) har de högsta uppmätta värdena. Här har bergarterna en värmeledningsförmåga som överstiger 4,5 W/m K.



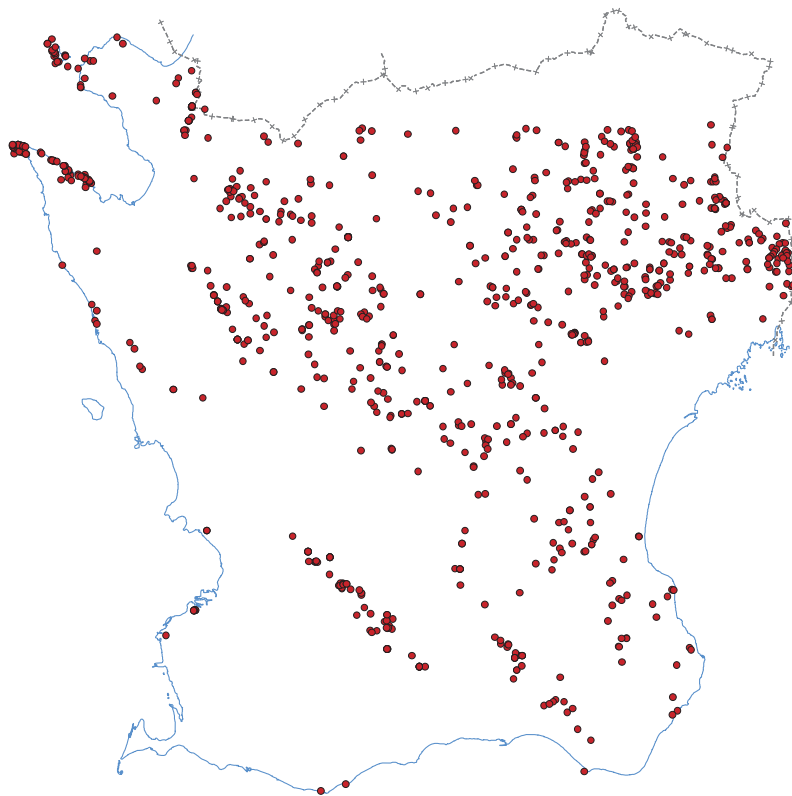
Figur 24. Exempel på bedömd värmeledningsförmåga i berggrunden över Storstockholm (50 × 50 km). Kartan baseras på en klassificering av förekommande bergarters uppmätta eller beräknade värmeledningsförmåga vid provpunkterna (efter Schwarz m.fl. 2010).

Värmeledningskarta för Skåne

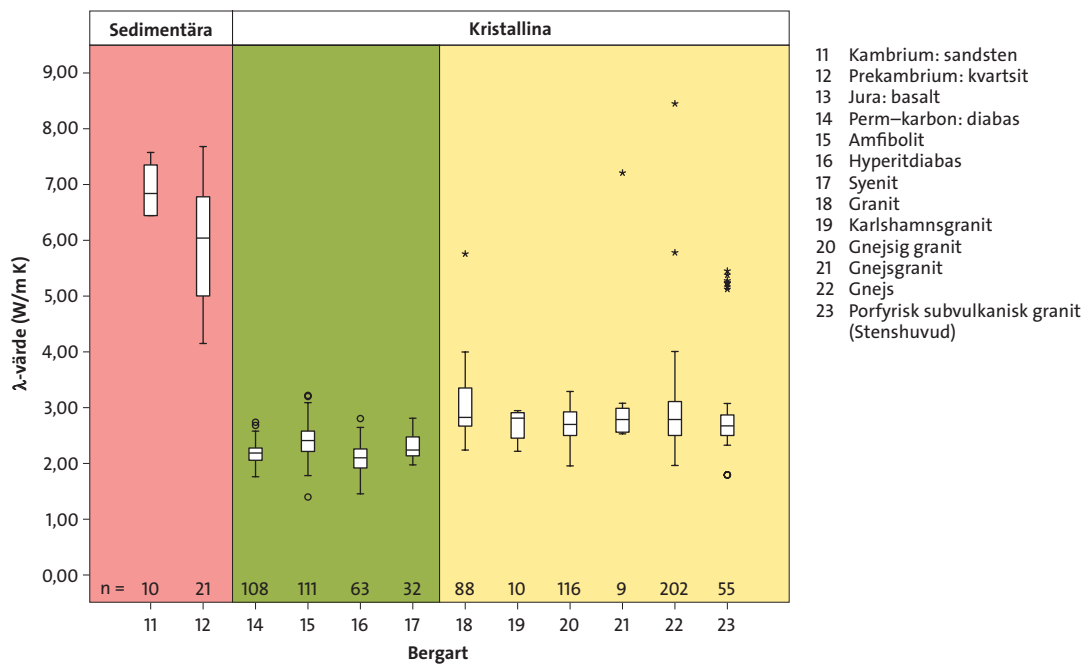
Som underlag till kartan användes SGUs mineralfördelningsdata (från punkträkningsanalyser) på Skånes olika bergarter. Data från 870 prov, geografiskt fördelade enligt figur 25, har delats upp efter bergartstyp och värmeledningstal. De prov som är analyserade med punkträkningsanalys är tydligt överrepresenterade av kristallina bergarter som granit, gnejser av olika ursprung, amfibolit och diabas (fig. 26). Detta beror på att punkträkning normalt inte utförs på de sedimentära bergarterna, åtminstone inte rutinemässigt, i samband med kartläggning av berggrunden. Information om mineralsammansättning i vissa sandstenar finns dock, i begränsad omfattning. Andolfsson (2013) utförde därför ett kompletterande fältarbete och analys av de värmeledande egenskaperna på Skånes sedimentära bergarter.

Knappt 200 bergartsprov har analyserats avseende värmeledning och värmediffusivitet med hjälp av en TCS (Thermal conductivity scanner), se s. 24. Resultaten från TCS-mätningarna visas i figur 27. Analyserna ingick som en viktig del i ett mastersarbete vid Lunds universitet och fokuserade dels på värmeledning i de sedimentära bergarterna i Skåne, dels på en jämförelse mellan beräknade λ -värden och uppmätta λ -värden från TCS-instrumentet (Andolfsson 2013). Dessutom togs det fram ett exempel på karta över värmeledning för Skånes bergarter i anslutning till detta arbete.

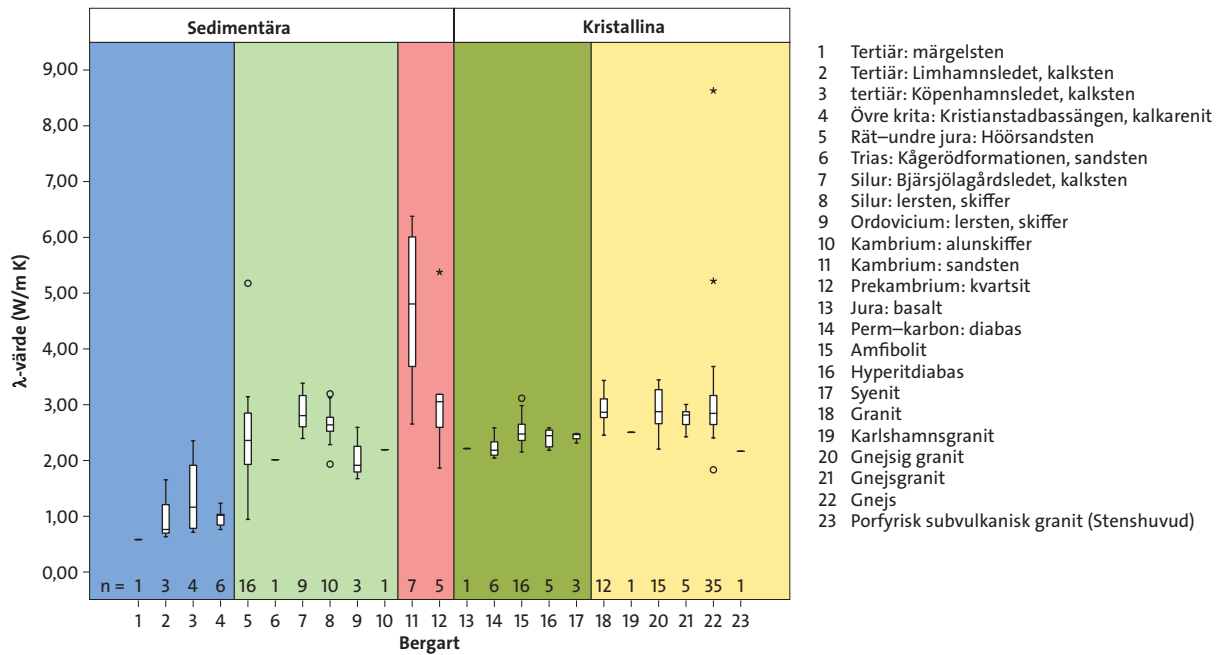
Diagrammen i figurerna 26 och 27 visar skillnaden i λ -värde för olika bergartsgrupperingar. För de sedimentära bergarterna är uppdelningen relativt tydlig, där kambrisk sandsten och prekambrisk kvartsit uppvisar de högsta värdena. De kristallina bergarterna visar inte lika stor variation (om man inte inkluderar den prekambrisk kvartsiten). De relativt kvartsfattiga berg-



Figur 25. Provtagningspunkter för analyserade bergarter i Skåne län. Underlaget är från Andolfsson (2013). Analysmetod är inte angiven i den här figuren. Geografiskt underlag från Lantmäteriets digitala översiktskarta.



Figur 26. Låddiagram som visar värmeledningsförmågan λ i olika skånska bergarter, beräknade från punkträkningsdata (mineralsammansättningen). För varje bergart anges max, min (vertikala streck) och spridningen av 50 % av mätvärdena (vit låda) samt medianvärdet som ett svart horisontellt streck. Avvikande värden anges med asterisk (efter Andolfsson 2013).



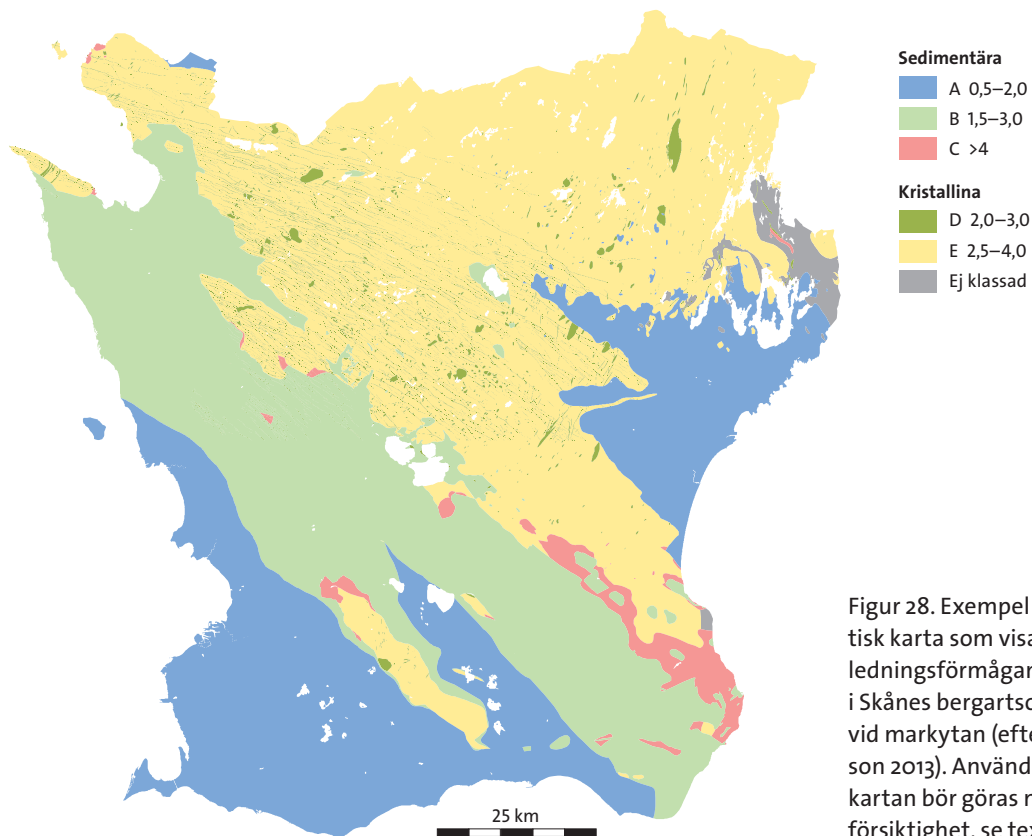
Figur 27. Låddiagram som visar λ -värdet på bergartsprover från Skåne uppmätt med TCS (Thermal conductivity scanner). För varje bergart anges max, min (vertikala streck) och spridningen av 50 % av mätvärdena (vit låda) samt medianvärdet som ett svart horisontellt streck. Avvikande värden anges med asterisk (efter Andolfsson 2013).

arterna (bl.a. amfibolit, basalt, diabas och syenit) har generellt något lägre λ -värde jämfört med mer kvartsrika bergarter som granit och gnejs. Färgsättningen av bergartstyperna i diagrammen är densamma som visas i den tematiska kartan över värmeledning för Skånes bergarter (fig. 28).

Kartan i figur 28 visar översiktligt bergarternas variation vad gäller värmeledningsförmåga, enligt de analyser som Andolfsson (2013) redovisar. Bergarternas utbredning är baserad på berggrundsinformation i SGUs kartdatabas i skala 1:50 000. Kartan är tänkt som ett exempel på underlag för översiktlig planering inför anläggning för geoenergi. Framför allt syftar den till att ge en regional bild av bergarternas värmeledningsförmåga. De olika bergarterna som representeras i respektive yta är indelade i klasserna enligt teckenförklaringen och varje bergart har tilldelats en klass som baseras på spridning i värmeledningstal bergarterna visat enligt figur 26 och 27 ovan. De intervall som anges i teckenförklaringen överlappar till en viss del men de visar också den variation av värden som finns inom varje bergartsgrupp. Det bör även påtalas att kartan är ett första test av hur en kombination av analyserade och beräknade resultat av värmeledningsförmågan kan användas för framställning av en karta som i det här fallet är mycket regional. För en mer detaljerad karta krävs en mer omfattande analys. Det gör att den presenterade kartan endast kan användas som ett generellt underlag. Det framgår dock tydligt att områden med yngre sedimentär berggrund har generellt sämre värmeledningsförmåga, medan framför allt de kambriska sandstensområdena har de absolut bästa värmeledande egenskaperna i Skåne.

Utvärdering av värmeledningskartor

Vid framställningen av kartorna har man inte tagit hänsyn till faktorer som deformationsgrad, homogenitet, sprickighet, porositet och grundvattenflöde, vilka alla påverkar värmeledningsförmågan i berggrunden. För Skånes del är det framför allt i porösa sedimentära bergarter som



Figur 28. Exempel på tematisk karta som visar värmeledningsförmågan (i W/m K) i Skånes bergartsområden vid markytan (efter Andolfsson 2013). Användning av kartan bör göras med viss försiktighet, se text.

värdena kan vara missvisande eftersom klassificeringen grundas på TCS-mätning av torra eller vattenomättade bergartsprov tagna i markytan. Eftersom kartorna endast visar förhållandena i marknivå kan de bli osäkra, framför allt inom områden med skiftande bergartsfördelning, när det gäller bedömningar av förhållandena på djup motsvarande ett normalt geoenergi-borrhål. Särskilt inom områden med sedimentär berggrund kan förhållandena skifta mycket på djupet vilket påverkar borrhålets sammanvägda termiska egenskaper. För att komplettera kartorna krävs kompletterande djupinformation i områden med heterogen berggrund. Den porösa och relativt mjuka, kvartsfattiga kalkstenen i Skåne har t.ex. generellt sett mycket låga värmeledningsstal, men lokal förekomst av flinta och förkylad kalksten i ett borrhål kan avsevärt höja borrhålets termiska egenskaper (se fig. 7). Enskilda lager kan i ett sådant fall bidra till merparten av det effektuttag som kan göras från ett borrhål. En annan faktor som då bör beaktas är värmediffusionen som anger hur snabbt värme förflyttas i berggrunden. Vid homogena berggrundsförhållanden med likartade termiska egenskaper på djupet blir den termiska påverkan i borrhålets omgivning relativt homogen. Däremot kan enskilda bergartslager med avsevärt högre värmediffusion och värmeledande egenskaper medföra en oregelbunden termisk påverkan på omgivningen. I enskilda lager kan då den termiska påverkan vara relativt mycket större än i övriga bergartslager i samma borrhål.

Förutsättningar finns idag att, på samma sätt som för Skåne och Stockholm, ta fram kartor som visar de värmeledande egenskaperna för olika bergartsområden i markytan. Det finns framför allt möjligheter att från befintliga data göra motsvarande kartor för stora delar av Västra Götaland, Halland, Blekinge och Mälarenregionen samt delar av Småland, Östergötland och lokalt utmed Norrlandskusten. Med ett ökat antal TCS-mätningar på bergartsprov och borrhål

kärnor kan mineralfördelningsdata kalibreras och kompletterande information tas fram. Med stöd av sådana undersökningar och mätningar i borrhål, samt jämförelse med mätdata från termiska responstester som branschen utför i borrhål, kan kartorna ytterligare förbättras och användbarheten öka.

Jorddjupsmodell för Skåne

Uppbyggnaden av Skånes berggrund och jordarter skiljer sig i många fall avsevärt från övriga delar av landet. Framför allt är det förekomsten av en hög andel sedimentär berggrund med olikartad konsolideringsgrad som påverkar jordlagerförhållandena. Här finns också områden med kraftigt vittrad kristallin berggrund samt regionala och lokala förkastnings- och sprickzoner som tillsammans med berggrundens varierande sammansättning påverkat jordlagerföljdernas mäktighet och uppbyggnad. Regionen har därför använts som ett testområde för att jämföra två kartor – en jorddjupskarta som är framtagen med samma metodik som i den nationella datorgenererade modellen som beskrivits tidigare (se fig. 16), och en karta som konstruerats manuellt från brunn-data och hålldata och där hänsyn och bedömningar gjorts utifrån lokal geologisk kunskap.

Datorgenererad jorddjupsmodell

Modellen i figur 29 är framtagen enligt den metodik som beskrivs i Daniels & Thunholm (2014). Den bygger på i stort sett samma information som den manuellt framtagna kartan, men med den skillnaden att man antagit vissa samband mellan jordlagrens uppbyggnad och jordlagrens mäktighet samt att man vägt in rumsliga värderingar för sprickzoner m.m. i beräkningsmodellen. Kartan ger i allmänhet en mer detaljerad avgränsning av respektive områdes mäktighet jämfört med den manuellt framtagna modellen.

Manuellt framtagen jorddjupsmodell

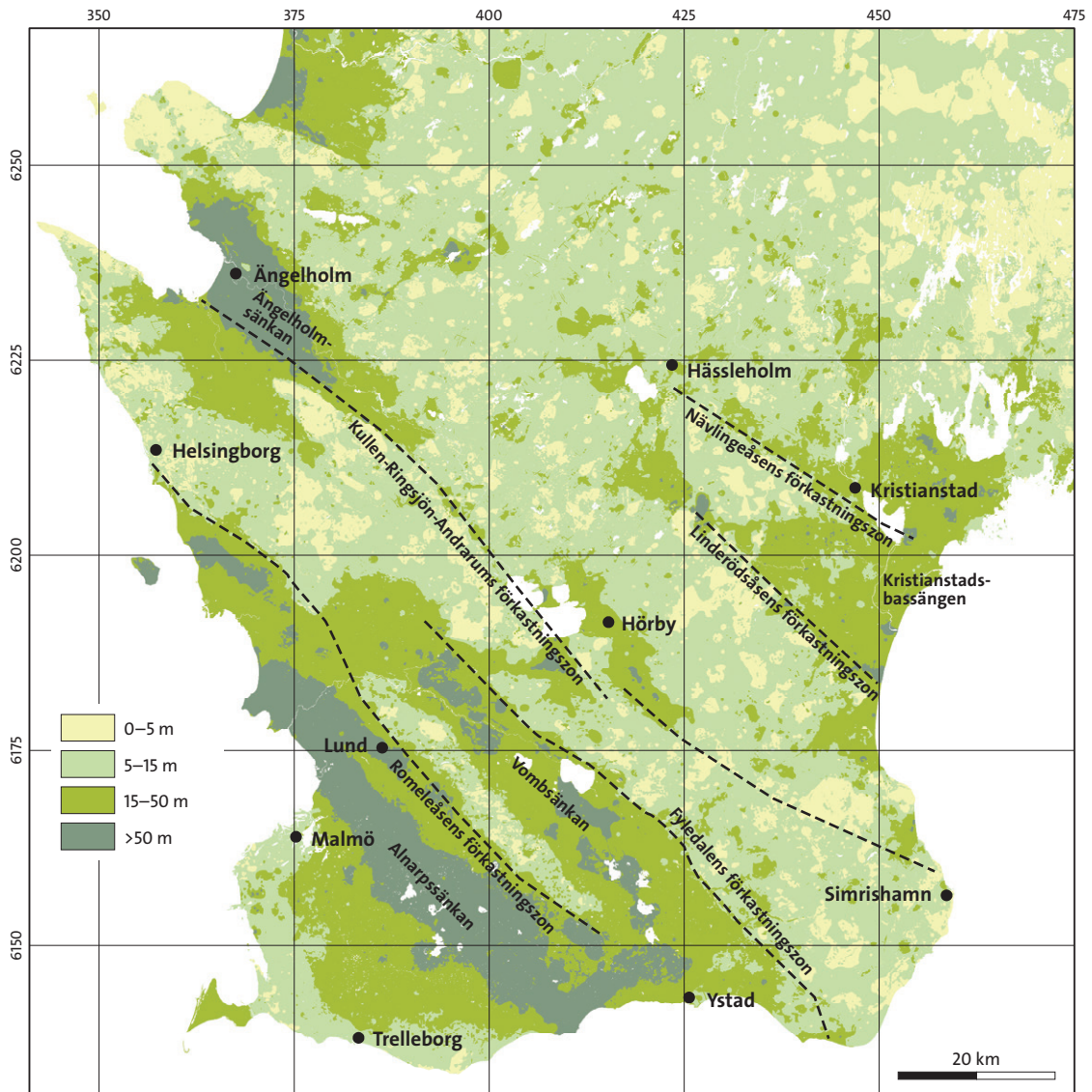
Den manuellt framtagna jorddjupsmodellen för Skåne visas i figur 30. Modellen baseras på jorddjupsinformation från SGUs brunnarkiv och på observationer av berg i dagen. Den första versionen togs fram som ett uppdrag åt Länsstyrelsen i Malmöhus län år 2000. En äldre SGU-karta över sydvästra Skåne har också använts som underlag (Gustafsson 1980). Dessa kartor har sedan kompletterats med ny information från databaserna enligt ovan. Brunnsuppgifter som registrerats i SGUs brunnarkiv till och med maj månad 2011 har använts. Vid denna tidpunkt var 26 744 skånska brunnar registrerade. Av dessa avslutas 1 405 i jordlagren utan att nå ner till underliggande berggrund. De har ändå kunnat användas eftersom de ger viss information om jordtäcket minimala mäktighet på platsen för borrhningen, särskilt i områden där det finns få andra borrhningar. Antalet borrhningar i Skåne är relativt stort i jämförelse med andra delar av landet. I anslutning till tätorter finns i regel mer än 10 brunnar per kvadratkilometer. Utslaget på hela länet är det ca 3 brunnar per kvadratkilometer.

Information om hållar (berg i dagen) har dessutom hämtats från jorddatabasen. Totalt ingår 14 050 hållytor samt ca 4 000 observationer, som är inlagda som linje- (t.ex. vägskärningar) eller punktobjekt (små hållar) i databasen.

Modellen korrigerades för hand där hänsyn togs till nya data. I de fall där jorddjupsuppgifter markant avvek från närliggande information, kontrollerades tolkningen med information från brunnsprotokoll. I äldre brunnsprotokoll anges ofta detaljerade uppgifter om såväl jordlagrens som berggrundens uppbyggnad, vilket avsevärt kan förbättra tolkningen.

Utvärdering av jorddjupsmodeller

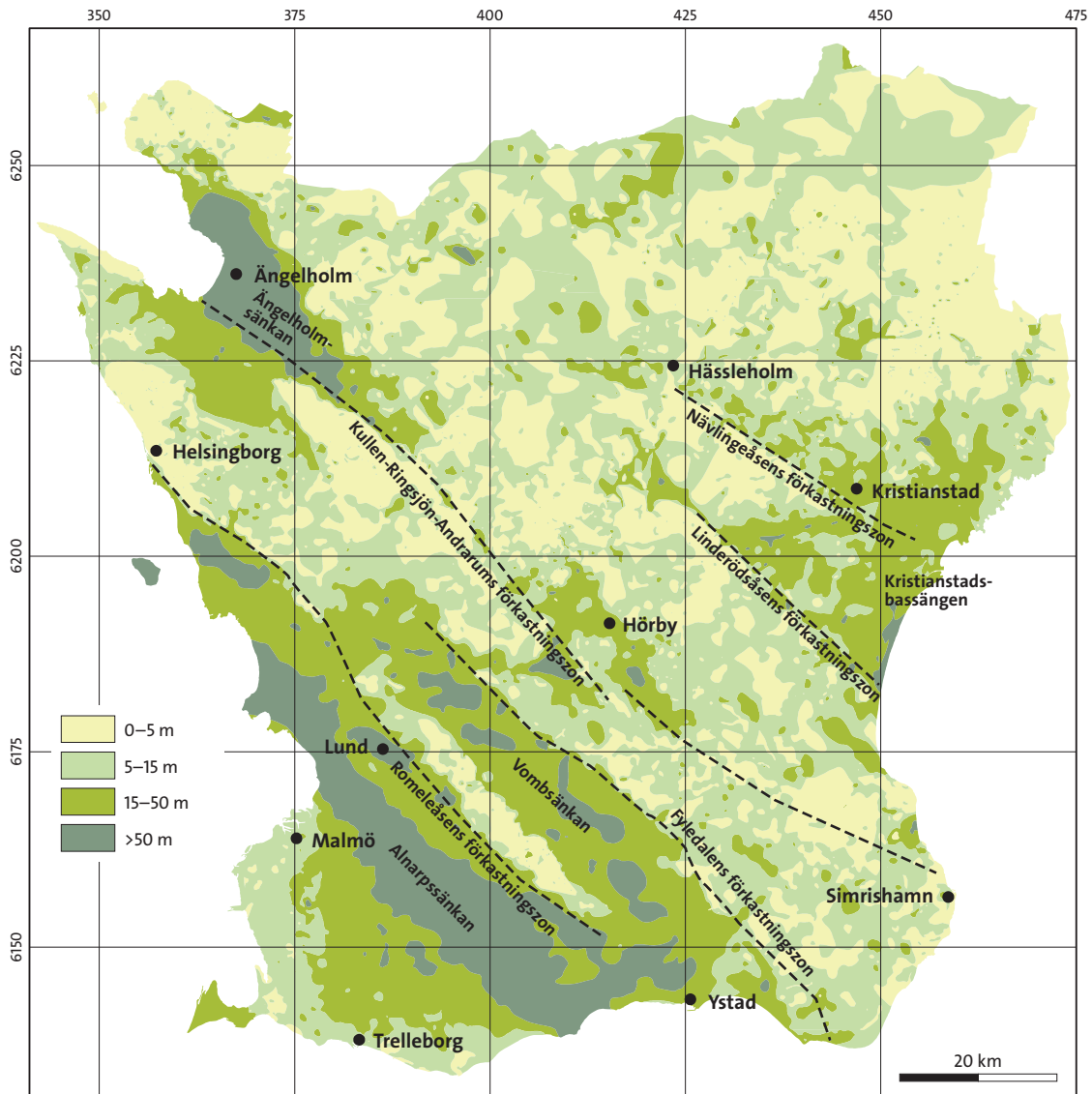
Båda modellerna visar i stor sett samma fördelning av jordmäktigheter och en koppling mellan jordmäktighet och den underliggande berggrundens uppbyggnad samt förekomsten av större



Figur 29. Datorgenererad jorddjupsmodell enligt metodik beskriven i Daniels & Thunholm (2014).

förkastningszoner. En väl synlig, nordvästlig trend i områdena med stora jordmäktigheter sammanfaller med riktningen på de större förkastningszonerna i berggrunden tillhörande Kullen-Ringsjön-Andrarumförkastningen samt Romeleåsens- och Fyledalens förkastningszoner. Det är också tydligt att jordlagren inte är lika mäktiga inom områden med kristallin och paleozoisk berggrund (fig. 31). Jordarterna i dessa områden domineras av morän och jorddjupen är vanligtvis mindre än 15 m. Dock kan det lokalt vara stora skillnader, speciellt i centrala Skåne, där det förekommer kaolinvittrad berggrund. Här kan vittringszonen vara uppemot 100 m mäktig. Den datorgenererade modellen bedöms också ge en alltför detaljerad bild av jorddjupen i dessa områden, vilket bör beaktas vid användningen.

Jorddjupen i sydvästra Skåne är förhållandevis enkla att bedöma och beräkna, både beroende på att här finns ett stort antal borrhningar och på förekomsten av relativt homogena jordlager och enhetlig berggrund. Båda modellerna visar här i stort sett samma bild av jordmäktigheterna. De

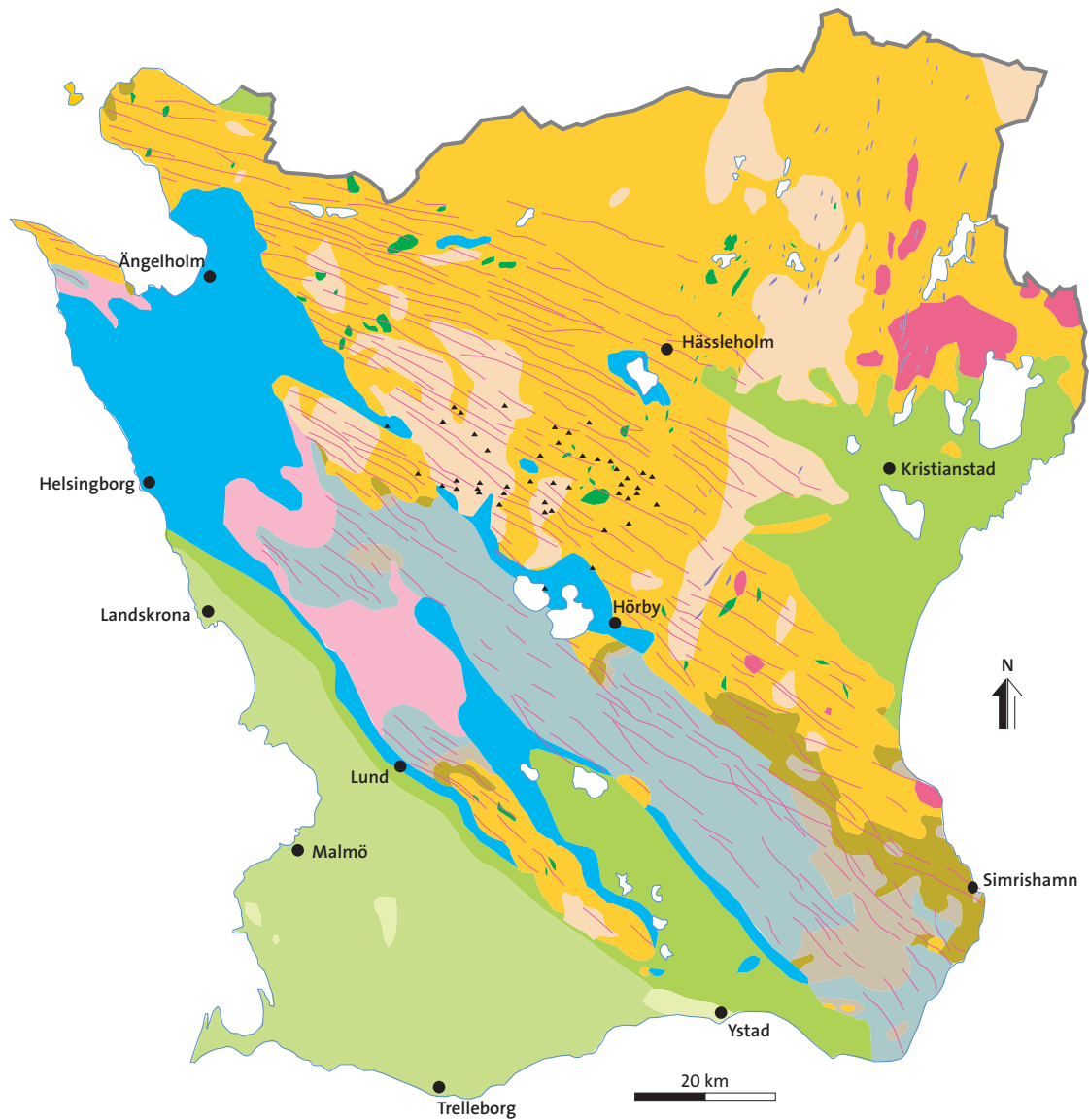


Figur 30. Jorddjupsmodell framtagen manuellt med stöd av framför allt brunnsdata, hållinformation och lokal geologisk kunskap.

mäktigaste jordlagren påträffas i Alnarps-sänkan, som utgör en väl avgränsad dalsänka i berggrunden. Här finns uppgifter om upp till 183 m mäktiga jordlager. Dalsänkan är väl dokumenterad med borrhningar och geofysiska undersökningar eftersom grusavlagringarna i dess djupare delare utgör en betydande akvifer. Jorddjupen har tidigare dokumenterats av Gustafsson (1980).

I båda modellerna framträder också de betydande jordmäktigheter som finns i Ängelholms-sänkan, Vombsänkan och Kristianstadsbassängen, vilka sammanfaller med områden med relativt dåligt konsoliderad yngre sedimentär berggrund. Områdena är också tydligt avgränsade av förkastningszoner och upphöjda bergsryggar, de s.k. skånska urbergshorstarna.

Sydväst om Östra Ringsjön och i Vombsänkan framträder sänkor i berggrunden som troligtvis frampreparerades under prekvarterär tid (yngre krita-tertiär) för att i samband med erosion under de kvartära istiderna få den form de har idag. Inom dessa områden påträffas också mycket mäktiga jordlager (Sivhed 1991) som ofta är 20–50 m tjocka.



Den sedimentära berggrunden

- Paleocen–eocen: karbonatrik lera, siltsten och mägerl
- Danien: vit–ljusgrå bryozokalksten med flinta
- Yngre krita: skrivkrita, sandig kalksten, skalgruskalksten, lerig kalksten och sandsten
- Jura: sandsten, lera, lersten och kol
- Jura: vulkaniska tuffer och basalt

- Yngre trias: rödbruna–gröna leriga sandstenar, konglomerat och leror (Kågerödsformationen)
- Silur: domineras av grå–mörkgrå skiffer och siltsten, inslag av kalksten och sandsten (Öved–Ramsåsa) i de yngsta delarna
- Yngre kambrium–äldre ordovicium: alunskiffer med inslag av orsten och kalksten. Ordovicium: mörkgrå skiffer med inslag av mörkgrå–svart kalksten
- Äldre kambrium: kvartsitisk sandsten

Urberget

- Perm–karbon: diabasgångar
- Granit: röd medelkornig och fältspatrik
- Amphibolit: gångar, linsor och ådror, ofta granatförande
- Hyperitdiabas: fin- till medelkornig gångbergart
- Gnejsgranit: medel till grovkornig, rödgrå, ställvis bandad till ådrad
- Ortognejs: finkornig, röd till rödgrå

Figur 31. Berggrundskarta över Skåne, där det påträffas såväl sedimentära som kristallina bergarter. För deras betydelse, se diskussion i text.

Tabell 2. Sammanställning av foderrörsdrivning i olika typer av bergarter och berggrund i Skåne (se även figur 32).

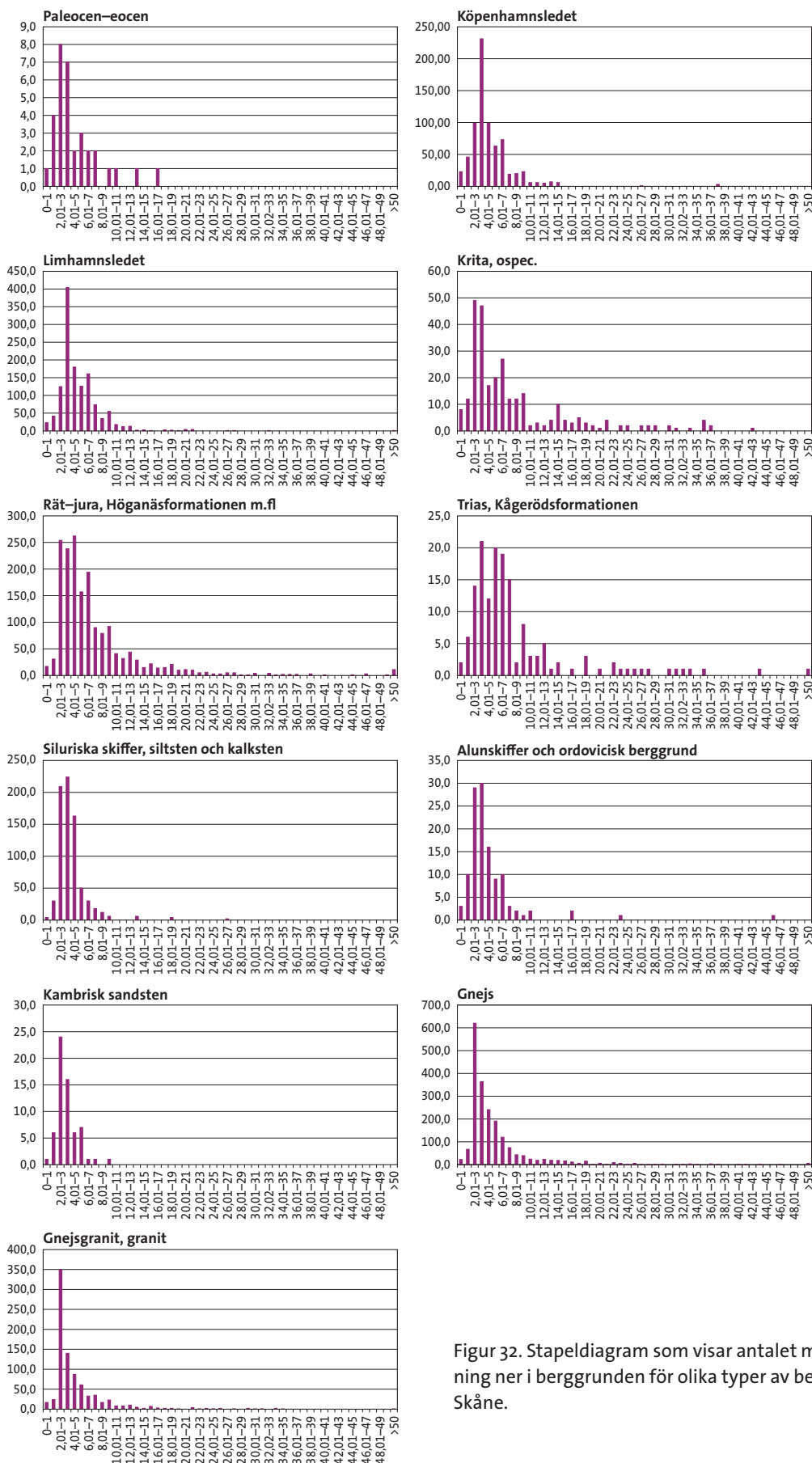
Formation, berggrund	Antal brunnar	Antal meter rördrivning i berg	
		Median	Max
Paleocen–eocen	32	3,0	16,0
Köpenhamnsledet	730	3,1	37,0
Limhamnsledet	1291	4,0	73,0
Krita	282	5,0	42,0
Rät–jura	1742	5,3	80,0
Kågeröd	152	6,0	63,0
Silur	757	3,0	26,0
Ordovicium – alunskiffer	119	3,0	45,5
Kambrisk sandsten	63	3,0	9,0
Gnejs	1984	4,3	64,3
Gnejsgranit	853	3,0	34,0

Bergarter och geoenergi borrning i skånsk berggrund

Den skånska berggrunden är unik. Här förekommer både kristallina bergarter som t.ex. gnejs och granit och yngre sedimentära bergarter som t.ex. kalksten, skiffer och sandsten (fig. 31). Detta medför att olika krav ställs vid borrning i dessa bergarter, inte enbart beroende på deras hårdhet, porositet, lagring och vattenföring, utan i hög grad även med hänsyn till deras termiska egenskaper. Flertalet av dessa faktorer påverkar starkt, tillsammans med hur stort energiutbyte som ska eftersträvas, hur en geoenergianläggning ska dimensioneras. I flertalet fall är borrhjupet den mest betydelsefulla faktor som påverkar kostnaden. Borrhjupet blir generellt större i sedimentär berggrund än i urberg beroende på att sedimentära bergarterna i regel har sämre värmeledande egenskaper. Det finns även en skillnad mellan södra och norra Sverige på grund av att medeltemperaturen i marken skiljer sig åt. I Norrland kan man anta en marktemperatur mellan 3 till 6 °C medan man i Skåne har en medeltemperatur på ca 10 °C. Detta medför generellt ca 10 % större borrhjup i Norrland jämfört med i Skåne för motsvarande berggrund och energiuttag.

Förutom berggrundens termiska egenskaper har dess stabilitet stor betydelse för hur lätt eller svårt det är att borra. Bergmaterialets termiska in situ-egenskaper bestämmer borrhåldjupet för installeringen av geoenergi. Berggrundens stabilitet och borrarbarhet har stor betydelse för att man ska nå dessa djup. I områden med mycket hård berggrund, t.ex. kvartsit, kan borrarningen vara komplicerad och kostsam på grund av stort slitage på borrhjup. I områden med sprickig eller vittrad berggrund, t.ex. i anslutning till förkastningszoner, kan det bli svårt att nå önskat borrhjup på grund av ras i hålet.

Det finns ett tydligt samband mellan antalet meter foderrör i berggrunden och bergartstyp. Geoenergi brunnar i yngre sedimentära bergarter i t.ex. nordvästra Skåne kräver relativt fler meter foderrör jämfört med i områden med hårda bergarter som t.ex. kambrisk sandsten. En sammanställning av drygt 7 100 brunnsprotokoll från geoenergi brunnar redovisas i tabell 2 och figur 32. Det går att använda denna information tillsammans med bergarternas värmeledningsförmåga som ett underlag för en sammanvägd bedömning av förutsättningar för borrning och geoenergi.



Figur 32. Stapeldiagram som visar antalet meter rödrivning ner i berggrunden för olika typer av berggrund i Skåne.

DISKUSSION

SGUs arbete med geoenergifrågor är en naturlig del av den myndighetsroll SGU har och de ställningstaganden SGU gjort i samband med framtagandet av en hållbarhetspolicy. Det finns tydliga instruktioner för SGUs roll i arbetet med miljökvalitetsmålen:

”SGU är ansvarig nationell myndighet för miljökvalitetsmålet Grundvatten av god kvalitet. I detta mål ingår även målet att bevara naturgrusförekomster som är viktiga för dricksvattenförsörjningen, energilagring eller för natur- och kulturlandskapet.”

SGUs roll i ett hållbarhetsperspektiv är beskrivet i SGUs hållbarhetspolicy:

”SGU ska med sin expertkunskap och i sin myndighetsroll bidra till en hållbar samhällsutveckling. Vad vi arbetar med, hur vi arbetar och vilken inriktning vi har på våra beslut och ställningstaganden – allt detta bidrar. SGUs roll och handlingsutrymme definieras dels av våra uppgifter som anges i bland annat vår instruktion och vårt regleringsbrev, dels av den lagstiftning som berör SGUs verksamhet. Vår hållbarhetspolicy ska främst inriktas mot de områden som omfattas av vårt myndighetsuppdrag.”

SGUs vision om det hållbara samhället och kopplingen till geoenergi (utdrag ur SGUs hållbarhetspolicy):

- *Energianvändningen är effektiv med en stor andel förnybar energi.*
- *Tillgången på rent dricksvatten är säkrad genom att våra vattenresurser har ett fullgott skydd och utsläpp av farliga ämnen har minimerats. Naturgrusutvinningen har reducerats till ett minimum, och den sker bara där värdefulla grundvattentillgångar och områden av betydelse för natur- och kulturmiljön eller för utvinning av geoenergi inte påverkas.*

En viktig uppgift i SGUs fortsatta arbete med geoenergifrågor är att förena de olika intressen som SGU ansvarar och verkar för vad gäller miljö och hållbarhet. Det finns vissa risker med geoenergi som måste behandlas på ett bra sätt för att inte råka i konflikt med grundvattenskyddet. Möjliga konflikter mellan geoenergi och grundvatten kan vara:

- Spridning av salt grundvatten och föroreningar, både i samband med borrning och i driftskede.
- Eventuella konsekvenser av uppvärmning av grundvattnet i samband med akviferlager.

SGU har en viktig roll som remissinstans vid bedömningen av lämpligheten för geoenergi-anläggningar inom vattenskyddsområden. När det gäller vattenskyddsområden är det mestadels relativt tydligt vilka riktlinjer och regleringar som finns för respektive område (skyddszoner). Det är däremot ofta svårare för kommunernas handläggare att bedöma och fatta beslut avseende anläggningar i övriga områden där det kan finnas andra problemställningar att ta hänsyn till. Men ju mer SGU arbetar med geoenergifrågan och dess förhållande till grundvattenskyddet, desto bättre underlag kommer att finnas att tillgå för handläggaren. Att utveckla kunskap och underlag öppnar för ett mer nyanserat förhållningssätt till de olika intressena förnybar geoenergi och grundvatten av god kvalitet.

Diskussioner med Svenskt Geoenergicentrum, som är ett kunskapscentrum för geoenergifrågor, har resulterat i ett förslag att SGU gör en sammanställning av de miljökonsekvenser som kan uppkomma i samband med geoenergi inom enskilda fastigheter. Det behöver inte nödvän-

digttvis vara inom förorenade områden eller vattenskyddsområden – fokus ska ligga på grundvatten- och markfrågor. Några frågor som kan behandlas är:

- Vilka effekter har lokala temperaturförändringar i marken kring geoenergialäggningar (t.ex. kemiska, fysikaliska och mikrobiologiska)?
- Vad händer och vad kan konsekvenserna bli vid kortslutning av olika akviferer och vattenförande zoner i samband med en energibrunn?
- Vilka blir konsekvenserna vid ett eventuellt läckage av värmebärare eller förorening som härrör från ytan med avseende på bland annat spridning och eventuell biologisk nedbrytning?
- Vilka blir konsekvenserna vid en förorening som härrör från ytan vad gäller spridning, eventuell biologisk nedbrytning i det mycket långsiktiga perspektivet samt möjliga skyddsåtgärder (t.ex. återfyllning av energibrunnar, s.k. grouting)?

I denna rapport har exempel på information som kan användas för att bedöma metod, design och kostnad för att geoenergialäggningar presenterats. Både tematiska modeller och punktinformation ska vidareutvecklas. Fokus kommer att vara olika användarperspektiv på den information som SGU tar fram. Med hjälp av tematiska kartor och tjänster kan informationen riktas till olika användargrupper. Det finns några fundamentala frågeställningar som behöver belysas och besvaras för att informationen ska vara så användbar som möjligt och användas på rätt sätt:

- Hur förstår användaren vilka begränsningar som finns i informationen och hur den bör användas? Hänsyn till deformation, sprickighet, kornstorlek, bergspänningsförhållanden och porositet har t.ex. inte inkluderats i våra exempel i denna rapport men kan vara avgörande för en anläggnings effektivitet.
- Det är viktigt att beskriva informationen på ett tydligt sätt. Det finns både avancerade och mindre avancerade användare. I många fall kan den avancerade användaren direkt utläsa från befintliga geologiska underlag vilka förhållanden som råder i ett område och t.ex. många borrentreprenörer använder redan nu SGUs berg- och jordinformation regelbundet. Mindre avancerade användare kan behöva vägledning och förenkling av det ganska omfattande underlag som SGU kan tillhandahålla.
- Skalan i SGUs underlag gör att informationen oftast lämpar sig för översiktlig planering. Inom geologiskt homogena områden, och inom områden som är väl undersökta, är informationen mer förutsägbar och tillförlitlig. Det är viktigt att det tydligt framgår vilken presentationsskala som gäller för framför allt kartorna, och att det i kartvisare sätts gränser för hur långt det går att zooma in i kartan.
- Eftersom SGUs information till stor del är tvådimensionell och saknar information om bergförhållanden på djupet är det nödvändigt att beskriva hur man kan uppskatta vad som finns ett par hundra meter ner i berggrunden, dvs. till det ungefärliga djup man vanligen anlägger geoenergi i borrhål. Det är viktigt att klargöra skillnader mellan kristallina gnejs- och granitområden och områden med stratifierad sedimentär berggrund, som exempelvis i Skåne.

SGUs kunskap om berggrunden, jordarterna, grundvattnet och de geofysiska förhållandena ger goda förutsättningar för ett kompetent stöd till samhället avseende geoenergi. Förutom geologisk kompetens har SGU även analys- och laborietrustning som möjliggör mätning av värmeledningsförmåga, värmediffusivitet och värmekapacitet på bergartsprov samt temperaturförhållanden i borrhål. Dessutom produceras årligen åtskilliga resultat från punkträkningsanalyser som en del av SGUs kartläggningsverksamhet. Successivt pågår nu en uppbyggnad av en databas där information om bergarternas termiska egenskaper samlas. I takt med att jord-

och grundvatten undersöks kommer även annan viktig information som är relevant för geoenergi att förbättras kontinuerligt.

Förutom den information som samlas in genom SGUs reguljära kartläggningsverksamhet kan forsknings- och utvecklingsinsatser öka kunskapen om de geologiska förhållanden som kan vara relevanta vid anläggning för geoenergi. Dessutom kan information från andra aktörer bidra till en större kunskapsbredd. Som exempel kan nämnas de TRT-mätningar som utförs i pilotbrunnar, främst för dimensionering av större energilager i berg (BTES). Mätresultaten visar de termiska förhållandena i ett borrhål och ger en samlad bild av de geologiska faktorer som påverkar en brunnns effektivitet. Dessa mätningar kan vara ett värdefullt komplement till den information som SGU kan tillhandahålla. Mätningarna utförs av ett fåtal aktörer och de praktiska och juridiska förutsättningarna för att sammanställa mätningarna och göra dem tillgängliga bör utredas vidare.

SGUs brunnarsarkiv är den mest använda databasen på SGU. Databasen används för både internt och externt bruk och utgör ett betydande underlag för en mängd projekt inom bland annat hydrogeologisk forskning. Med tanke på att brunnarsarkivets information uteslutande härrör från externa källor är det av största vikt att se till att kvaliteten säkerställs så långt det är möjligt. En kontinuerlig dialog med både enskilda borrentreprenörer och deras branschorganisationer är nödvändig. Det behövs för att skapa ömsesidig förståelse och ge förutsättningar för att utbyta erfarenheter om grundvatten- och geoenergifrågor och därmed i förlängningen förbättra både kvalitet och innehåll i databasen.

Förbättring av både inlagring och användning av brunnsinformationen kan göras. Redan nu görs en del noteringar i brunnsprotokoll i samband med brunnborrning som rutinmässigt inte kan lagras i SGUs databas. Information om observationer som gjorts under själva borrningen om sprickighet, vattenföring i olika zoner, konduktivitet, bergart eller färg på borrhåls samt sjunkhastighet, finns av varierande kvalitet och omfattning i inskannade borrhålsprotokoll. Informationen kan ha stor användning för att bedöma berggrundens hydrogeologiska förhållanden. En målsättning är att SGU ska kunna lagra dessa uppgifter och dessutom visa det utåt. Detta skapar större motivation hos borrarerna att fylla i uppgifterna och därmed förbättra informationen, både kvalitativt och kvantitativt.

Den urbana utvecklingen i Sverige medför, precis som i övriga världen, ett stort behov av kunskap om mark och grundvatten för en hållbar planering av städer och infrastruktur. Det kan röra sig om anläggande av tunnlar, ledningsdragning, avloppssystem och fundament, men även utnyttjande av resurserna för t.ex. geoenergi. SGU deltar i EU-projektet SUB-URBAN (<http://www.sub-urban.eu/>) som startade 2013 och avslutas 2016. Projektet ska studera, stimulera och initiera grundvattenrelaterade projekt som syftar till ett hållbart byggande och utnyttjande av grundvatten i urbana miljöer, exempelvis grundvattenplanering för dricksvatten och geoenergi, grundvattenövervakning, markstabilitet, dagvattenhantering, översvämningar, kusterosion samt våtmarker.

Projektet SUB-URBAN kommer att redovisa ett antal projekt, problemställningar, och förslag på lösningar som direkt eller indirekt berör frågor kring geoenergi. Bland annat kommer man att redogöra för hur man övervakar grundvattennivåer, grundvattnets kvalitet och temperatur, samt hur man kan utföra geotermisk modellering. Resultatet ska göra att man kan planera för hur man kan eller bör använda marken och grundvattnet på bästa sätt utan att påverka andra intressen negativt. När det gäller geoenergi handlar det om att använda rätt metod på rätt plats, var man inte får påverka grundvattennivåerna, var man inte får pumpa runt vatten p.g.a. föroreningsrisk, var det är geologisk och ekonomiskt sett intressant att anlägga geoenergi etc. Resultaten från projektet kommer att bestå av delrapporter med olika inriktning och kommer att finnas tillgängliga på engelska via projektets webbplats. SGU kommer att låta översätta valda delar av resultaten till svenska i efterhand. De första rapporterna beräknas vara klara hösten 2015.

Hittills saknar vi i Sverige, i motsats till andra europeiska länder, en tydlighet i hur tillstånd och tillsyn av geoenergianläggningar ska ske och av vem. Ett exempel är hur den termiska rådig-
heten hanteras för den värme som finns i jord, berg och grundvatten. SGU anser att det finns
ett stort behov av en samordnande, nationell funktion som är bemyndigad att driva frågan om
geoenergianläggningar och som kan förmedla råd och riktlinjer om geoenergi. Vårt förslag är att
SGU kan ha en sådan nationell funktion.

TACK

Tack till Magdalena Thorsbrink som drev arbetet med att ta fram figurerna 1–5 och till Bo
Thunholm för textgranskning och bidraget med figur 18. Tack också till Anna Hedenström och
Kerstin Finn som granskat och kommit med värdefulla synpunkter som avsevärt förbättrat rap-
portens innehåll.

REFERENSER

- Andolfsson, T., 2013: Analyses of thermal conductivity from mineral composition and analyses
by use of Thermal Conductivity Scanner: A study of thermal properties in Scanian rocks.
Dissertations in Geology at Lund University 189, 27 s. (Mastersuppsats).
- Banks, D., 2008: *An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling*. Blackwell,
Oxford. 351 s.
- Barth, J., Andersson, O., Nordell, B., Hellström, G., Berg, M., Gehlin, S., Frank, H., & Ris-
berg, G., 2012: Geoenergin i samhället – En viktig del i en hållbar energiförsörjning. *Geotec*
2012:1, 92 s.
- Bauer, D., 2011: *Zur thermischen Modellierung von Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärme-
speichern*. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik. Universität Stuttgart, Diss.,
136 s.
- BINE, 2003: *Aquiferspeicher für das Reichstagsgebäude*. Energieforschung für die Praxis 13.
<<http://www.bine.info>>
- Bjelm, L. & Rosberg, J.-E., 2006: Recent geothermal exploration for deep seated sources in
Sweden. Geothermal resources-securing our energy future: proceedings of the GRC Annual
Meeting, San Diego, California, 10–13 September 2006. *Geothermal Resources Council Trans-
actions 30*, 655–658.
- Clauser, C. & Huenges, E., 1995: Thermal conductivity of rocks and minerals. I T.J. Ahrens
(red.): Rock physics and phase relations – a handbook of physical constants. *AGU Reference
Shelf 3*, 105–126.
- Daniels, J. & Thunholm, B., 2014: Rikstäckande jorddjupsmodell. *Sveriges geologiska undersök-
ning SGU-rapport 2014:14*, 14 s.
- Dreyer, W., 1974: *Materialverhalten anisotroper Festkörper: Thermische und elektrische Eigenschaf-
ten Ein Beitrag zur Angewandten Mineralogie*. Springer, Wien, New York. 295 s.
- EG, 2009: *Direktiv om främjande av användningen av energi från förnybara energikällor och om
ändring och ett senare upphävande av direktiven 2001/77/EG och 2003/30/EG*. Europaparla-
mentets och Rådets direktiv 2009/28/EG av den 23 april 2009.
- Eliasson, T., Eriksson, K.G., Lindquist, G., Malmquist, D. & Parasnis, D., 1991: Catalogue of
heat flow density data: Sweden. I E. Hurtig m.fl. (red.): *Geothermal atlas of Europe*. Interna-
tional association for seismology and physics of the earth's interior. International Heat Flow
Commission, Central Institute for Physics of the Earth. Hermann Hack Verlagsgesellschaft,
124–125.
- Erlström, M., 2014: Skiffergas och biogen gas i alunskiffern i Sverige, förekomst och förutsätt-
ningar – en översikt. *Sveriges geologiska undersökning SGU-rapport 2014:19*, 28 s.

- Eskilson, P., 1987: *Thermal analyses of heat extraction boreholes*, Doktorsavhandling, Matematisk fysik, Lunds universitet. 222 s.
- Fetter, C.W., 2001: *Applied hydrogeology*. Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River. 598 s.
- Gustafsson, O., 1980: Jorddjupskarta över sydvästra Skåne. *Sveriges geologiska undersökning Ba 28*.
- Hartmann, A., Rath, V. & Clauser, C., 2005: Thermal conductivity from core and well log data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 42, 1042–1056.
- Henkel, H., Bergman, B., Stephansson, O. & Lindström, M., 2004: Björkö energiprojekt – Slutrapport avseende geovetenskapliga undersökningar. *Kungliga Tekniska högskolan, TRITA-LWR.REPORT 3010*, 61 s.
- Horai, K., 1971: Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Journal of Geophysical Research* 76 (5), 1278–1308.
- Horai, K. & Simmons, G., 1969: Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Earth and Planetary Science Letters* 6, 359–368.
- Horai, K. & Baldrige, W.S., 1972: Thermal conductivity of nineteen igneous rocks, II: Estimation of the thermal conductivity of rock from the mineral and chemical compositions. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 5, 157–166.
- Kalskin Ramstad, R., Tiarks, H. & Midttømme, K., 2008: *Ground source energy – Thermal conductivity map in the Oslo region*. NGU presentation 33 Inter. Geol. Congress, Oslo, unpubl.
- Karlqvist, L., De Geer, J., Johnson, J., Thunholm, B., Lilja, A., Fagerlind, T. & Olsson, T., 1982: Exempel på verksamhet inom energisektorn vid SGU. *Sveriges geologiska undersökning Rapporter och meddelanden* 29, 83 s.
- Lilja, L., 1981: Störning av berggrundens temperaturförhållanden vid hammarborrning. *Sveriges geologiska undersökning Rapporter och meddelanden* 23, 38 s.
- Persson, L., Sträng, M. & Antal, I., 2001: Berggrundskartan 10I Stockholm, skala 1:100 000. *Sveriges geologiska undersökning Ba 60*.
- Popov, Yu.A., Pribnow, D., Sass, J., Williams, C. & Burkhardt, H., 1999: Characterisation of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. *Geothermics* 28, 253–276.
- Rosén, B., Gabriellson, A., Fallsvik, J., Hellström, G. & Nilsson, G., 2001: System för värme och kyla ur mark – en nulägesbeskrivning. *SGI Varia* 511, 240 s.
- Sanner, B., Hellström, G., Spitler, J. & Gehlin, S., 2005: *Thermal response test – current status and world-wide application*. Proc. World Geothermal Congress, Antalya, paper 1436, 9 pp.
- Schön, J., 2004: *Physical properties of rocks*. Elsevier, Amsterdam. 583 s.
- Schwarz, G., Göransson, M., Thunholm, B. & Förster, A., 2010: *Mapping thermal conductivity of the Swedish bedrock*. 29th Nordic Geological Winter Meeting, Oslo. NGF abstracts and proceedings 1, p. 177.
- SGU, 2008: *Normbrunn-07, Att borra brunn för energi och vatten – en vägledning. Normförfarande vid utförande av vatten- och energibrunnar*. Sveriges geologiska undersökning, 40 s.
- Signorelli, S., 2004: *Geoscientific investigations for the use of shallow low-enthalpy systems*. Dissertation ETH No. 15519, 159 s.
- Sivhed, U., 1991: A pre-Quaternary, post-Palaeozoic erosional channel deformed by strike-slip faulting, Scania, southern Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 113, 139–143.
- Sundberg, J., Thunholm, B. & Johnson, J., 1985: Värmeöverförande egenskaper i svensk berggrund. *Bygghälsningsrådet R97:1985*, 100 s.
- Sundberg, J., Wrafter, J., Back, P.-E. & Rosén, L., 2008: Thermal properties Laxemar – site descriptive modeling – SDM-Site Laxemar. *SKB R-08-61*, 307 s.

- Sundberg, J., Back, P.-E., Ericsson, LO. & Wrafter, J., 2009: Estimation of thermal conductivity and its spatial variability in igneous rocks from in situ density logging. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46, 1023–1028.
- Wallroth, T., Eliasson, T. & Sundquist, U., 1999: Hot dry rock research experiments at Fjällbacka Sweden. *Geothermics* 28, 617–625.