

GEOENERGI

Geologisk information för geoenergianläggningar – en översikt

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

september 2016

SGU-rapport 2016:16



SGU

Sveriges geologiska undersökning
Geological Survey of Sweden

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

Sveriges geologiska undersökning
Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-17 90 00
fax: 018-17 92 10
e-post: sgu@sgu.se
www.sgu.se

FÖRORD

Sveriges geologiska undersökning, SGU, ska med sin expertkunskap och i sin myndighetsroll bidra till en hållbar samhällsutveckling.

I myndighetens vision om det hållbara samhället sker en god hushållning med naturresurser, energianvändningen är effektiv och sker till stor del med förnybar energi och tillgången på dricksvatten är säkrad. Vid SGU arbetar vi aktivt för att öka kunskapen om de geologiska förutsättningarnas betydelse för hållbarhetsfrågor hos såväl allmänhet som beslutsfattare.

Ökad användning av förnybara energikällor är en förutsättning för att kunna minska Sveriges klimatpåverkan och klara klimatmålen. Vi bidrar till detta bland annat genom att skapa förutsättningar för att utvinna geoenergi på ett långsiktigt hållbart sätt. Det betyder bland annat att uttaget av geoenergi sker på sådana platser och på ett sådant sätt att det inte riskerar att negativt påverka grundvattnet eller miljön.

Vi har i denna rapport, som är en uppdaterad version av en tidigare utgåva 2015, sammanställt kunskap som vi tror och hoppas ska vara till nytta för både myndigheter och geoenergi-branschen samt förhoppningsvis även för de många privatpersoner som har eller ska anlägga energibrunn.

Uppsala, 1 september 2016

Anna Hedenström

Enhetschef

INNEHÅLL

Förord	3
Sammanfattning	5
English summary	5
Inledning och bakgrund	5
OLIKA TYPER AV ANLÄGGNINGAR	8
Bergvärme	8
Borrhålslager	8
Ytjordvärme	9
Grundvattenvärme	10
Akviferlager	10
Sjövärme	11
Geotermi	12
Brunnstyper	13
Borrteknik	14
Exempel på SGUs information	14
Berggrunden	15
Berggrundens uppbyggnad och egenskaper	15
Bergarternas mineralogiska sammansättning	18
Fysikaliska parametrar	18
Mätning och analys av de termiska egenskaperna	23
Jordlagren	26
Jordlagrens termiska egenskaper	27
Jordlagrens mäktighet	27
Grundvattnet	29
Brunnsarkivet	31
Hydrogeologiska kartor	32
Vattenskyddsområden	32
Förorenad mark	33
Geologiska och fysiska faktorerers inverkan på geoenergisystem	34
Värmeledning	34
Termisk påverkan	35
Exempel på bearbetad SGU-information	40
Kartor för värmeledning – bergarter	40
Värmeledningskarta för Stockholm	40
Värmeledningskarta för Skåne	40
Utvärdering av värmeledningskartor	42
Jorddjupsmodell för Skåne	45
Datorgenererad jorddjupsmodell	45
Manuellt framtagen jorddjupsmodell	45
Utvärdering av jorddjupsmodeller	45
Bergarter och energiborrning i skånsk berggrund	49
Diskussion	51
Tack	53
Referenser	54

SAMMANFATTNING

Rapporten 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. I rapporten redovisas även förslag till olika utvecklingsprojekt som behövs för att öka kunskapen om bland annat 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 (till exempel grundvatten, termisk påverkan, föroreningar) i samband med geoenergi. Rapporten kan ses som en delredovisning av SGUs pågående arbeten med vissa av dessa frågor. Materialet 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.

SGU anser vidare att det finns ett behov av en samordnande, nationell funktion som ansvarar för tillstånds- och tillsynsfrågor och som kan förmedla råd och riktlinjer i samband med anläggning av geoenergi.

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. The report also proposes various research and development projects that are needed to increase knowledge about, for example, thermal effects and how the groundwater is affected.

The opportunities and problems concerning geothermal energy as highlighted in the report are derived from the increased number of inquiries 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 (for example 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.

SGU believes there is a need for a coordinated function that is authorized to convey advice and guidance on various issues related to shallow geothermal energy.

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). I urban miljö bidrar även staden i sig till en uppvärmning av de ytligare marklagren (Henning & Limberg 2012). Därunder stiger temperaturen i marken med ökande djup, huvudsakligen beroende av den geotermiska gradienten (t.ex. Signorelli 2004, Banks 2008). När energi utnyttjas från större djup än cirka 400 m, används begreppet geotermi i stället för geoenergi. I Sverige har geotermi störst förutsättningar i sedimentär berggrund där till exempel 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 – till exempel länder som ligger i områden med tunn jordskorpa eller där det finns vulkanism. I Sverige varierar tempera-

turen i marken ner till några tiotals meters djup normalt mellan cirka 3 °C och 10 °C. Därunder ökar temperaturen med 15–30 °C/km. Temperaturgradienten är något högre i sedimentära berggrundsområden i jämförelse med gradienten i urbergsområden. För att nå temperaturer lämpliga för elproduktion, högre än 120 °C, krävs i Sverige borrhningar till 6–7 km djup. Detta medför stora investeringskostnader och osäkerheter vid genomförandet, till exempel om vattnets rörlighet, mängd och kvalitet vid dessa djup. I Sverige används därför än så länge geotermi för uppvärmningsändamål endast i Lund i Skåne. Potential kan även finnas på andra platser där det finns djupt liggande sprick- eller porakviferer, till exempel 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 förutsättningar sammanfaller, till skillnad mot tillämpningen av geoenergin.

I Sverige är geoenergi idag ett etablerat begrepp, med det avses de tekniker som använder berggrunden, jordlagren eller sjöar för utvinning eller lagring av energi. Internationellt kan dock i vissa sammanhang begreppet geoenergi även innefatta fossila bränslen. Energimyndigheten angav 2007 att ytjord-, berg- och grundvattenvärme tillhör gruppen förnybara energislag. Förnybara energikällor förknippas, för det stora flertalet, med vatten-, vind-, sol- och bioenergi. Däremot får 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 geoenergi. Potentialen för denna resurs bedöms vara mycket stor, bland annat av branschorganisationen Geotec, som med stöd av ett antal experter tagit fram en övergripande rapport som beskriver 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. (Barth m.fl. 2012).

SGU bedömer att det finns ett behov av objektiv information och kunskap för bättre bedömning av förutsättningarna för en utbyggnad av geoenergin sett ur ett hållbarhetsperspektiv. Samhället har hittills, till stor del, sett geoenergin som en ersättning för uppvärmning med fossila bränslen eller el, men i ett längre perspektiv bör effekterna av en fortsatt expansion förtydligas. En kombination av geoenergi med grön el är till exempel ett framtida önskvärt scenario, som bland annat behandlas i Europaparlamentets och Rådets direktiv om användning av energi från förnybara energikällor (EG 2009/28).

Geoenergi och geotermi bidrar inte idag till elproduktionen i Sverige, eftersom systemen är så kallade lågtemperatursystem. Men även om det inte produceras någon el i geoenergianläggningar, ersätter geoenergin användningen av direktverkande el, uppvärmning med fossila bränslen och kyla och värme från företrädesvis fjärrvärme/fjärrkyla. På våra breddgrader utgör uppvärmning en stor del av energianvändningen, vilket gör geoenergi (lågtemperatursystem) till en mycket lämplig energiform. Dessutom har geoenergi fördelen att den inte är geografiskt eller geologiskt begränsad eftersom förutsättningar finns överallt i landet. Möjligheten till ett utnyttjande bestäms dock av ett antal faktorer som till stor del styrs av lokala geologiska förutsättningar, bebyggelse, infrastruktur, skyddade områden (vattenskydd, miljöskydd, naturvård), m.m.

Det finns idag ett stort antal geoenergisystem i Sverige. Det exakta antalet anläggningar är osäkert, men det uppskattas att det finns drygt en halv miljon anläggningar. För att uppnå EU:s klimatmål med halverade utsläpp av växthusgaser från 1990 års nivå till år 2050 krävs ett ökat användande av förnybara energislag. Här bedömer SGU att geoenergin kan utgöra en viktig del, men en fortsatt utbyggnad måste ske på ett hållbart sätt, framför allt rörande samspelet med andra samhällsintressen som till exempel undermarksbyggnationer och grundvattenanvändning.

En förutsättning för hållbar utbyggnad är att geoenergianläggningar dimensioneras på sådant

sätt så att den termiska funktionen upprätthålls. En viktig del är bland annat kunskap om de geologiska förutsättningarna, till exempel uppgifter om jordlagerföljd, jorddjup, grundvattenförhållanden och berggrundens uppbyggnad.

För att kunna besvara frågor om geoenergi har SGU påbörjat ett arbete med att ta fram och tillhandahålla geologisk information som anpassas till underlag för bedömning av geoenergianläggningar i Sverige. I detta arbete ingår bland annat att ta fram riktlinjer för borrhning (Normbrunn), en nationell jorddjupsmodell och information om berggrundens termiska egenskaper samt att tillgängliggöra SGUs information till användarna med hjälp av kartvisare och mobiltjänster.

Geoenergianläggningar har ibland kommit i konflikt med motstående intressen, som att man till exempel måste ta hänsyn till skyddet av viktiga grundvattentillgångar. Samtidigt som geoenergianläggningar genererar en miljövinst kan de i vissa fall medföra en påverkan på vattenkvalitet och integriteten mellan olika grundvattenmagasin. 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 termisk påverkan av berggrunden, till exempel hur djupt man bör borra för att få optimal effekt för ändamålet. Frågor om den termiska påverkan kan vara 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 påverkar möjligheterna att ta ut eller lagra energi i berggrunden.

För att kunna svara på många av frågorna krävs inte enbart kunskap om de geologiska förutsättningarna utan även kunskap om olika systemtekniska lösningar. SGUs arbete inom geoenergi fokuserar på att bygga upp kunskap och information för att kunna svara på frågor om berggrunden, jordlagren och grundvattnet som har betydelse för bedömning av förutsättningarna för geoenergi. Baserat på de geologiska förutsättningarna som föreligger är geoenergi-branschen med sin tekniska kunskap däremot mest lämpad att svara på frågor om design och systemlösningar.

Vid dimensionering av geoenergisystem för enskilda fastigheter används i regel standardiserade modellantaganden och vid större anläggningar oftast så kallade TRT-mätningar (*Termisk Respons Test*) för att bedöma borrhålets respons av temperaturförändringar (Gehlin 1998, 2002).

Den här rapporten ger en översikt av geologisk information som kan användas som stöd för en del av de frågeställningar som belysts ovan. Rapporten presenterar bland annat en pilotstudie av bergarternas termiska egenskaper i Skåne, där den komplexa geologiska uppbyggnaden och den stora tillgången på data gjort detta möjligt. 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 uppgradera 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 (Bonsor m.fl. 2015). 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 grundvattenförekomster samt borrhärlighet och rekommendationer av borrhål m.m. har blivit allt vanligare från

kommuner, myndigheter, entreprenörer och allmänhet. SGU bedömer därför att det finns ett behov av råd och riktlinjer samt av större kompetens hos myndigheter för bedömning av påverkan. Dessutom anser SGU att det finns ett behov av kunskapsutbyte och kommunikation mellan myndigheter, branschorganisationer, entreprenörer och användare för att öka förståelsen av de anläggnings- och systemtekniska, geologiska och miljömässiga aspekterna med geoenergi. Detta möjliggör att berörda myndigheter får den övergripande kunskap som krävs för att kunna svara objektivt på många av de frågeställningar som belyses i rapporten och gör att geoenergin kan utvecklas på ett hållbart sätt.

OLIKA TYPER AV ANLÄGGNINGAR

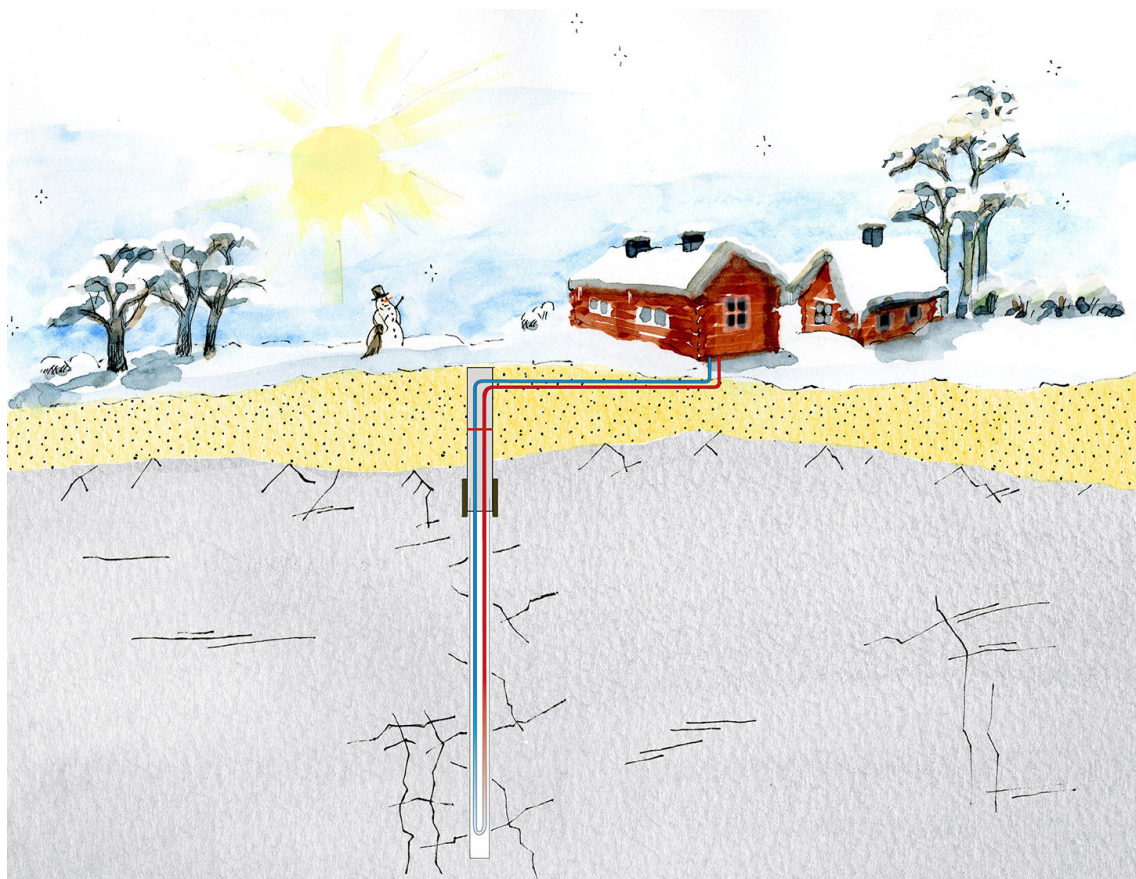
Bergvärme

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 och geografiska förutsättningarna, dock med en tendens till även större djup. Medianvärdet för brunnsdjupet är enligt SGUs brunnsarkiv cirka 175 m. I kollektorslangen cirkuleras en köldbärarvätska, oftast bioetanol och vatten. En del av energin i köldbärarvätskan extraheras via en värmepump så att den förhållandevis låga temperaturen från berggrunden höjs till en användbar temperatur i byggnaden. Systemet är passivt och slutet. Samma köldbärarvätska används hela tiden, vilket medför att underhållet är litet. Vanligen placeras borrhålen med ett avstånd på cirka 20 m från varandra, detta för att minimera risken för termisk påverkan mellan borrhålen. I en del fall när platsen inte räcker till kan närheten till andra borrhål kompenseras genom att borrhålen lutas från varandra eller fördjupas. Att systemet är passivt innebär att systemet enbart hämtar energi från marken.

Systemen kan användas för såväl passiv värme som kyla. När systemet används för uttag av värmeenergi kyls omgivningen kring borrhålet, vilket kan medge möjlighet till att även utnyttja bergvärmesystemet till passiv kyla till byggnaden. Ur anläggningens effektsynpunkt eftersträvas en balans mellan uttag och återladdning av värme. Eftersom anläggningarna normalt dimensioneras för att utnyttjas under knappt hälften av året, sker en återladdning under den andra halvan av året. Återladdningens storlek och effekt beror på den rådande temperaturgradienten i berget och av bergets värmeledningsförmåga. Återladdningen sker kontinuerligt från sidan samt underifrån. Under sommaren återladdas värmen i den övre delen av marken med hjälp av solen. Claesson & Eskilson (1987) uppskattar andelen solenergi i ett bergvärmesystem med en 110 m djup brunn efter fem års drift till 12 procent. Det bör dock noteras att modellberäkningar av Eskilson (1987) inte tar hänsyn till den geotermiska gradienten, utan använder fasta randvärden på temperaturen i stället.

Borrhålslager

I ett borrhålslager BTES (*Borehole Thermal Energy Storage*) är bergets värmelednings- och värmelagringsförmåga viktiga faktorer. Antalet borrhål kan uppgå 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 utnyttja kylan, varvid berget åter värms upp genom återladdning. Den aktiva återladdningen är en förutsättning för att ett borrhålslager ska kunna användas för

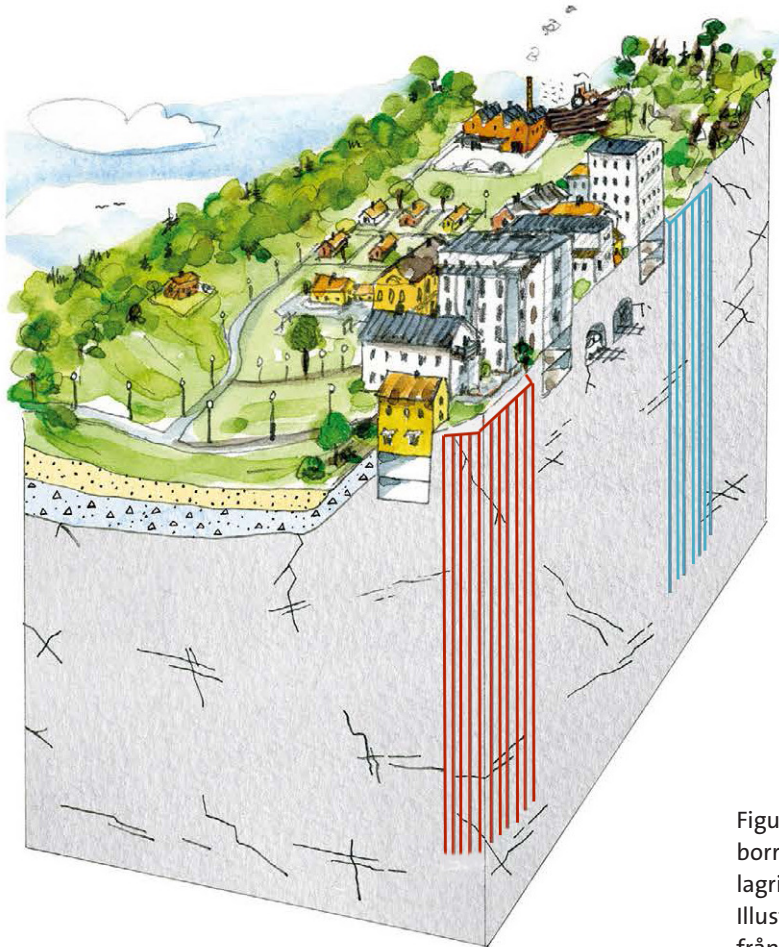


Figur 1. Exempel på bergvärmeanläggning för ett enskilt hushåll. Illustration: Anna Jonson, ArtAnna.

uttag av tillräckligt mycket värme under den efterföljande vinterperioden. Systemet blir (upp till en viss gräns) effektivare ju större det är. Borrhålslager kräver normalt inga större ytor och kan placeras under till exempel parkeringsplatser eller grönområden. Dimensionering av systemet med antal hål, djup och inbördes avstånd beror, förutom själva energibehovets storlek, på de geologiska och geografiska förhållandena samt på berggrundens termiska egenskaper. Systemet kan också användas för lagring av enbart värme eller enbart kyla, exempelvis spillvärme, fjärrvärme eller solvärme, respektive kyla från vinterluft eller kallt ytvatten.

Ytjordvärme

Ytjordvärme används i stället för bergvärme i områden med stora jorddjup eller när en större markyta kan utnyttjas. Kollektorslangarna grävs ned på ett djup av cirka 1 m (fig. 3). I vissa fall kan även slangarna läggas i flera lager ned till cirka 5–10 m djup. Under driften av anläggningen kan marktemperaturen kring slangen sänkas under fryspunkten för vatten, där det frigörs ytterligare värmeenergi när vattnet övergår till is, så kallad isbildningsvärme som finns i vattnet. Isbildningen kan dock samtidigt innebära en försämring av värmepumpens verkningsgrad då temperaturen är låg. Det ska beaktas att växtlighet ovanför kollektorslangarna kan påverkas genom att temperaturen i marken sänks. Vid användningen av ytjordvärme, 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.



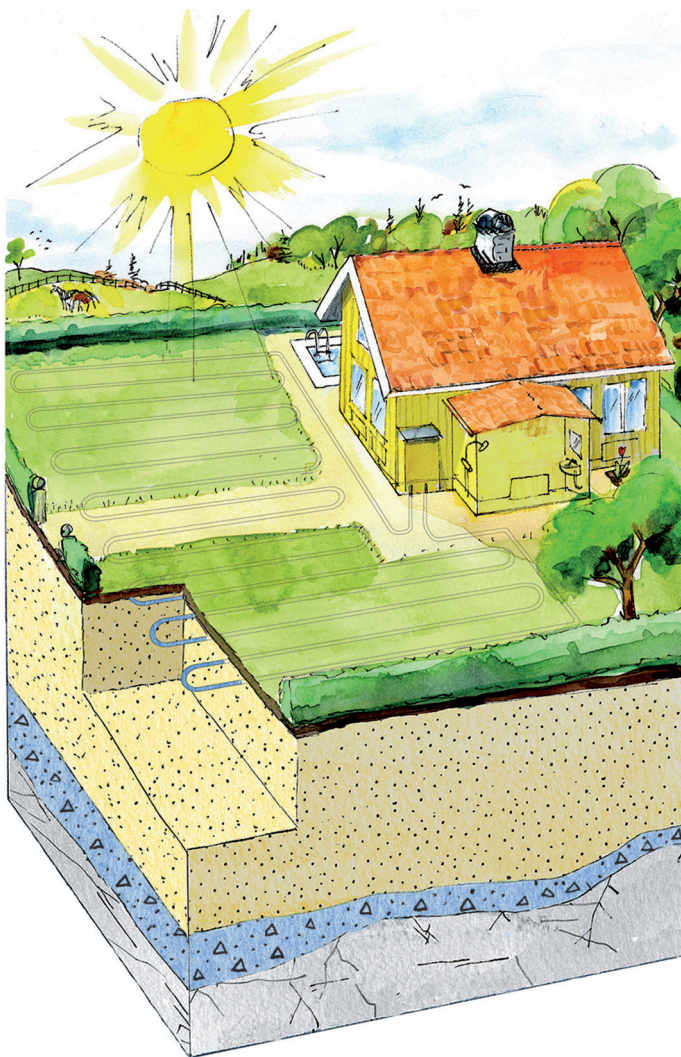
Figur 2. Schematisk skiss av ett borrhålslager (BTES) för säsongslagring av både värme och kyla. Illustration: modifierad efter underlag från Anna Jonson, ArtAnna.

Grundvattenvärme

Med grundvattenvärme menas att grundvattnet används direkt som energibärare i stället för köldbäraren i kollektorslangen som i fallen med berg- eller yttjordvärmeanläggningar. 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, kyla av och återförs sedan till samma grundvattenmagasin.

Akviferlager

I akviferlagersystem ATEs (*Aquifer Thermal Energy Storage*) används cirkulerande grundvatten som energibärare och energilagringen sker i jord, berg och grundvatten (fig. 4). Systemet använder en eller flera kalla respektive varma brunnar som inte står i direkt hydraulisk kontakt med varandra. Sommartid pumpas grundvattnet upp från den kalla sidan, och efter värmewäxling återförs det nu varmare vattnet till den varma sidan. Vintertid går flödet i motsatt riktning. Från den varma sidan pumpas varmt grundvatten upp, värmewäxlas mot byggnaden eller processen och det nu kallare grundvattnet återförs till den kalla sidan. På så vis skapas i samma grund-



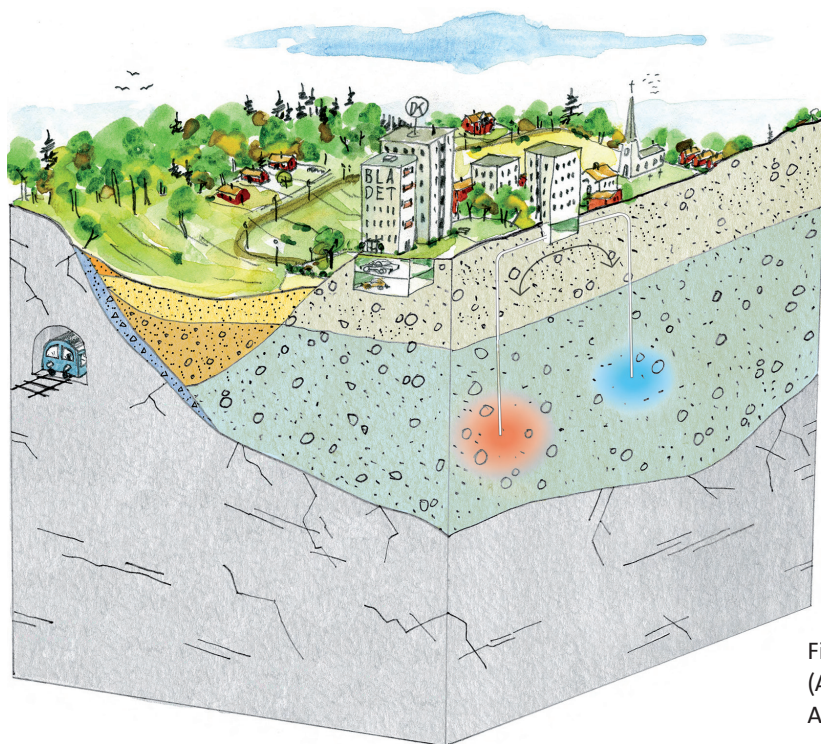
Figur 3. Exempel på jordvärme-anläggning för ett enskilt hushåll.
Illustration: Anna Jonson, ArtAnna.

vattenmagasin en varm volym kring de varma brunnarna och en kall volym kring de kalla brunnarna. Grundvattnet förs alltså fram och tillbaka inom samma grundvattenmagasin, förutsatt att det inte förekommer någon större regional grundvattenströmning som kan påverka flödet ytterligare.

Sjövärme

Sjövärme bygger på principen att en kollektorslang placeras på sjö-, havs- eller åbotten eller nere i bottenlammet, 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 bottenlammet, 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 relativt liten omfattning i Sverige och den information som SGU kan bidra med för dessa är mycket begränsad.



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

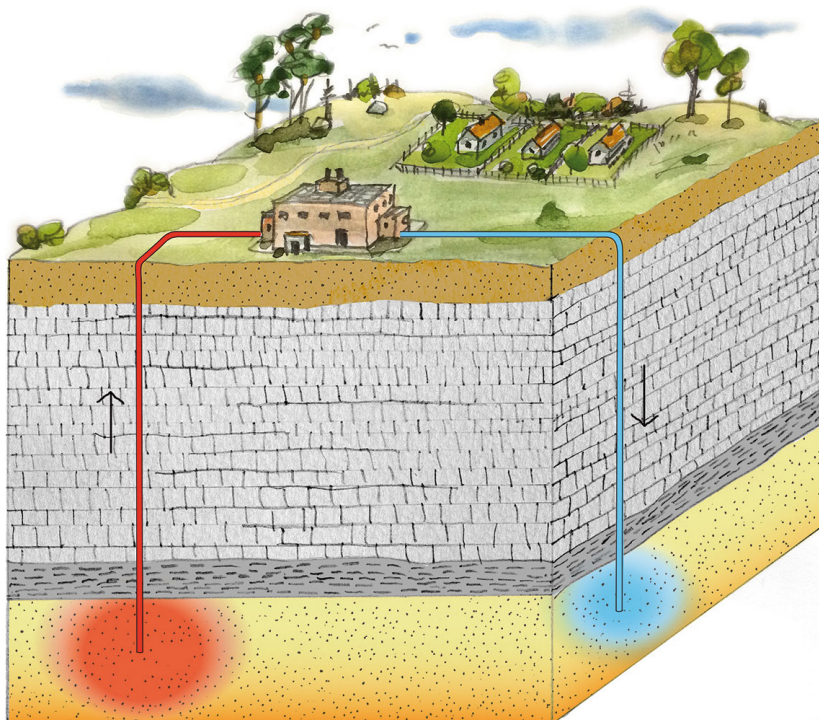
Geotermi

Värme produceras och transporteras 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 cirka 40–70 °C. I andra länder med tunnare jordskorpa, eller i områden med vulkanisk aktivitet, kan temperaturen vara avsevärt högre. I vissa områden, till exempel 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 6–7 km för att temperaturen i berggrunden ska vara tillräckligt hög för detta.

Geotermisk energi passar utmärkt till framför allt storskaliga system knutna till fjärrvärme-system. 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 till exempel porösa och genomsläppliga sandstenslager. Inom områden med kristallin berggrund krävs antingen naturligt uppsprucken, vattenförande berggrund eller att man lyckas spräcka berggrunden hydrauliskt.

Geotermisk energi utvinns genom att pumpa upp grundvatten från djupa borrhål. Värmen frigörs 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 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 Sverige har geotermi hittills utnyttjats i Lunds kommun som haft ett system i gång sedan mitten av 1980-talet, och idag försörjs fjärrvärmenätet till en fjärdedel med geotermisk energi.



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

Här utnyttjas cirka 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 minskade koldioxidutsläpp med cirka 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. 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 två huvudtyper av brunnskonstruktioner som används för geoenergi i Sverige: bergborrade brunnar och filterbrunnar. Valet av brunnskonstruktion bestäms av de geologiska förutsättningarna samt av kvantitets- och kvalitetskraven. För geoenergi används bergborrade brunnar för slutna bergvärmesystem. I de fall man väljer att använda grundvatten (öppna system) i jordlager är filterbrunnar den vanligaste typen. I områden med sedimentär berggrund med god vattenföring kan även öppna brunnar i berg och filterbrunnar användas till öppna system.

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 köldbärarvätskan i kollektorn. Grundvattennivåns läge spelar därför en betydligt större roll än brunns vattenkapacitet. Ett grundvattenflöde, antingen mellan olika nivåer i borrhålet eller i akviferer som borrhålet penetrerar, kan höja borrhålets energieffektivitet avsevärt. Vid borrning

genom flera vattenförande skikt med varierade vattenkvalitet ska stor hänsyn tas så att vatten med varierande kvalitet inte blandas med varandra via kortslutning i hålet. I sådana fall bör tätning av hela borrhålet göras i samband med kollektorsättning. Avgränsningen mellan sött och salt grundvatten går att göra tekniskt via installationer i brunnarna eller genom återfyllning.

Filterbrunnar anläggs i huvudsak i grova porösa jordlager som sand och grus. I vissa fall kan de även anläggas i uppsprucket ytberg (stödfilter) eller i löst lagrad sedimentär berggrund med god vattenföring. Brunnskonstruktionen har fått sitt namn av att intaget av vatten sker genom slitsade rostfria stålrör vilka benämns filterrör eller sil. Undantagsvis används även filterrör av plast. 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 och kyla, eller i större grundvattenvärmeanläggningar som anläggs i jordlager och vissa typer av dåligt konsoliderad sedimentär berggrund.

Borrteknik

När en bergborrad brunn anläggs används i de flesta fall en tryckluftsdriven sänkhammare med en kombination av rotation och slag. En bergborrad brunn borrar i två steg:

- Steg 1 innebär borrning genom jordlagren ner till fast berg. Normalt används någon form av rödrivningsteknik där foderrören drivs ner samtidigt med borrningen. Foderrören ska 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. Gjutningen görs för att tätta mellan foderröret och berget. Tätningen förhindrar att ytligt 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 ska vara 6 m, från markytan räknat.
- 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 borrhålskronan som avses. Borrhålet kan ha större eller mindre diameter i dåligt konsoliderad berggrund, företrädesvis i sedimentär berggrund eller lervittrade zoner i kristallint urberg.

EXEMPEL PÅ SGUS INFORMATION

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

Det geologiska informationsunderlaget som behövs är beroende av vilken typ av geoenergi-anläggning som planeras. För energiuttag från, eller energilagring i berggrunden är information om de bergarter som finns på platsen och deras termiska egenskaper viktig för en första dimensionering av en anläggning. För en grov kostnadsanalys av brunnssystem är uppgifter om berggrundens temperatur, värmeledningsförmåga samt jorddjupet de mest avgörande parametrarna, eftersom dessa styr borrhålsdjupet och antalet brunnar. Uppgifter om jorddjup finns bland annat i SGUs brunnarsarkiv, 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 jorddjupsförhållandena. I SGUs grundvattenkartor beskrivs främst större grundvattentillgångar i jordlagren, vilka kan användas till akviferlager. Berggrundens homogenitet, sprickighet och porositet är faktorer som kan ha 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. Analyser av olika slag, bland annat för att bestämma bergets ålder, deformationshistorik, kemisk och mineralogisk 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 avseende bergartstyp, bergartsfördelning, textur 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).

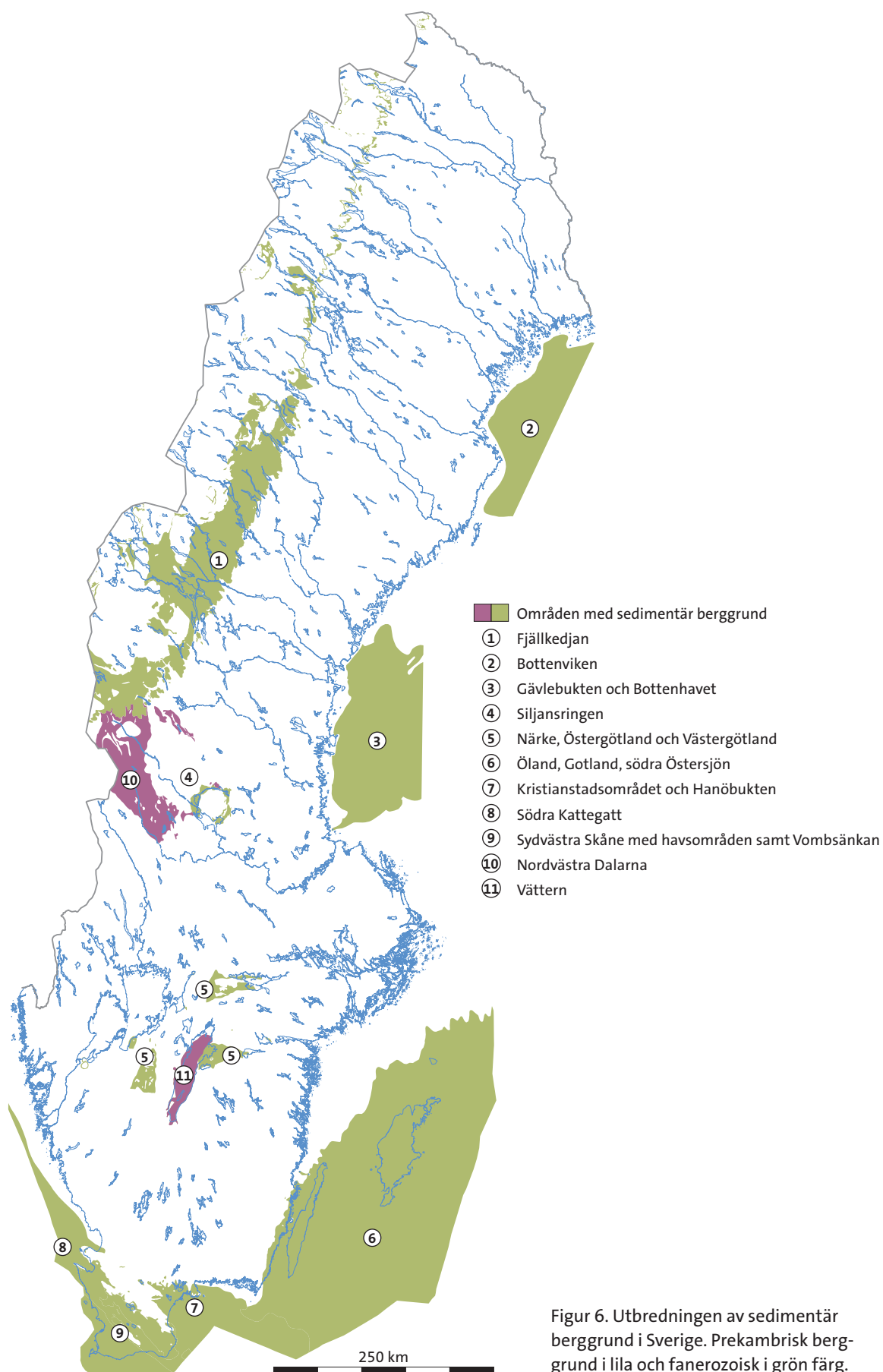
Mer detaljerad information om berggrunden finns i SGUs hälldatabas, som är en databas över alla platser där en geolog besökt en håll (bergblottnings) och dokumenterat bergarternas olika egenskaper. I många fall har även prover tagits för olika analytiska ändamål.

Berggrundens uppbyggnad och egenskaper

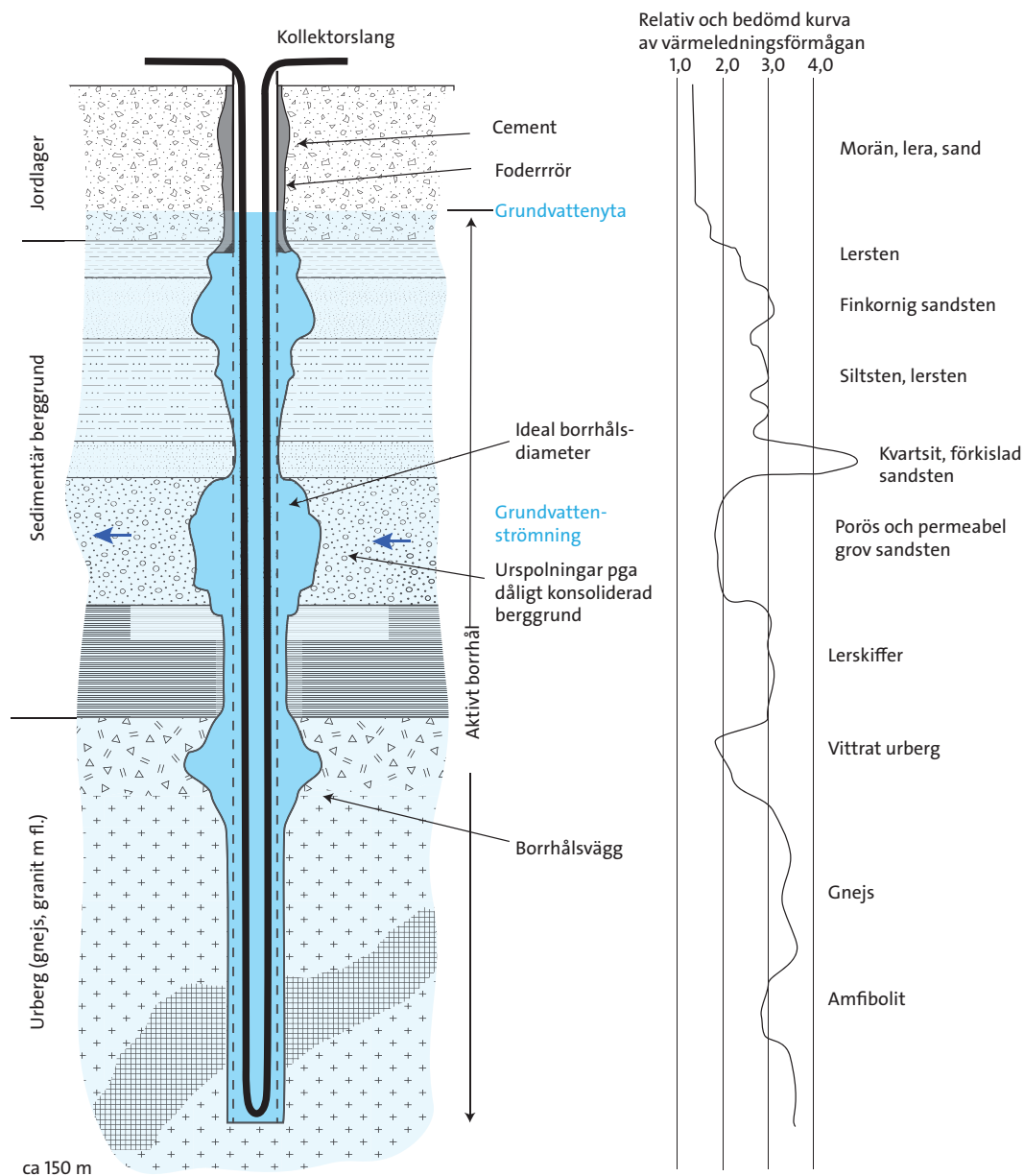
Bergarterna klassificeras i tre huvudtyper: magmatiska, sedimentära och metamorfa bergarter. Magmaiska bergarter har bildats genom stelning av smältor (magma). Om smältan når upp till jordytan bildas vulkaniska bergarter, till exempel basalt och ryolit. På jordytan kyla smältan relativt snabbt och bergarterna blir då finkorniga. Om smältan stelnar nere i jordskorpan bildas till exempel granit och gabbro. I detta fall kan kristalltillväxten ske under längre tid, eftersom av svalningen sker långsammare, och bergarten får en grövre kornighet. Sedimentära bergarter, till exempel kalksten, lerskiffer och sandsten, bildas genom att sediment, som avlagrats på jordytan eller i vatten, kompakteras och cementeras till en bergart. Metamorfa bergarter, till exempel gnejs, amfibolit och marmor, bildas genom omvandling av magmatiska eller sedimentära bergarter vid höga tryck och temperaturer, till exempel 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. Därför är det ur geoenergisympunkt viktigt att veta vilken typ av bergart som finns i ett område. Det kan också vara avgörande för vilken metod som ska användas vid till exempel energilagring, där valen mellan akvifer- eller borrhålsager kan finnas. Grundvattnets rörelse kan dessutom ha 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 kraftigt kan avvika från varandra. Till följd av dessa faktorer varierar de sedimentära bergarternas termiska egenskaper kraftigt (Andolfsson 2013). I vissa fall när lagerföljden är uppbyggd av bergarter med mycket varierande termiska egenskaper kan det medföra en oregelbunden termisk påverkan i brunnens närhet. I normalfallet har det ingen större betydelse för effektuttaget ur brunnen, men det kan ha viss betydelse för bedömning av påverkan på närliggande brunnar, då utbredningen av den termiska påverkan i enskilda berggrundsavsnitt kan bli förhållandevis stor i jämförelse med brunnen som helhet. Det finns idag modelleringsverktyg (programvara) som kan användas för en bedömning av dessa fall, förutsatt att det finns tillförlitliga uppgifter för de geologiska och systemrelaterade parametrarna.



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



Figur 7. Schematisk 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 ska ses som en modell över variationerna i värmeledningsförmåga.

Där den förekommer överlagrar den sedimentära berggrunden 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 termiska egenskaper och borrarbarhet.

Förutom lagring och vatteninnehåll skiljer sig den sedimentära berggrunden från den kristallina genom att den ofta uppvisar en mycket varierande hårdhet. Lokalt kan det vara svårt att borra, antingen på grund av extremt hård berggrund, till exempel kambrisk kvartsit, eller på grund av dåligt konsoliderade bergarter, som ofta påträffas i den yngre sedimentära berggrunden i Skåne. Ett borrhål i dåligt konsoliderad berggrund kan bli 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 vid borrhning. Ras och förekomst av leror gör att det kan bli svårt att nå tillräckligt djupt i sådana områden. Kaolinvittring kan vara betydande i till exempel 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 geoenergisystem.

Även om dessa problem inte är vanliga och det oftast går att lösa dessa borrhstekniskt ska man vara medveten om att det lokalt kan vara svårt att borra.

Bergarternas mineralogiska sammansättning

Bergarternas mineralfördelning tas fram genom så kallade modalanalyser. Analyserna utförs på 30 mikrometer tunna bergartspreparat (tunnslip) som undersöks med hjälp av punkträkningsutrustning och ett polarisationsmikroskop. Varje mineralkorn 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.

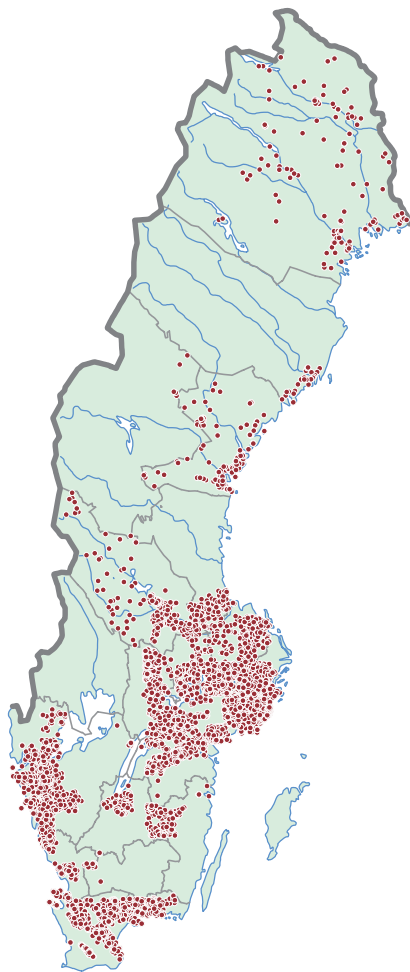
I nuläget finns cirka 6 500 analysresultat lagrade i en databas på SGU (se fig. 8). Dessa kommer i huvudsak från en databas som togs fram under 1980-talet, med syfte att visa olika bergarters värmeledande egenskaper (Sundberg m.fl. 1985). En stor mängd analysresultat samlades då in från äldre publicerade 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. En annan möjlighet är att bestämma bergartens mineralsammansättning med hjälp av röntgendiffraktionsanalys (XRD). I kombination med kemiska data 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.

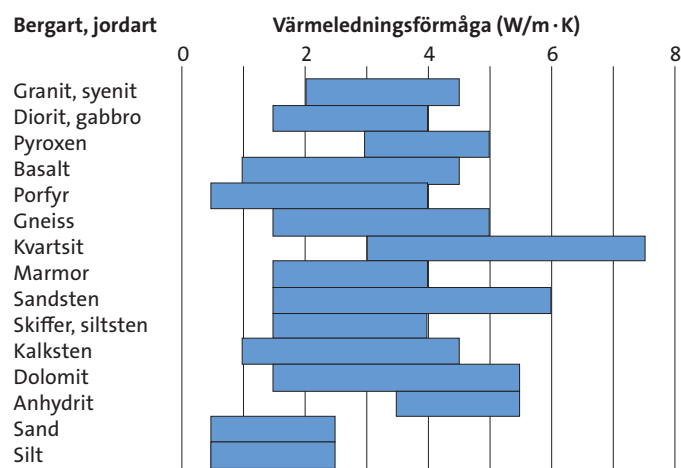
Fysikaliska parametrar

Det möjliga effektuttaget ur en bergborrad energibrunn är främst beroende av temperatur och värmeledningsförmågan i berggrunden. Värmeledningsförmågan styrs av såväl bergmaterialets sammansättning av olika mineral som av dess fysiska egenskaper, som till exempel 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 främst för bergvärmeanläggningar.

Värmeledningsförmågan (λ) mäts i watt per meter och kelvin ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) och karaktäriserar bergets egenskap som ledare av värmeenergi. Vissa bergarter ger ett bättre utbyte av värme beroende på att värmeledningsförmågan hos bergarterna varierar, till exempel mellan 1,7 och 3,4 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ 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



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



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, exempelvis kvartsit, uppvisar generellt de högsta värdena, med ett maximum av mer än 7 W/m·K. Som jämförelse: värmeledningsförmågan för vatten är cirka 0,55 W/m·K, för is cirka 2,2 W/m·K och för luft cirka 0,025 W/m·K.

mest betydelsefulla mineralet för värmeledningsförmågan i vanliga bergarter är kvarts. Värmeledningsförmågan är därför högst i kvartsrika bergarter som till exempel kvartsit eller sandsten. Värmeledningsförmågan för de kristallina bergarterna varierar inte lika mycket som för de sedimentära bergarterna. Lösa sediment, till exempel torr sand, har de lägsta λ -värdena. I vattenförande sedimentlager är λ beroende av vilka mineral som bygger upp kornen i sedimenten, samt av volymförhållandet mellan porvatten och korn. Det finns även ett empiriskt samband mellan bergartens värmeledningsförmåga och dess densitet där värmeledningsförmågan ökar med ökad densitet. Delvis motsatta förhållanden gäller för kristallina, granitoida, bergarter med varierande kvartsinnehåll. Avvikelse kan dock finnas för vissa basiska bergarter som innehåller "tung" mineral som pyroxen och olivin med relativt höga λ -värden (se tabell 1, se även Sundberg m.fl. 2009).

Värmediffusivitet är en egenskap som beskriver temperaturändringen i ett bergmaterial som funktion av tid, när värme tillförs som följd av temperaturgradienten. Värmediffusiviteten beräknas som kvoten mellan värmeledningsförmågan och värmekapaciteten och uttrycks i m^2/s .

Temperaturen i marken varierar periodiskt, dagligen samt under året. Detta beror på variationen

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

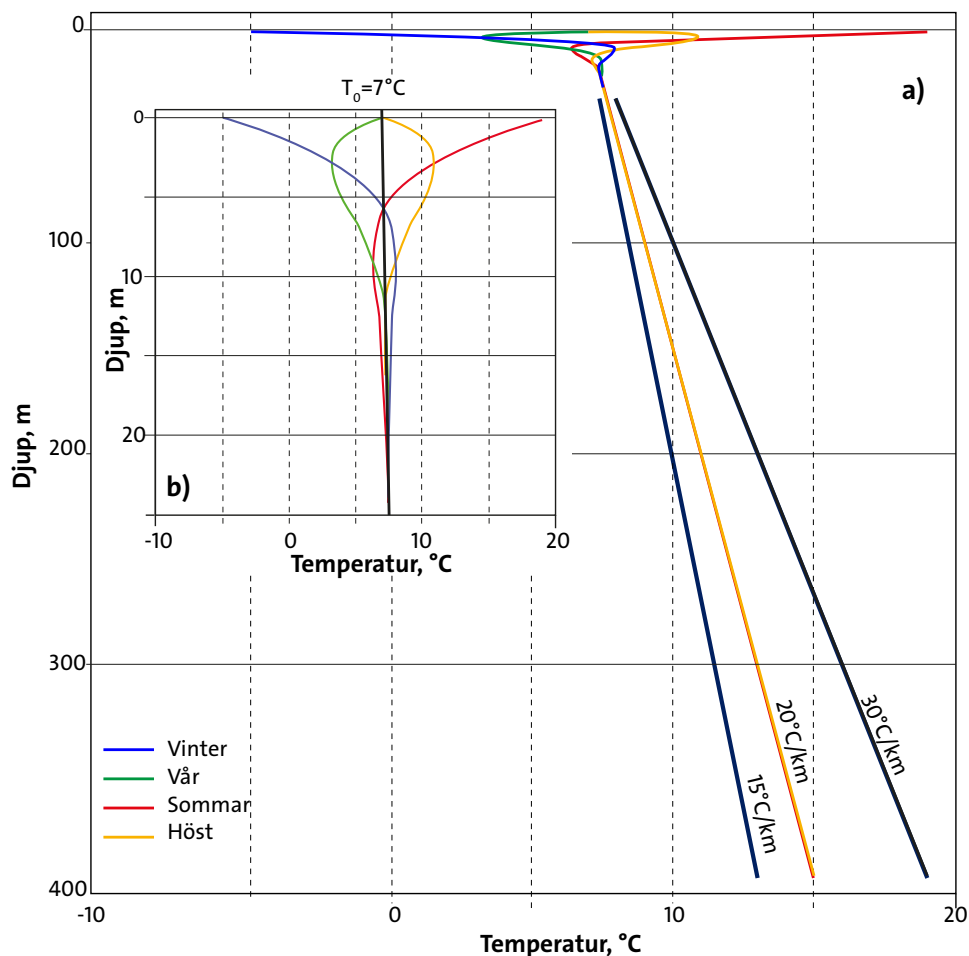
Mineral	λ -värde (W/m·K)	Referens	Mineral	λ -värde (W/m·K)	Referens
Albit	2,1	a)	Opaka mineral	3,0	b)
Allanit	3,0	b)	Ortoklas	2,3	a)
Amfibol	2,8	f)	Ortopyroxen	4,3	f)
Andalusit	7,6	a)	Plagioklas	2,3	f)
Anortit	2,1	c)	Prehnit	3,6	f)
Apatit	1,4	a)	Pumpellyit	3,0	b)
Biotit	2,0	a)	Pyrit	19,2	d)
Cordierit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

- 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

i mängden solenergi som träffar markytan, samt att denna värme återförs till atmosfären, om än med en viss tidsfördröjning. Temperaturen i marken är ett resultat av markens energibalans samt av dess termiska egenskaper. Under sommaren är värmeflödet som induceras genom solen större än under vintern då värmeflödet från jordens inre dominerar. Den årliga temperaturvariationen tränger vid ostörda förhållanden ner cirka 15–20 m i marken (fig. 10). Därunder tar den geotermiska gradienten över och bestämmer temperaturförhållandena på djupet. Vid större djup kan dock temperaturen i marken även påverkas av grundvattnets rörelser.

Den pågående klimatförändringen, där årsmedeltemperaturen i atmosfären stigit sedan drygt 100 år tillbaka, bidrar till att även berggrunden värms upp (Lachenbruch m.fl. 1982). Den ökande temperaturen till följd av denna effekt är för svenska förhållanden cirka 1 °C ned till 40 till 50 m djup. En liknande uppvärmningsprocess av marken har skett i Norden efter den senaste nedisningen för drygt 10 000 år sedan. Genom nedisningen har berggrunden varit avkyld ner till ungefär 2 000 m djup (Beltrami m.fl. 2014). Under den efterföljande varma perioden har berggrunden i Norden långsamt värmts upp igen, även med hjälp av solen. Det finns dock ingen anledning att därför helt definiera geoenergi som lagrad solenergi. Denna syn på att geoenergi helt utgörs av lagrad solenergi är felaktig (Rybach 2012), eftersom de termiska förhållandena vid jordens yta är i balans.

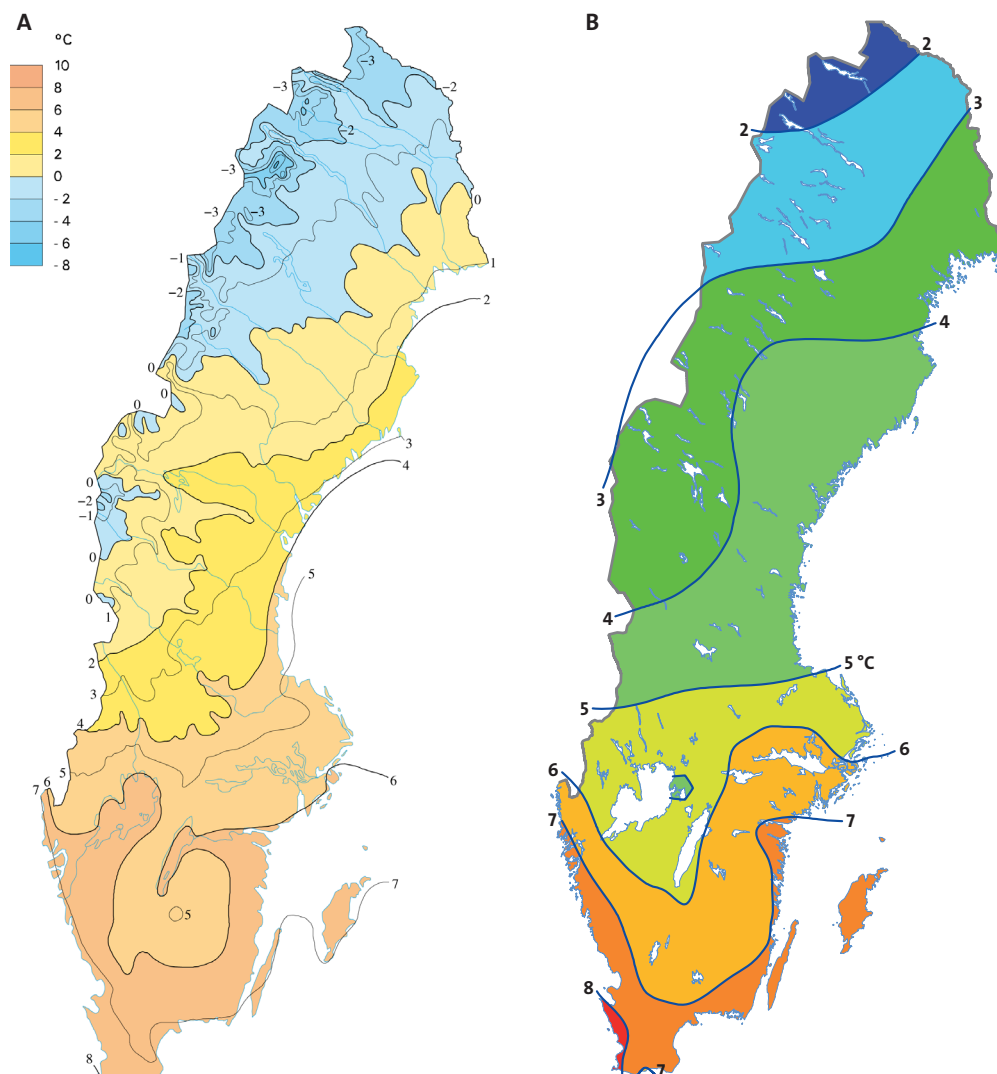
Temperaturen i berggrunden har en generell betydelse för värmeuttaget eftersom storleken av den möjliga temperatursänkningen i borrhålet är avgörande för anläggningens effektuttag. Berggrundens (grundvattnets) temperatur på tiotals meters djup kan i den södra delen av Sverige för-



Figur 10. Schematiska kurvor som visar den beräknade marktemperaturen mot djupet under ett år och vid ostörda förhållanden (inget värme tas ut eller tillförs aktivt). Vid ytan och ned till ca 15 m djup påverkas temperaturen, om än med en tidsfördröjning, av den årstidsberoende värmestrålningen från solen (inlägg b). Längre nedåt styrs temperaturförhållanden (i huvudsak) av den geotermiska gradienten med värden mellan 15 och 30 °C/km (a). Markytans medeltemperatur T_0 har antagits i det här fallet till 7 °C (jämförbart med till exempel förhållandena i Mälardalen), den årliga variationen av marktemperaturen till ± 12 °C; berggrundens värmeledningsförmåga är satt till 3,5 W/m·K och värmekapaciteten (volymetriskt) är 2,5 MJ/K·m³.

enklat antas vara lika med årets genomsnittliga utomhustemperatur (fig. 11). I södra Norrland och längre norrut är medeltemperaturen i berggrunden dock 1–4 grader högre än den i luften. Detta kan huvudsakligen relateras till att snötäcket effektivt isolerar marken under vintern. Marktemperaturen år 2015 är 9–10 °C i söder och < 3 °C i norr. På djupet tilltar temperaturen i Skåne med cirka 30 °C/km, medan den geotermiska gradienten i norra delarna av Sverige är 15–20 °C/km.

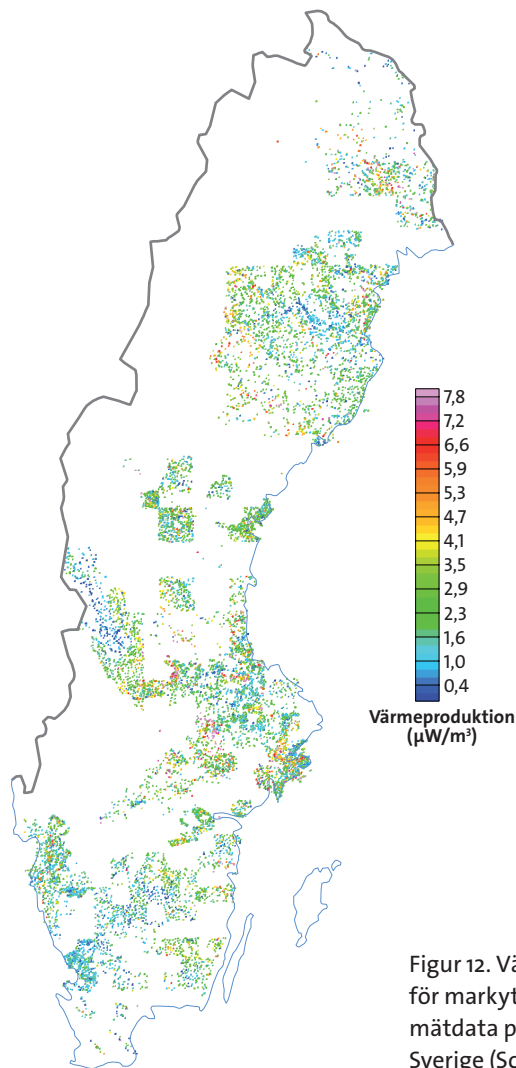
Det geotermiska *värmeflödet* är ett mått på den värmeenergi som alstras från jordens inre. De relativt ytliga delarna av marken och berggrunden, ned till den så kallade neutrala zonen på några tiotals meters djup (se fig. 10), påverkas även av strålningen från solen. Värmeflödet från solen kan under högsommaren uppgå till mer än 1 000 W/m². Ett ”stabilt” klimatsystem på jorden förutsätter dock att det råder balans mellan inkommande och utgående strålning (Kiehl & Trenberth 1997). I en balansberäkning kommer denna strålningsvärme inte jorden till godo – detta skulle ha förödande konsekvenser för vår planet som då skulle hettas upp. Strålningsvärmen kan dock tas till vara i värmesystem installerade på och i den övre marken. Ett värmeflöde uppstår alltid i riktning mot fallande temperatur. Värmeflödet från jordens inre dominerar vid ungefär



Figur 11. **A.** Årsmedelvärden i lufttemperatur för perioden 1961–1990 (källa: SMHI). **B.** Medianvärden på grundvattentemperaturen i Sverige för perioden 1975–1995 (datakälla SGU). Det ska noteras att årsmedeltemperaturen i luften sedan dess har stigit med cirka 1°C. Den temperaturökningen återfinns också i grundvattnets temperatur.

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 ”uppiifrån”, till exempel 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 cirka 50 mW/m². Dessa värden kan jämföras med ett medelvärde på 60 mW/m² i Centraleuropa.

Specifik värmekapacitet (värmekapacitet) definieras genom värmemängden (räknad i Joule, J) som behövs för att höja temperaturen i ett kilo (1 kg) bergmaterial med 1 Kelvin (K). Omvänt uttryckt är det ett mått för hur mycket värmeenergi som kan lagras i (eller extraheras 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 anges den med schablonvärden. Granit har en värmekapacitet på i medeltal 1 kJ/kg·K, medan vatten har en fyra



Figur 12. Värmeproduktion beräknad för markytan från radiometrisk mätdata på blottad berggrund (hällar) i Sverige (Schwarz m.fl. 2010).

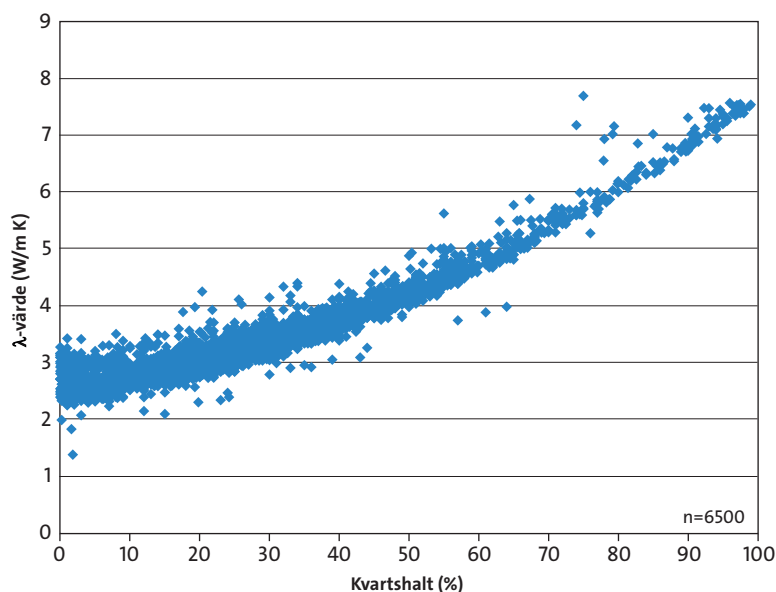
gångar högre kapacitet. Bortsett från vattens låga värmeledningsförmåga, understryker detta värde vattnets betydelse i samband med geoenergianläggningar.

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. Även om värmeproduktionen i berggrunden generellt är mycket låg med enbart några $\mu\text{W}/\text{m}^3$ leder den till relativt högre temperaturer om någon grad i berggrunden, vilket i sin tur ökar verkningsgraden i bergvärmeanläggningen. Vid uttag av kyla bör man beakta den relativt högre temperaturen i berggrunden. Halterna av de nämnda elementen mäts genom radiometrisk mätningar som utförs inom SGUs geofysiska kartläggning, antingen genom mark- eller flygmätningar. För delar av Sverige finns information om värmeproduktionen i berggrunden (fig. 12).

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 i borrhålet.

En bergarts värmeledningsförmåga (λ -värde, mätt i $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$) kan beräknas utifrån standard-



Figur 13. Förhållandet mellan kvartshalt och värmeledningstal (λ -värde) för olika bergarter från hela Sverige, där λ är framräknat som ett geometriskt medelvärde baserat på mineralfördelningen. Antal prover är 6500.

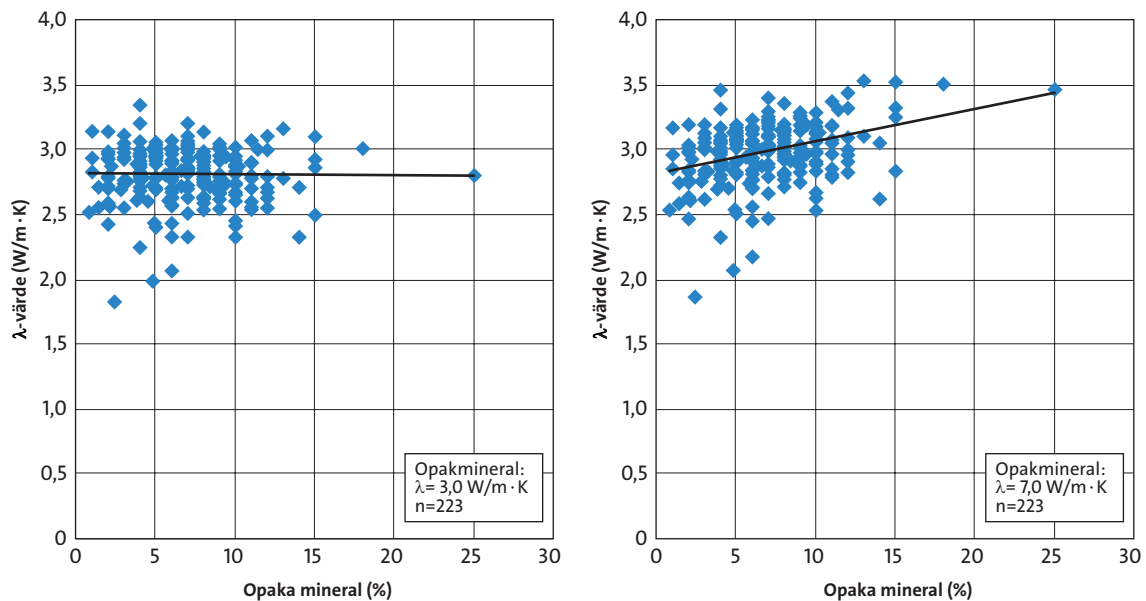
värden på de mineral som ingår i bergarten. Standardvärden för dessa mineral finns angivet i olika publikationer och standardverk (se tabell 1). I huvudsak är det halten av mineralet kvarts i bergarten som har störst inverkan på λ -värdet (fig. 13). Mineralet kvarts har ett relativt högt λ -värde på 7,7 W/m·K (Horai 1971), vilket generellt medför 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, till exempel opaka mineral (ogenomskinliga under mikroskopet), särskiljs inte i de volymberäkningar 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 till exempel 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, till exempel diabaser. Halten är vanligen endast några få procent vilket därför inte har något påtaglig inverkan på bergartens sammanvägda värmeledningsförmåga. I diagrammet i figur 14 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 procent, 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 olikheterna i bergarternas värmeledningsförmåga. Samtliga dessa metoder kräver olika förberedelsearbeten och prepareringar som kan vara ganska omfattande, innan proven kan analyseras.

På SGU används optisk skanning för att mäta bergarters värmeledningsförmåga samt värmediffusivitet. Metoden kallas för TCS (*Thermal Conductivity Scanning*, Popov m.fl. 1999). Jämfört



Figur 14. 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.

med de övriga, ovan nämnda metoderna är TCS enkel, snabb och tillräckligt exakt (mätfel anges med mindre än tre procent), samt mycket kostnadseffektiv. Ytterligare en fördel med TCS är att man även kan mäta på borrkärnor. 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 avsnittet *Kartor för värmeledning – bergarter*.

Geofysiska mätningar av gammastrålningen i borrhålen kan också användas för en bedömning och beräkning av värmeledningen i berggrunden, speciellt i djupa borrhål. Metoden är särskilt lämplig i sedimentär berggrund där det ofta är lagerföljder med enskilda lager som har avvikande värmeledande egenskaper. Genom en kombination av gammastrålningsdata och data från en densitetslogg, till exempel Sonic-log (en akustisk mätsond), kan värmeledningsförmågan beräknas. Ofta behöver resultaten kalibreras med enstaka TCS-analyser eller annan direkt mätning på borrkärnor (se t.ex. Hartmann m.fl. 2005). Metoden att använda loggdata baseras på att gammakurvan ger indirekt information om kvartshalten i berggrunden och att densitetsloggen ger tätheten.

Mätningar av värmeledningsförmågan i energiborrhål kan göras med så kallad TRT-mätning (termiskt responstest). Mätningen används i huvudsak som underlag till design och optimering av större anläggningar för värme och kyla i berg eller för kontroll av befintliga anläggningar (t.ex. Raymond m.fl. 2011, Svenskt Geoenergicentrum 2015). TRT-mätningen utförs under två till tre dagar under kontrollerade förhållanden. Borrhålet tillförs en känd mängd värmeenergi genom kollektorslangen och temperaturen av den cirkulerande vätskan mäts löpande i fasta tidsintervall vid kollektorslangens in- och utlopp (Gehlin 1998, 2002, Sanner m.fl. 2005). Resultaten används för att utvärdera borrhålets termiska respons och för att beräkna markens effektiva värmeledningsförmåga samt det termiska motståndet mellan energibäraren i kollektorn och borrhållsväggen. Även fiberoptiska mätmetoder som exempelvis distribuerad termiskt responstest (DTRT), som också kallas för *enhanced Thermal Response Test* (eTRT) används för noggrann

temperaturmätning i borrhål och för kartläggning av lokala variationer av berggrundens värmeledningsförmåga i vertikal led. DTRT-tekniken gör det möjligt att mäta de termiska egenskaperna i borrhålet med hög precision och ger även möjlighet till att observera grundvattenflöden (Acuña 2013).

Även om enskilda mätvärden på värmeledningsförmågan, mätt genom termisk scanning (TCS), avviker från en TRT-mätning i borrhålet, ger TCS-mätningarna värdefull information om enskilda bergarters termiska egenskaper. I områden med kristallin berggrund med relativt homogena förhållanden överensstämmer TCS- och TRT-resultaten relativt väl med varandra. I områden med lagrad sedimentär berggrund med mycket skiftande mineralogi och porositet är däremot TCS-värdena på enskilda bergarter oftast inte jämförbara med en TRT-mätning om man ser till hela borrhålet. Däremot kan information om de förekommande bergarternas värmeledningsförmåga och värmediffusivitet utgöra ett viktigt underlag för bedömning av den termiska påverkan i bergmassan runt borrhålet

Jordlagren

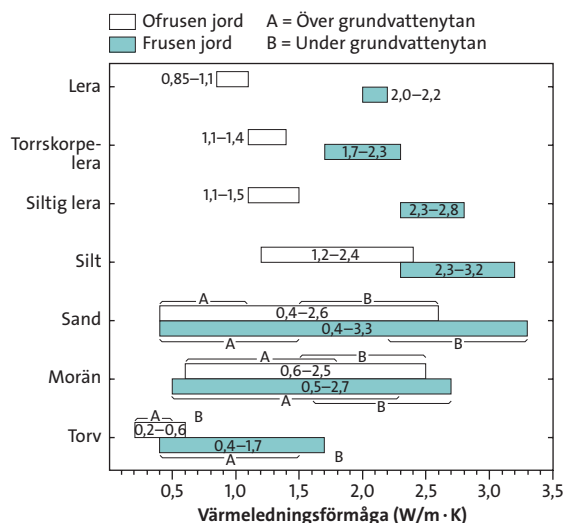
Jordlagren i Sverige bildades i stort sett helt under den senaste nedisningen. Inlandsisen började dra sig tillbaka från de södra delarna av landet för cirka 15 000 år sedan och för cirka 8 000 år sedan var i princip hela landet isfritt. I samband med att isen drog sig tillbaka täcktes stora delar av 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 dessutom ofta 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 består till största delen av sand och grus och utgör idag ofta betydande grundvattenmagasin.

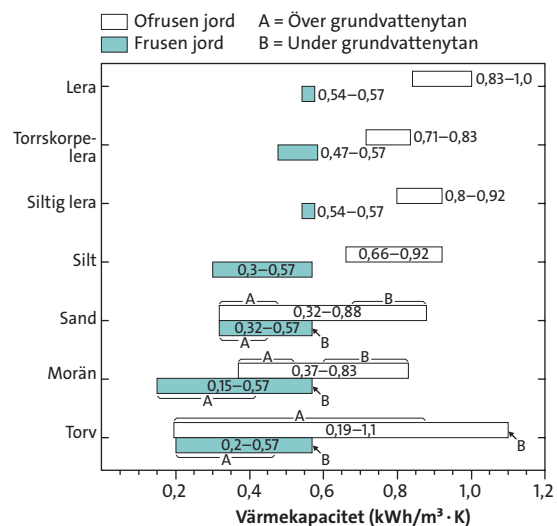
Efter istiden har den av isen nedtryckta jordskorpan höjt sig. Jordlagren har påverkats av vågornas svallning och erosion. Moränen vid och under den högsta kustlinjen är ofta helt eller delvis omlagrad av vågor och strömmar vilket resulterat i att bland annat morän i bränningszonen svallats. Sorterat 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 bottenarna. Dessa sediment består både av äldre glaciala sediment som transporterats ut av smältvatten från inlandsisen, och av yngre postglaciala sediment som avsattes långt efter det att inlandsisen lämnat området. Genom landhöjningen har dessa forna bottenar torrlagts och utgör i många områden flacka lerslätter. Dessa områden med finkorniga lerhaltiga jordarter har hög vattenhållande förmåga och utgör viktig jordbruksmark.

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. Fortfarande sker en omlagring och avsättning av jordarter. Längs vattendrag och kuster eroderar strömmande vatten och vågor jordarterna.



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



Figur 16. Värmekapacitet för olika jordarter i ofruset och fruset tillstånd. För genomsläppliga jordarter anges normalt variationsområde ovan (A) respektive under (B) grundvattenytan. Modifierad från Rosén m.fl. (2001).

Jordlagrens termiska egenskaper

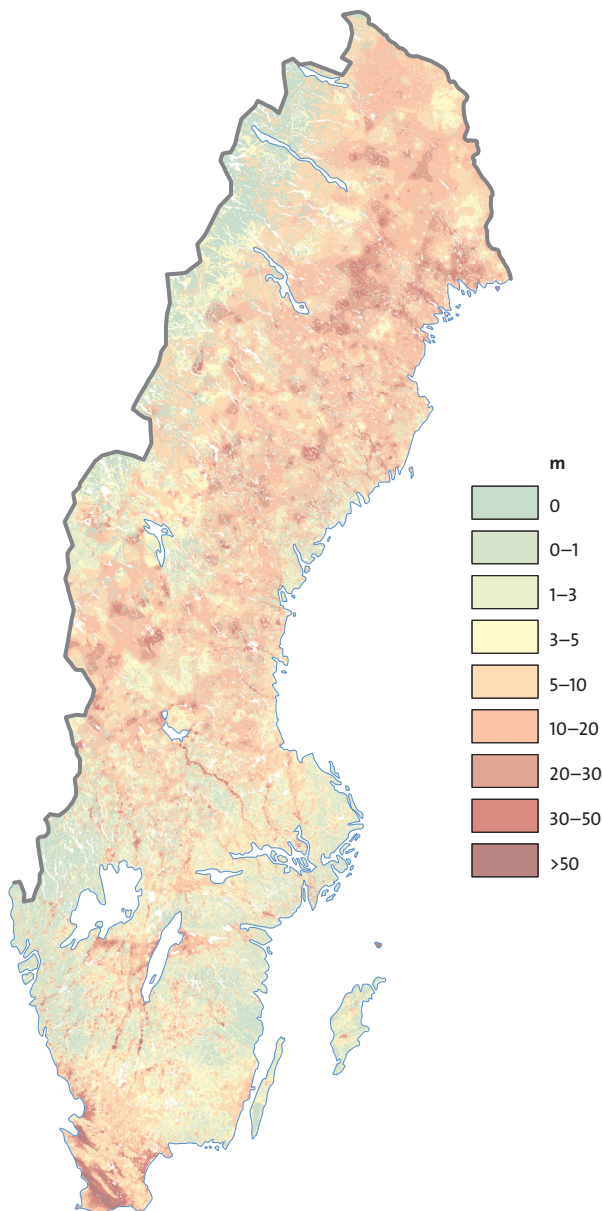
Värmeledningsförmågan i jordlagren påverkas i huvudsak av deras vattenhalt och porositet. En hög vattenhalt medför att kontakten mellan de enskilda mineral- och bergartskornen i jordarten förbättras eftersom vatten leder värme cirka 20 gånger bättre än luft. Tätare jordarter med en mindre andel total 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. 15), eftersom isens värmeledningsförmåga är fyra gånger högre än vattnets. Samtidigt minskas dock markens värmekapacitet genom att värme har frigjorts vid vattnets frysning (fig. 16). En frysning av siltjordar kring ytjordvärmslingan 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 än ovan grundvattenytan. Generellt sett binder finkorniga jordar (som silt och lera) vatten bättre än grövre jordar (som sand och grus) och har därför de bästa förutsättningarna för ytjordvärme. Jordar med ett högt innehåll av silt kan suga upp mycket vatten, även från djupet. Morän har normalt sett ett tillräckligt stort innehåll av silt och lera för att kunna ha en vattenhållande förmåga, men i de fall moränen är grovkornig kan dess vattenhållande förmåga vara jämförbar med sand. Sand 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 Högsta Kustlinjen (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. 17).

Jordlagrens mäktighet är främst av ekonomisk betydelse för geoenergin. Mäktiga jordlager kan även ha viss betydelse för dimensioneringen om skillnaden i värmeledningsförmågan mellan jord och berg är stor.



Figur 17. Nationell jorddjupskarta. Datorgenererad jorddjupsmodell enligt metodik beskriven i Daniels & Thunholm (2014).

Ytjordvärmeanläggningar (fig. 3) kräver dock att jordlagren har en viss mäktighet (cirka 1 m) för att man ska kunna använda energin i jordlagren. Det 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, då en betydande del av den totala borkostnaden ligger på jordbörning 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 till exempel Skåne finns områden med lös sedimentär berggrund som i många 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 brunnsdata i SGUs brunnsarkiv. I brunnsarkivet finns bland annat uppgifter om djup ner till berggrundsytan. Antalet brunnsuppgifter i arkivet varierar kraftigt från område till område. Från Skåne finns till exempel ett omfattande underlag med information från drygt 30 000 brunnar i nuläget.

Under senare år har SGU tagit fram en rikstäckande jorddjupsmodell (fig. 17), som till stora delar bygger på brunnsdata, men även på information i jorddatabasen om berg i dagen (hälltytor) och den hydrogeologiska parameterdatabasen. Den senare innehåller bland annat 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. 17).

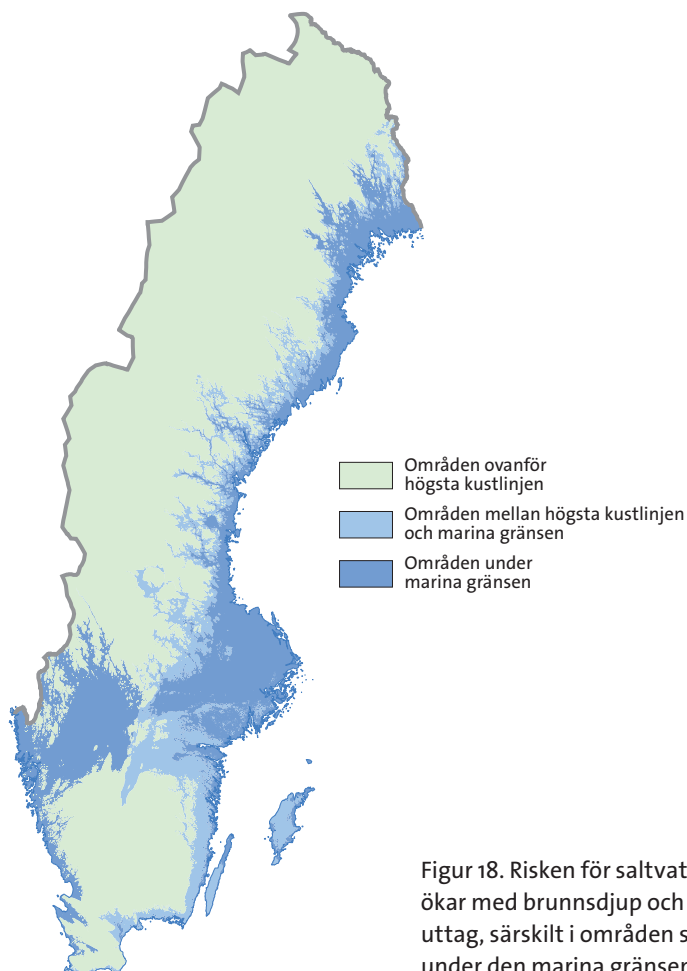
Längs västkusten syns tydligt ett sprickdalslandskap med lerfyllda dalgångar med stora jorddjup vilka till stor del omges av hållmark. Områden där man kan förvänta sig större jorddjup är dels i sprickdalgångar, som till exempel Göta älv, Klarälvsdalen och flera Norrlandsälvar, dels i områden med isälvsmaterial. Det största kända jorddjupet i Sverige är nästan 200 m och finns i 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 täckt av tunna jordlager, är generellt sett vanliga i Sverige. Tunna jordtäcken förekommer till exempel 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 i 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 jordlagrens 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.

I den prekambrisk kristallina berggrunden förekommer grundvattnet i huvudsak i sprickor. Tillgången på vatten beror på berggrundens sprickighet, eftersom vattenföringen sker utmed enskilda sprickor eller sprickzoner. I porösa bergarter, till exempel sandsten, kan vattentransport



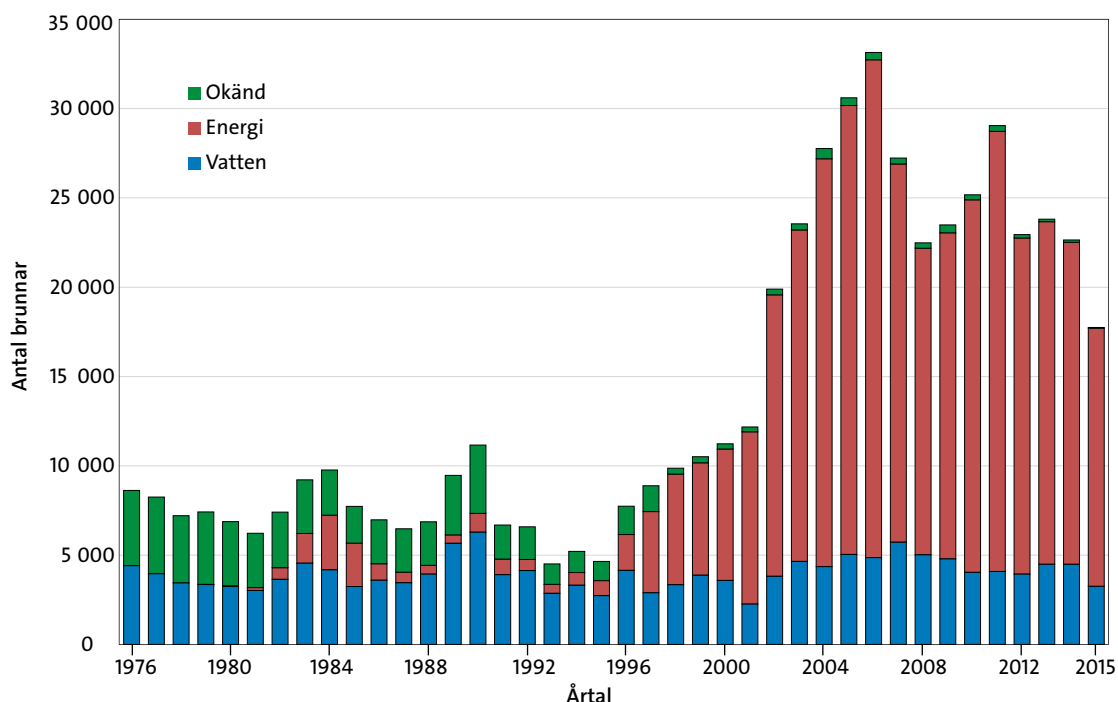
Figur 18. Risken för saltvattenpåverkan ökar med brunnsdjup och ökat vattenuttag, särskilt i områden som ligger under den marina gränsen.

även 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 mest vanligt i kustnära och lågt liggande områden, främst i borrhål som är djupare än 150 m (fig. 18).

För geoenergi som baseras på grundvattensystem, är i huvudsak 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 säsongvis går att flytta magasinerat vatten från den "varma" till den "kalla" sidan, och vice versa, utan att magasinet varken svämmar över eller blir torrlagt, samt att det inte förekommer någon hydraulisk kontakt mellan den varma och kalla sidan.

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



Figur 19. Totalt antal brunnar (inklusive inte lägesbestämda) i SGUs brunnarsarkiv (registrerade till och med 2015).

risk för salt grundvatten krävs därför att man vid borrning kontinuerligt mäter vattnets salthalt (eller indirekt som konduktivitet) för att registrera om borrningen når nivåer med salt grundvatten. Om så är fallet ska den delen av brunnen där salt grundvatten påträffats tätas eller pluggas för att minimera risken för påverkan i omkringliggande dricksvattenbrunnar.

Grundvattenvärmeanläggningar som påverkas av förhöjda kloridhalter kan få problem med korrosion på värmeväxlare och ledningssystem. I 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 brunnen används växelvis, är risken för igensättning mindre på grund av flödesväxlingen.

Brunnsarkivet

I SGUs brunnarsarkiv finns information från drygt 600 000 brunnar (februari 2016). 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 från 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. 19).

Informationen i SGUs brunnarsarkiv användas redan som ett viktigt bedömningsunderlag när nya brunnar ska borraras i ett område. Kunskap om jorddjup, bergartstyp och grundvattennivåer från brunnar i omgivningen ger värdefull information inför val av borrhålsdesign och utförande, och möjliggör en säkrare bedömning av borrdjup och borkostnad. 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 digitalt 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 bland annat kartor för ungefärlig vattenkapacitet i bergborrade brunnar ingår. De mer detaljerade kartorna (antingen på kommun- eller grundvattenmagasinsnivå) omfattar i huvudsak grundvattenmagasin i sand- och grusavlagringar. Till skillnad från länskartorna baseras de detaljerade kartorna, helt på SGUs egna undersökningar, för att man säkrare ska kunna bestämma grundvattenmagasinens utbredning och hur grundvattnet strömmar. Framför allt baseras dessa kartor på resultat från olika geofysiska mätningar (seismik, georadar och VLF (*Very Low Frequency*)), borrhålsundersökningar och inventering av grundvattenytor, samt på 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 bedömning av effekttuttag.

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 vidta åtgärder för att skydda vattnet. Även områden som idag inte används för vattenförsörjning, men som i framtiden kan komma att användas, 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 borring 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 kopplade till byggfasen, omfattar borring, schaktning och grävning.
- Den påverkan som anläggningen medför på de geologiska förhållanden samt vilka driftsrelaterade risker som finns.

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 borring och grävning. Problematiken finns vid alla typer av markarbeten och är inte borrhings-specifika. Hantering av borrhax, borrhslam och schaktmassor, samt 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 yttjordvärme 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, det vill säga brunnnsdesign.

Vid normal drift av geoenergianläggningar utgör läckage av vätskor från kollektorslangar den enskilt största riskfaktorn för kontaminering av mark och grundvatten. För akviferlayersystem med uttag och återinjektion av grundvatten är den största riskfaktorn lokala grundvattenkemiska förändringar samt förändrade temperatur- och strömningsförhållanden i akviferen.

SGUs uppfattning är att risken för att en geoenergianläggning ska påverka en vattentäkt är mycket starkt kopplad till de lokala geologiska och hydrogeologiska förhållandena samt 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 ett geoenergisystem 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 till exempel ställas krav på att bormaskin och kompressor ska stå på ett tätt underlag, att energibrunnen ska återfyllas med tätande material, att borrningen utförs i enlighet med SGUs vägledning Normbrunn och att brunnsborraren 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, till exempel geologiska och hydrogeologiska förhållanden, borrhjup, avstånd mellan brunnar, temperaturpåverkan, aktiva eller passiva system m.m.

I de remissvar som SGU gett avseende geoenergi kan man konstatera att SGU, när det har rört sig om anläggningar inom primär skyddszon, i samtliga fall utom ett rekommenderat att dispens inte ges till borrningen. I remissvar som rört borrningar inom den sekundära skyddszonen har SGU i huvudsak tillstyrkt anläggningen, dock ofta med krav på åtgärder som kan minska risken för en eventuell påverkan på vattentäkten, 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 borrningar 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 brunnen. Däremot är det viktigt att beakta att borrning av ett, eller framför allt av flera, hål i berggrunden kan innebära spridning av föroreningar som finns i det överliggande jordtäcket. I samband med eller efter utförd borrning kan föroreningar komma ner i sprickor som utgör hydrauliska kontaktvägar med vattenförande sprickor och

transporteras långa sträckor från sin ursprungsplats. En återfyllning av borrhålen med tätande material kan väsentligt förstärka skyddet mot att en eventuell förorening ges möjlighet att kontaminera grundvattnet.

När det finns en risk för föroreningsspridning är det viktigt att foderrören tätas ordentligt mot bergets övre del 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 grundvattnet. I den kommande, reviderade utgåvan av Normbrunn kommer rekommendationerna för borrning inom förorenade områden att förtydligas. I samband med undersökningsborrning 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 akviferlager 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 avskriva investeringarna och får en mer koldioxidneutral stadskärna med hjälp av energilagringen. För mer information se <http://rwsenvironment.eu/subjects/soil/projects/citychlor/>.

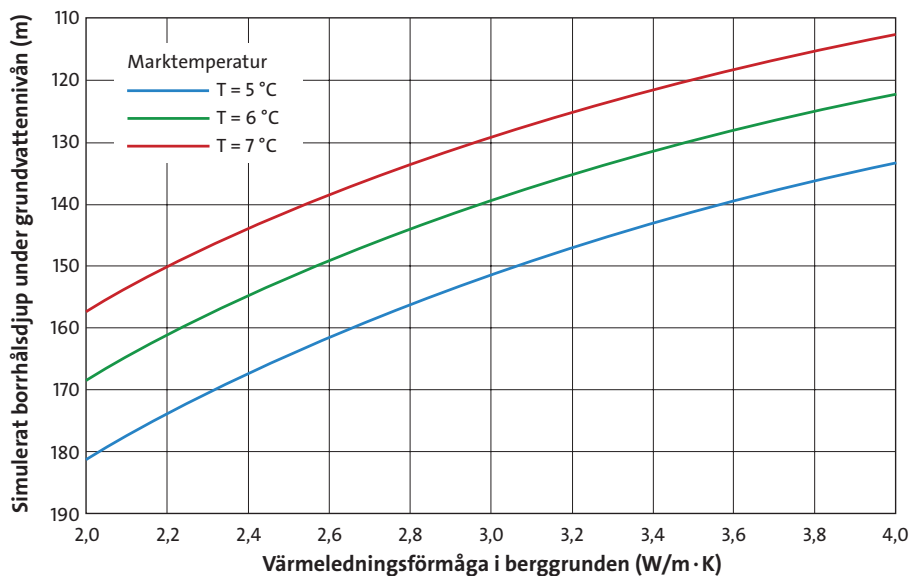
GEOLOGISKA OCH FYSISKA FAKTORERS INVERKAN PÅ GEOENERGISYSTEM

Värmeledning

Vid dimensionering av ett geoenergisystem används i regel en programvara där beräkningarna görs. På många ställen i Sverige sätts värdet på berggrundens och jordlagrens värmeledningsförmåga schablonmässigt. Schablonvärdena är relativt konservativt satta och ger för de flesta fall ett tillfredsställande underlag för dimensioneringen av enskilda anläggningar. Lokala geologiska och hydrogeologiska avvikelser kan dock påverka den enskilda fastighetens systemutformning. Därför är det viktigt att det finns information att tillgå, och att den som utför borrarbetet är medveten om hur de platsspecifika geologiska förhållandena påverkar systemutformningen.

God kunskap om berggrundens termiska egenskaper har stor betydelse på de platser där man planerar för större anläggningar med flera borrhål. Därför bör designen av större system föregås av undersökningsborrning med geologisk dokumentation, samt undersökning av de termiska egenskaperna, exempelvis med TRT eller DTRT. Dessa relativt omfattande undersökningar är inte ekonomiskt försvarbara för enskilda geoenergianläggningar. Enskilda anläggningar kan däremot indirekt få underlag för bedömning av vilket brunnsdjup som krävs från information om värmeledningsförmågan i förekommande bergarter, hur berggrunden är uppbyggd samt från övriga geologiska förutsättningar (exempelvis grundvatten, jordlager).

Vid dimensioneringen av en anläggning är berggrundens temperatur, värmeledningsförmåga och vattenföring avgörande faktorer. Berggrundens temperatur i Sverige kan förenklat tas från kartan som visar grundvattnets temperatur (fig. 11 B). I södra Sverige kan denna temperatur även antas vara lika med årets genomsnittliga utomhustemperatur (fig. 11A). Det ska beaktas att dessa två temperaturer skiljer sig åt från södra Norrland och norrut med 1 till 4 °C. Även möjliga lokala avvikelser bör beaktas, som till exempel en förhöjd temperatur på grund av en högre värmeproduktion i berggrunden (se fig. 12). För att kunna bedöma till exempel vattenföringen i berget och grundvattenytans läge kan information ur befintliga databaser, till exempel SGUs brunnarsarkiv, vara till stor hjälp, dock kan även ytterligare undersökningar behöva genomföras. Med rätt kunskap om områdets geologiska och termiska förutsättningar kan systemet optimeras. Borrhålsdjupet som krävs för att uppnå en bestämd energieffekt kan variera med upp till 40 procent (fig. 20).



Figur 20. 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). Energisimuleringen utförd med programmet *Earth Energy Designer* (EED). Grundförutsättningar: Säsongsvis verkningsgrad för värmepump = 3,3. Borrhålsdiameter = 140 mm.

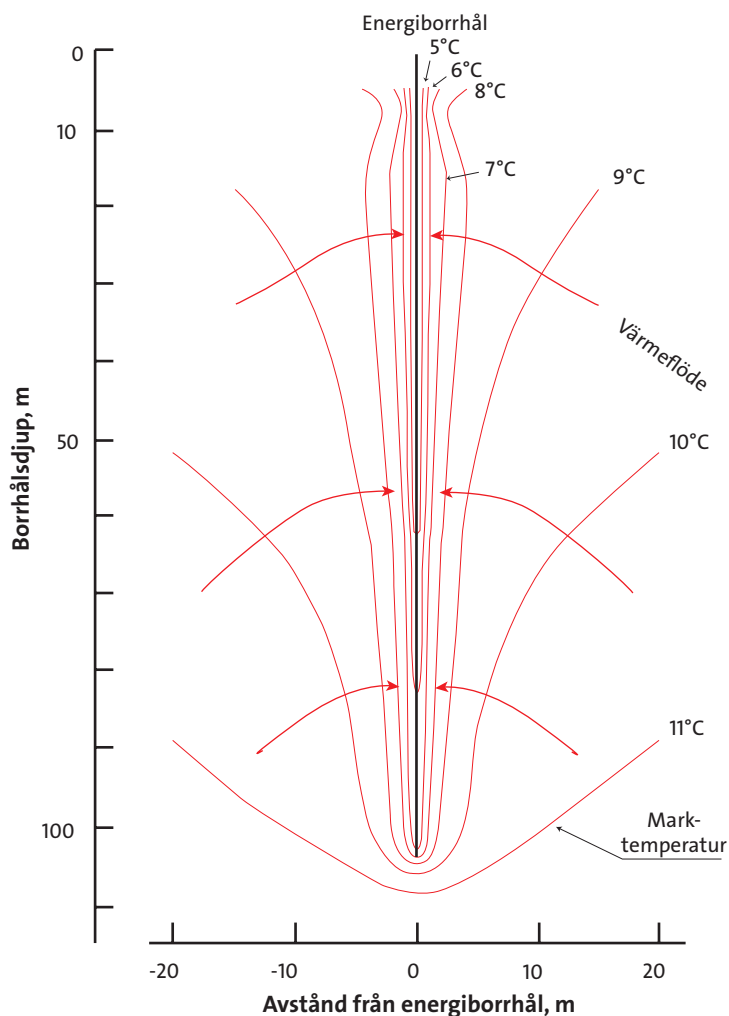
Termisk påverkan

En korrekt dimensionering av en geoenergianläggning är avgörande för att den ska fungera tekniskt och vara ekonomiskt lönsam. Anläggningen kan dessutom enbart drivas på ett hållbart sätt om den inte tar ut mer energi ur berggrunden än vad som den årligen återladdas med. Fysikaliskt har det dock ingen betydelse var den återförda energin kommer från, detta gäller såväl för passiva som aktiva bergvärmesystem. Energimässigt sett skulle ett balanserat system kunna vara i drift under tio- till hundraårens tid. I praktiken tillåts dock en mindre temperatursänkning på någon grad kring borrhålet under de första åren som anläggningen är i drift. På längre sikt faller temperaturen mycket långsammare och mer asymptotiskt. Temperaturfältet stabiliseras successivt och tillståndet kan i stor sett beskrivas som stationärt (t.ex. Rybach 2012).

Temperaturfältet kring ett energiborrhål med uttag av värme blir trattartat med en kraftig temperaturgradient. Figur 21 visar uppmätta temperaturförhållanden vintertid kring ett energiborrhål i Elgg/Schweiz. I det här fallet tas det årligen ut cirka 13 MWh värme, vilket anses vara i balans med återladdningen (Rybach & Eugster 2002). Den kraftiga temperaturgradienten tillåter ett mycket högt radiale värme flöde på cirka 3 W/m² kring hålet. Detta värme flöde är ungefär 50 gånger större än det normala terrestriska värme flödet. Liknande temperaturobserveringar har gjorts av Rybach & Sanner (1999) kring ett bergvärmehål i Taunus/Tyskland, där temperaturen registrerats på hundratala mätpunkter i berggrunden.

Den starkt växande efterfrågan på geoenergi har lett till att anläggningarna i vissa områden ofta ligger på relativt litet avstånd från varandra. Samtidigt har det skett en utveckling så att anläggningarnas effekt har ökat. I vissa fall kan anläggningar komma att påverka varandra termiskt om de ligger för nära varandra. Under vissa förhållanden kan även grundvattnets naturliga strömning påverkas.

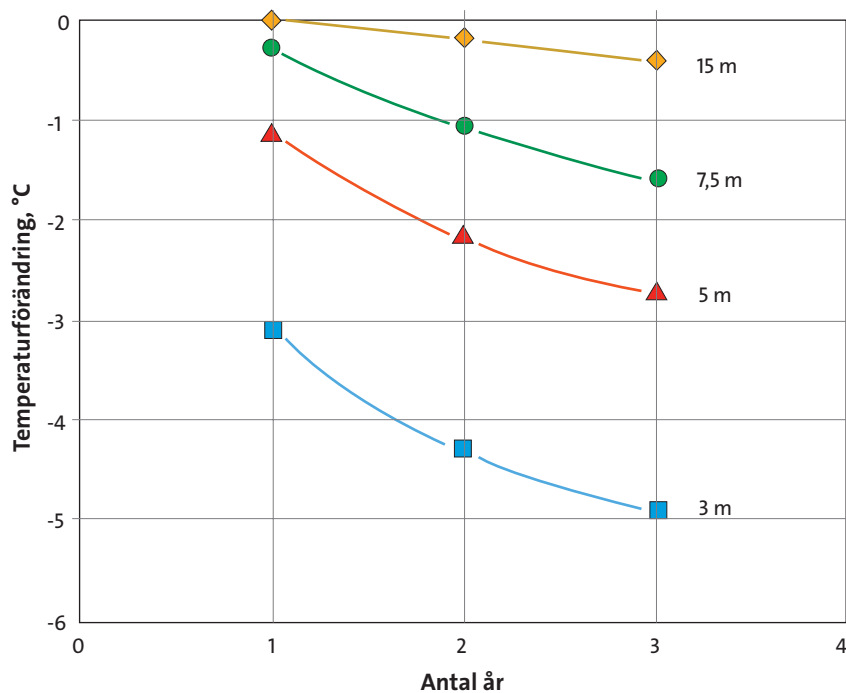
För enskilda energibrunnar rekommenderas i Sverige ett avstånd på minst 20 m. I större anläggningar där flera borrhål samverkar (BTES) och värme återförs aktivt under sommaren är



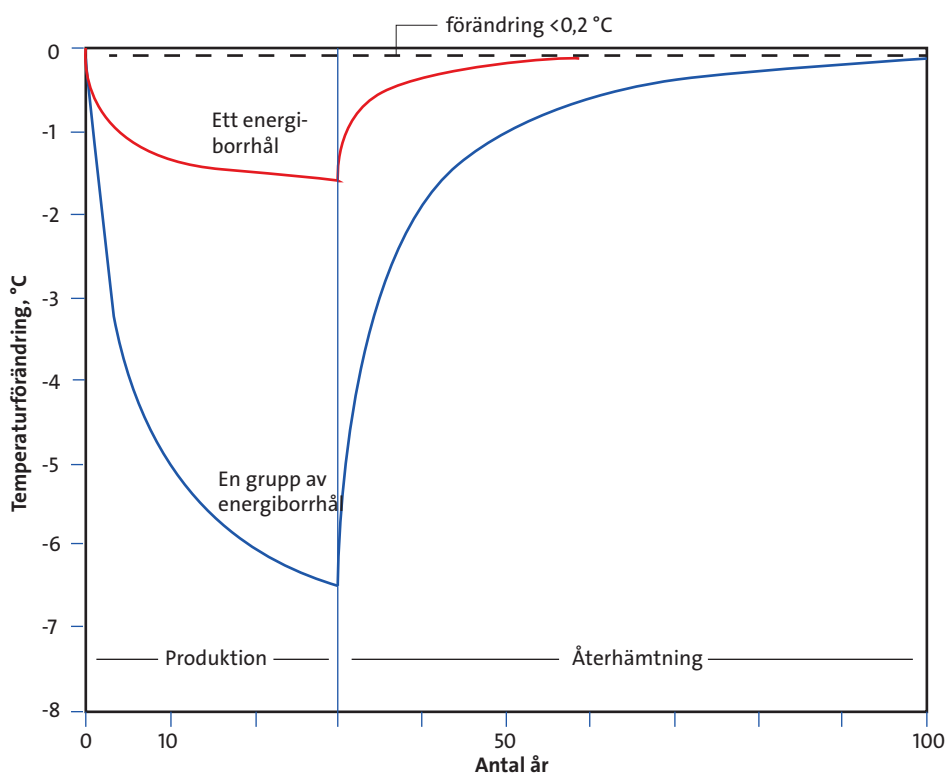
Figur 21. Temperaturfördelningen (isotermer) kring ett 105 m djupt borrhål i Elgg (Schweiz), beräknad för den kallaste perioden under 1997 och kalibrerad med mätdata. Värmesänkan i berggrunden har en cylindrisk form med ett radiale värmefflöde på cirka 3 W/m^2 . Modifierad efter Eugster (2001) och Rybach & Eugster (2002).

avståndet mellan hålen oftast 5–8 m. Signorelli (2004) har jämfört köldbärarvätskans temperatur vid kollektorslangens utlopp i ett enskilt borrhål med en grupp av sex hål över tre års tid (fig. 22). Hålen är 100 m djupa och återladdas inte aktivt. Bergets värmeledningsförmåga antas vara $2,46 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Vid ett avstånd på 15 m mellan gruppborrhålen är temperaturdifferensen i jämförelse med det enskilda hålet obefintlig. Ett mindre avstånd än praxis ($< 5 \text{ m}$) medför en signifikant temperaturdifferens på upp till 5°C . Detta kan även resultera i att marken fryser och permafrost uppstår, vilket kan leda till driftstörningar samt tjälskador i marken. Den lägre temperaturen vid kollektorslangens utlopp ger en mindre effekt i anläggningen jämfört med effekten från det enskilda borrhålet. Effektminskningen kan dock kompenseras genom att borra grupphålen djupare. Signorelli (2004) anger en fördjupning på 30 procent av gruppborrhål med 7,5 m avstånd.

Temperatursänkningen för en grupp om sex borrhål med 7,5 m borrhålsavstånd blir även långsiktig mycket större jämfört med förhållandena kring ett enkelt borrhål (fig. 23). Avkylningen är mycket kraftig i början av en 30-årsperiod, men avtar sedan mer asymptotiskt och temperaturen stabiliseras (Signorelli 2004). I modellen avslutas värmeuttaget efter 30 år. Därefter stiger temperaturen snabbt till följd av den kraftiga temperaturgradient som etablerats kring borrhålen, för



Figur 22. Jämförelse över tre år av temperaturen på köldbärarvätskan vid kollektor-slangens utlopp mellan ett enskilt bergvärmehål och en grupp om sex hål, där avstånden mellan hålen varierats från 3–15 m. Ingen artificiell återladdning sker. Modifierad efter Signorelli (2004).



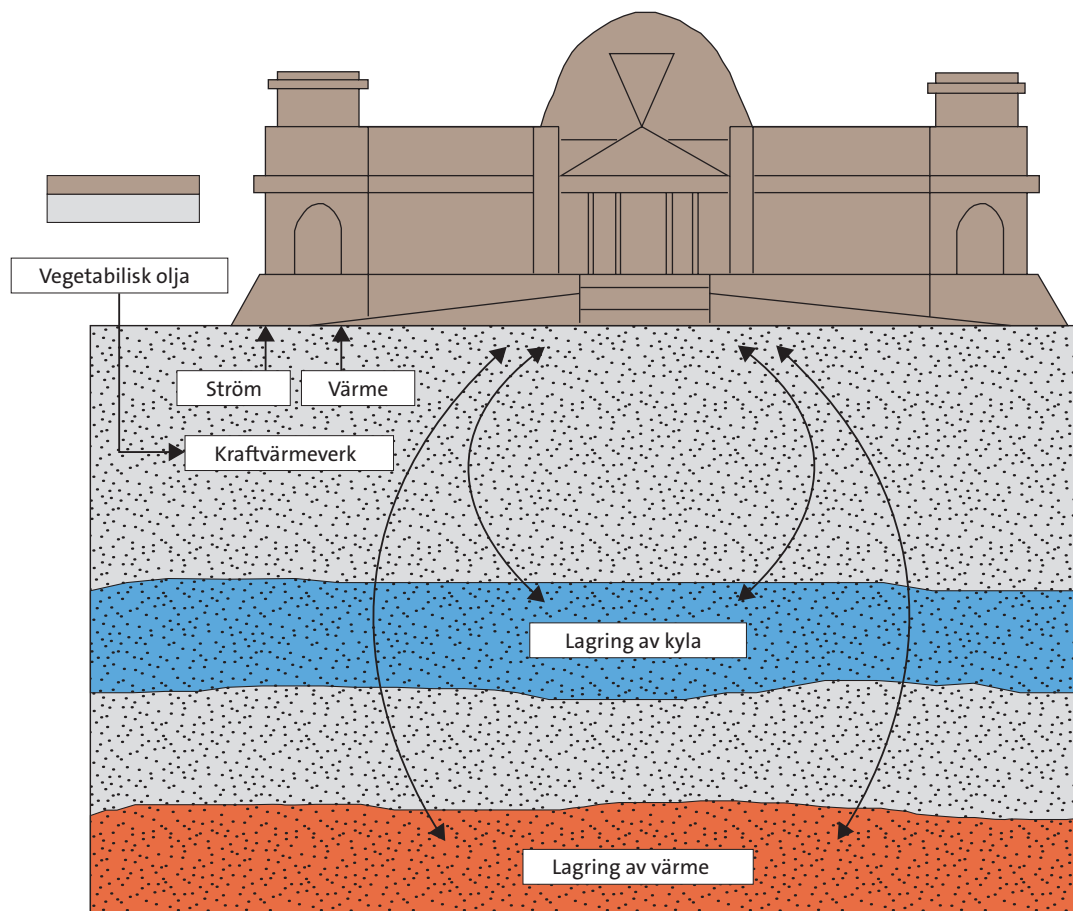
Figur 23. Temperaturändringen i marken på 50 m djup på 0,1 m avstånd från ett bergvärmehål sett över tiden, jämförelsen mellan ett enskilt – och ett centralt hål (i en grupp om sex hål, där avståndet mellan hålen är 7,5 m). Ingen värme återförs artificiellt. Energiuttaget är simulerat för en period på 30 år och återhämtningen till initialtemperaturen på 12,7°C på 70 år. Modifierad efter Signorelli (2004).

att sedan övergå i en asymptotisk återhämtning. Återhämtningen av temperaturen i berggrunden kring de sex borrhålen tar i det här fallet cirka 70 år, medan temperaturen kring det enskilda hålet har kommit upp till den initiala nivån redan efter drygt 24 år. Grovt uppskattat kan återhämtningsfasen för ett enskilt energihål sättas lika med tiden som hålet har varit i balanserat drift (Rybach & Eugster 2002).

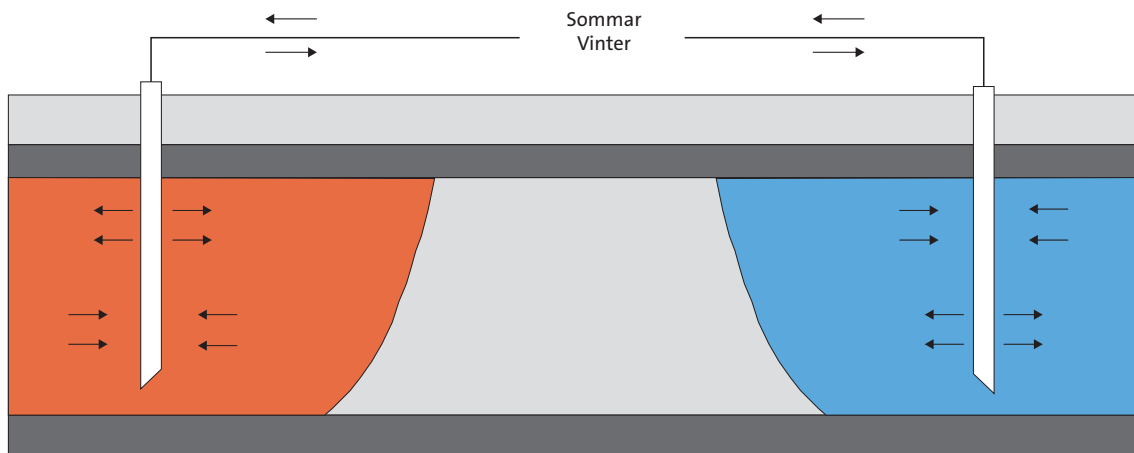
Akviferlager (ATES) har i regel färre brunnar och det är framför allt permeabiliteten och grundvattnets rörelse som avgör energieffektivitet i lagret och utbredningen av det område som påverkas termiskt. Akviferens geometri och utbredning spelar en avgörande roll. I vissa fall kan grundvattenmagasin på olika nivåer (fig. 24), eller sidor av en barriär (fig. 25), användas som kall respektive varm del i systemet. På så sätt kan risken för termisk kortslutning minimeras.

Hur den termiska växelverkan mellan rörligt grundvatten och energiborrhålet påverkar effektuttaget är fortfarande relativt dåligt undersökt. Det strömmande grundvattnet kan ge upphov till en effektiv (advektiv) värmetransport som ger en olikformad temperaturpåverkan i borrhålets omgivning (se fig. 26). Samtidigt höjs den termiska effekten i energibrunnen signifikant och borrhålets djup kan reduceras.

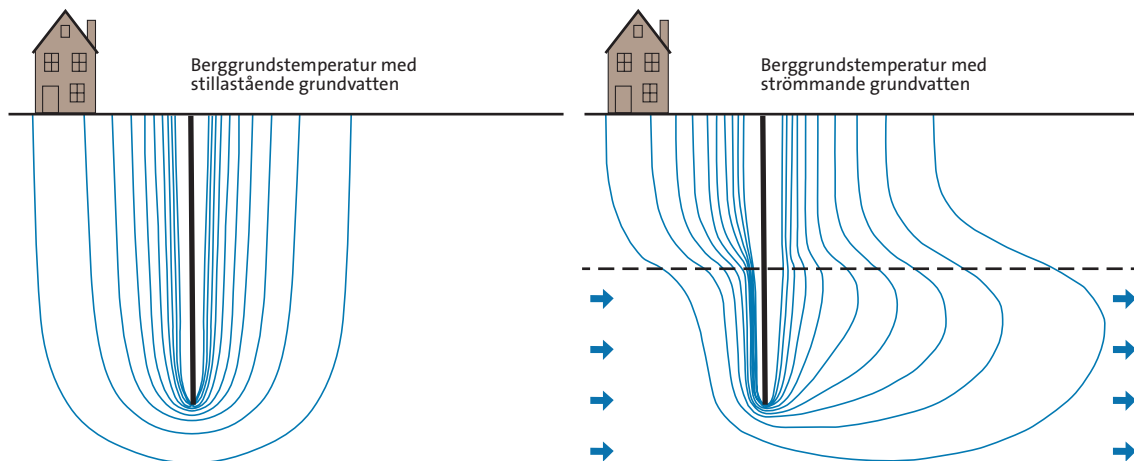
Strömmande grundvatten kan dock medföra termisk påverkan av intilliggande energibrunnar nedströms (fig. 27). I områden med strömmande grundvattenförhållanden kan effekten försämrast om borrhålen används för lagring av värme. Denna kan ledas bort av det strömmande vattnet.



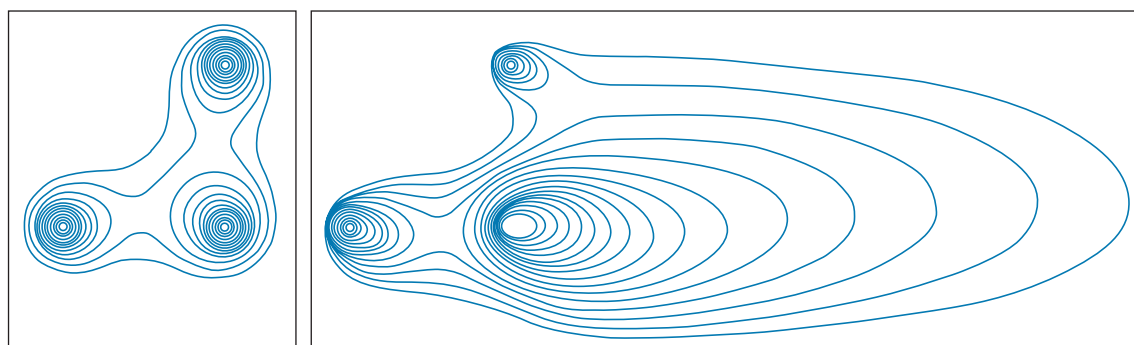
Figur 24. Illustration som visar ett typexempel med akviferlager i två magasin, kyla- och värmelager, med ett mellanliggande tätt ler- och siltlager under riksdagshuset i Berlin, Tyskland. Anläggningen är ansluten till ett mindre kraftvärmeverk som drivs med vegetabiliska oljor (efter BINE 2003).



Figur 25. Principskiss med ett akviferlager, där varm- och kallvatten (värme och kyla) tas ut ur respektive tillförs grundvattenmagasinet, under förutsättningen att själva grundvattenreservoaren är stationär (BINE 2003). Pilarna anger uttag och 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 bergrygg.



Figur 26. Schematiska tvärsnitt som visar temperaturpåverkan i omgivningen av en energibrunn med stillastående respektive strömmande grundvatten i berggrunden. Linjerna visar isotermer i marken. Flödesriktningen i höger tvärsnitt är markerad med pilar. I modellen har en flödes hastighet på 0,01 m/d använts (efter Bauer 2011).



Figur 27. Schematiska horisontalsnitt för tre energibrunnar i L-form. Isotermer 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).

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 jorddjupsmodell har det för två områden, Stockholm och Skåne, tagits fram exempel på kartor för värmeledning. För Skåne har även en jämförelse mellan den nationella jorddjupsmodellen och en manuellt framtagen modell gjorts. Beskrivningen av de termiska egenskaperna för Skånes bergarter baseras till största delen på ett mastersarbete vid Lunds universitet (se Andolfsson 2013). Förutom detta arbete har även en förstudie av borrhätheten 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 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 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 ytorna på den tematiska kartan. SGU utreder möjligheten att tillgängliggöra denna typ av produkt.

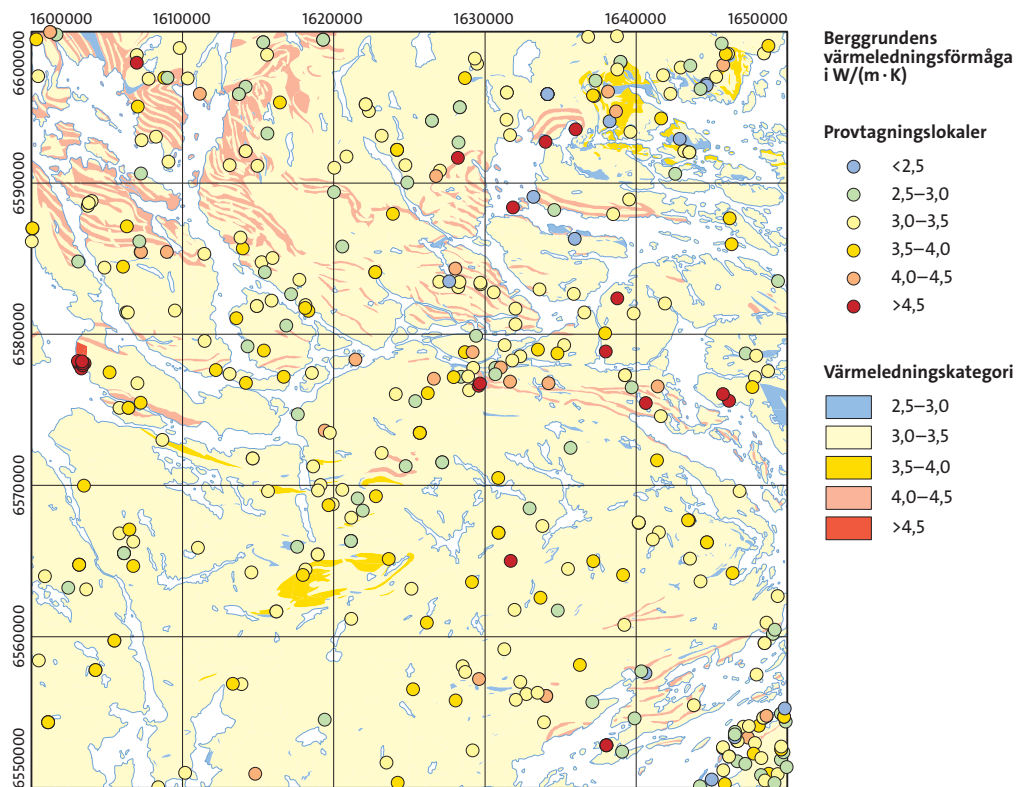
Värmeledningskarta för Stockholm

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 testkarta som visar värmeledningsförmågan i berggrunden (fig. 28). 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).

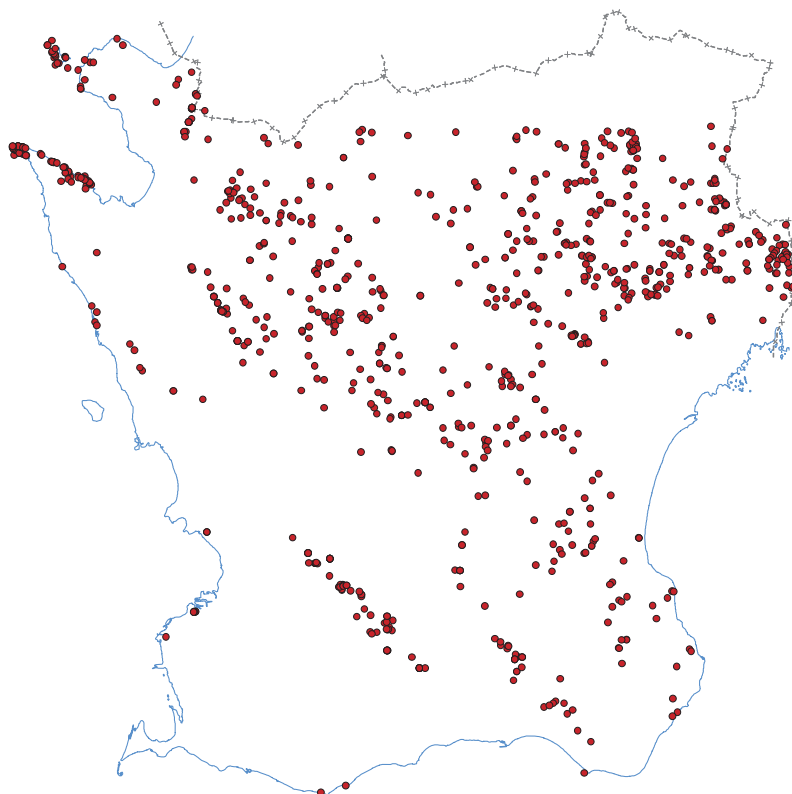
Bergarterna i området domineras av metasedimentära och granitoida gnejser samt granit. Värmeledningsförmågan för dessa bergarter varierar kraftigt. Medelvärde ligger mellan 3,0 och 3,5 W/m·K. Mindre vanliga bergarter i regionen består av kvartsrika gnejser av sedimentärt ursprung och gnejsiga graniter med ett medelvärde på värmeledningsförmågan på mellan 3,5 och 4,5 W/m·K. För områden med basiska (kvartsfattiga) bergarter, till exempel 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.

Värmeledningskarta för Skåne

Som underlag till kartan användes SGUs mineralfördelningsdata (från punkträkningsanalyser) för Skånes olika bergarter. Data från 870 prov, geografiskt fördelade enligt figur 29, har delats upp efter bergartstyp och värmeledningstal. Bland de prov som är analyserade med punkträkningsanalys är kristallina bergarter som granit, gnejser av olika ursprung, amfibolit och diabas tydligt överrepresenterade (fig. 30). Detta beror på att punkträkning i samband med kartläggning av berggrunden normalt inte utförs på de sedimentära bergarterna, åtminstone inte rutinmässigt.



Figur 28. 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).



Figur 29. 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.

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.

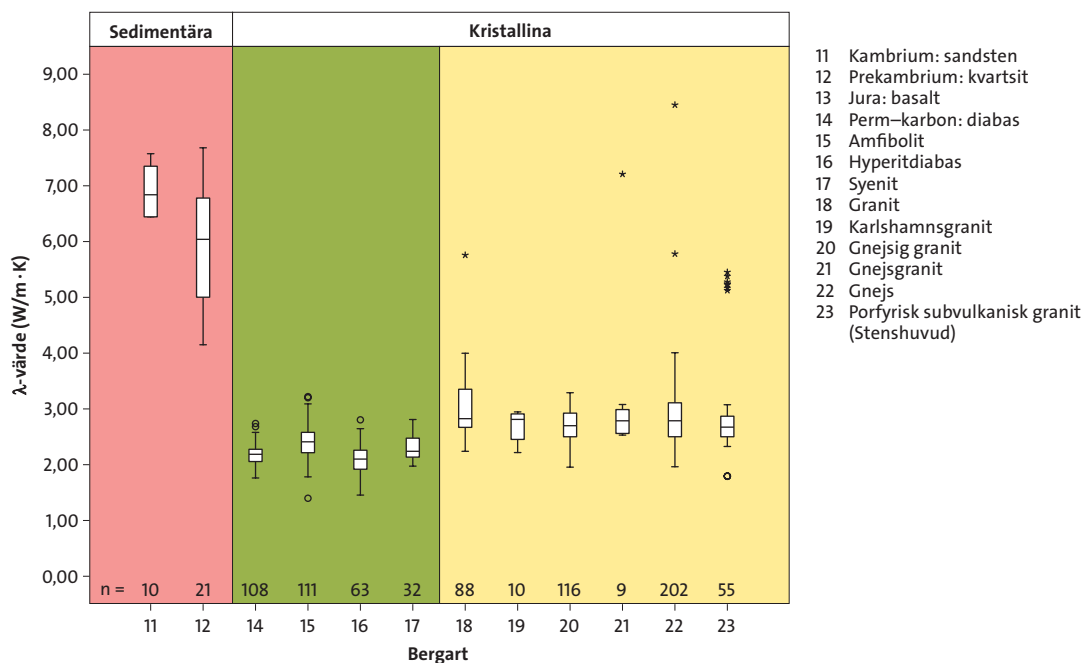
Knappt 200 bergartsprov har analyserats med avseende på värmeledning och värmediffusivitet med hjälp av en TCS, se sidan 24. Resultaten från TCS-mätningarna visas i figur 31. Analyserna ingick som en viktig del i Andolfssons mastersarbete och fokuserade dels på värmeledning i de sedimentära bergarterna 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 30 och 31 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 prekambrika kvartsiten). De relativt kvartsfattiga bergarterna (till exempel 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. 32).

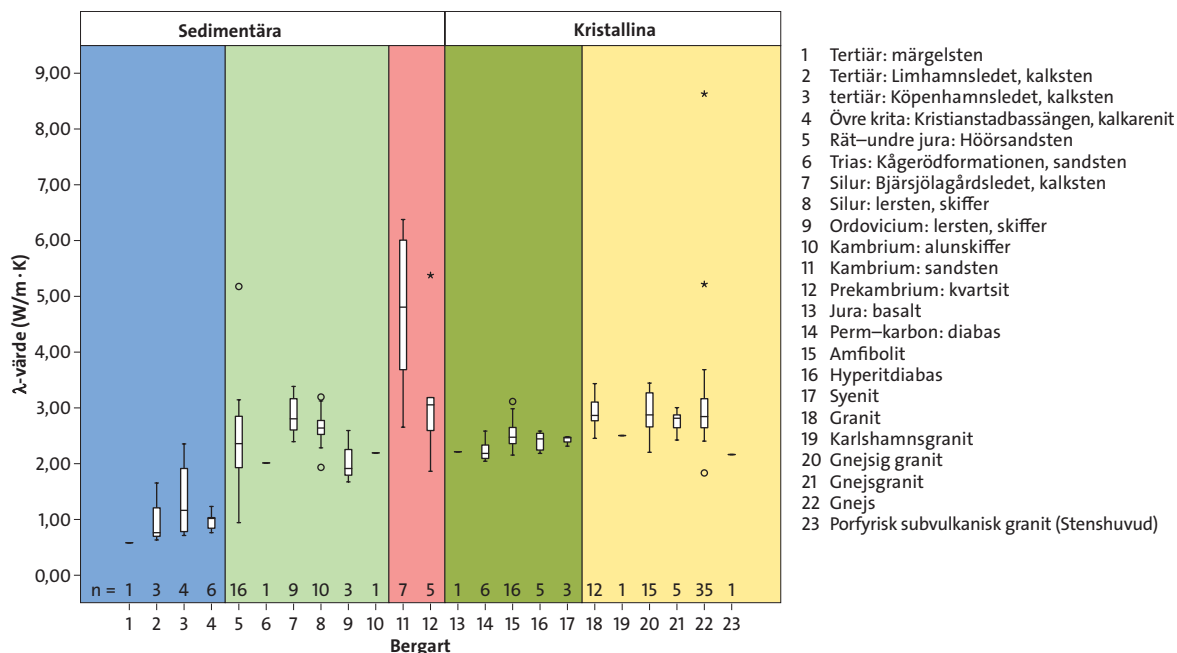
Kartan i figur 32 visar översiktligt bergarternas variation vad gäller värmeledningsförmåga, enligt de analyser som Andolfsson (2013) redovisar. Bergarternas utbredning är baserad på berggrundsinformation i SGUs kartdatabas i skala 1:50 000. Framför allt syftar kartan till att ge en regional bild av 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 den spridning i värmeledningstal som bergarterna visat enligt figur 30 och 31. 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 och jämförelse med TRT- och DTRT-mätningar samt utvärdering om vad TCS-mätningarna kan ha för betydelse. 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

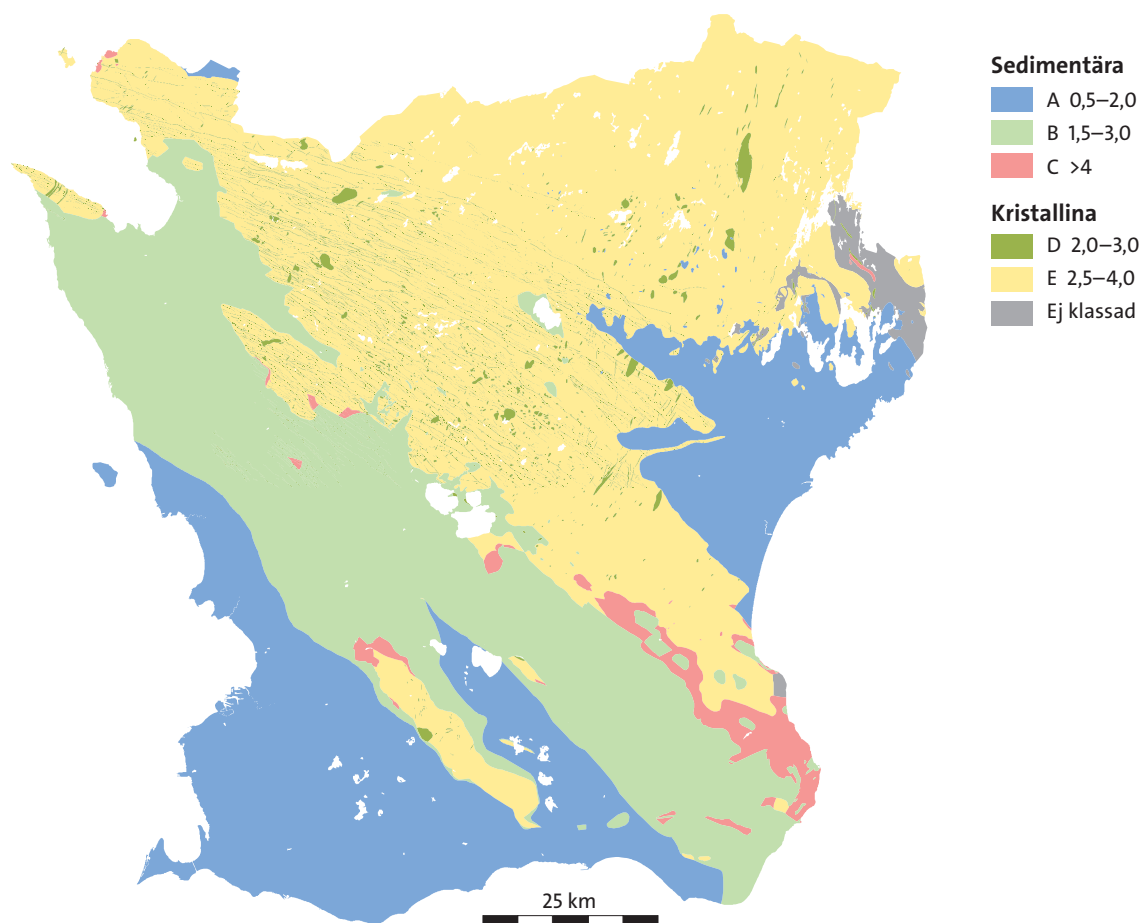
Vid framställningen av kartorna har ingen hänsyn tagits till faktorer som berggrundens deformationsgrad, bergartsfördelning, sprickighet, porositet och grundvattenflöde, vilka alla påverkar utformningen av en geoenergianläggning. För Skånes del är det framför allt i områden med porösa sedimentära bergarter som 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 det finnas en osäkerhet 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 egenskaper. För att förbättra kartorna krävs kompletterande djupinformation i områden med heterogen berggrund. Den porösa och relativt mjuka, kvartsfattiga kalkstenen i Skåne har till exempel generellt sett mycket låga värmeledningstal, men lokal förekomst av flinta och förkalkad kalksten i ett borrhål kan avsevärt höja borrhålets termiska egenskaper (se fig. 7). Enskilda lager



Figur 30. Låddiagram som visar värmeledningsförmågan λ för olika skånska bergarter, beräknade från punkträkningsdata (mineralsammansättningen). För varje bergart anges max, min (vertikala streck) och spridningen av 50 procent av mätvärdena (vit låda), samt medianvärdet som ett svart horisontellt streck. Avvikande värden anges med asterisk (efter Andolfsson 2013).



Figur 31. 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 procent av mätvärdena (vit låda), samt medianvärdet som ett svart horisontellt streck. Avvikande värden anges med asterisk (efter Andolfsson 2013).



Figur 32. Exempel på tematisk karta som visar värmeledningsförmågan (i W/m·K) för Skånes berggrund vid markytan (efter Andolfsson 2013). Kartan bör användas med viss försiktighet, se text.

kan i ett sådant fall bidra till en stor del 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 eller mindre än i övriga bergartslager i samma borrhål. Den termiska påverkan från ett borrhål styrs även av faktorer som energibelastning, borrhålets geometri och återladdningen av termisk energi.

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

Jorrdjupsmodell för Skåne

Uppbyggnaden av Skånes berggrund och jordarter skiljer sig i många fall avsevärt från den i övriga delar av landet. Framför allt är det den höga andelen 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 jorrdjupskarta som är framtagen med samma metodik som i den nationella datorgenererade modellen som beskrivits tidigare (se fig. 17), och en karta som konstruerats manuellt utifrån brunnnsdata och hälldata och där hänsyn och bedömningar gjorts utifrån lokal geologisk kunskap.

Datorgenererad jorrdjupsmodell

Modellen i figur 33 är framtagen enligt den metodik som beskrivs i Daniels & Thunholm (2014). Den bygger på i stort sett samma information som den manuellt framtagna kartan, med skillnaden att man antagit vissa samband mellan jordlagrens uppbyggnad och jordlagrens mäktighet, samt att man vägt in rumsliga värderingar för bland annat sprickzoner i beräkningsmodellen. Kartan ger i allmänhet en mer detaljerad avgränsning av respektive områdes mäktighet jämfört med den manuellt framtagna modellen.

Manuellt framtagen jorrdjupsmodell

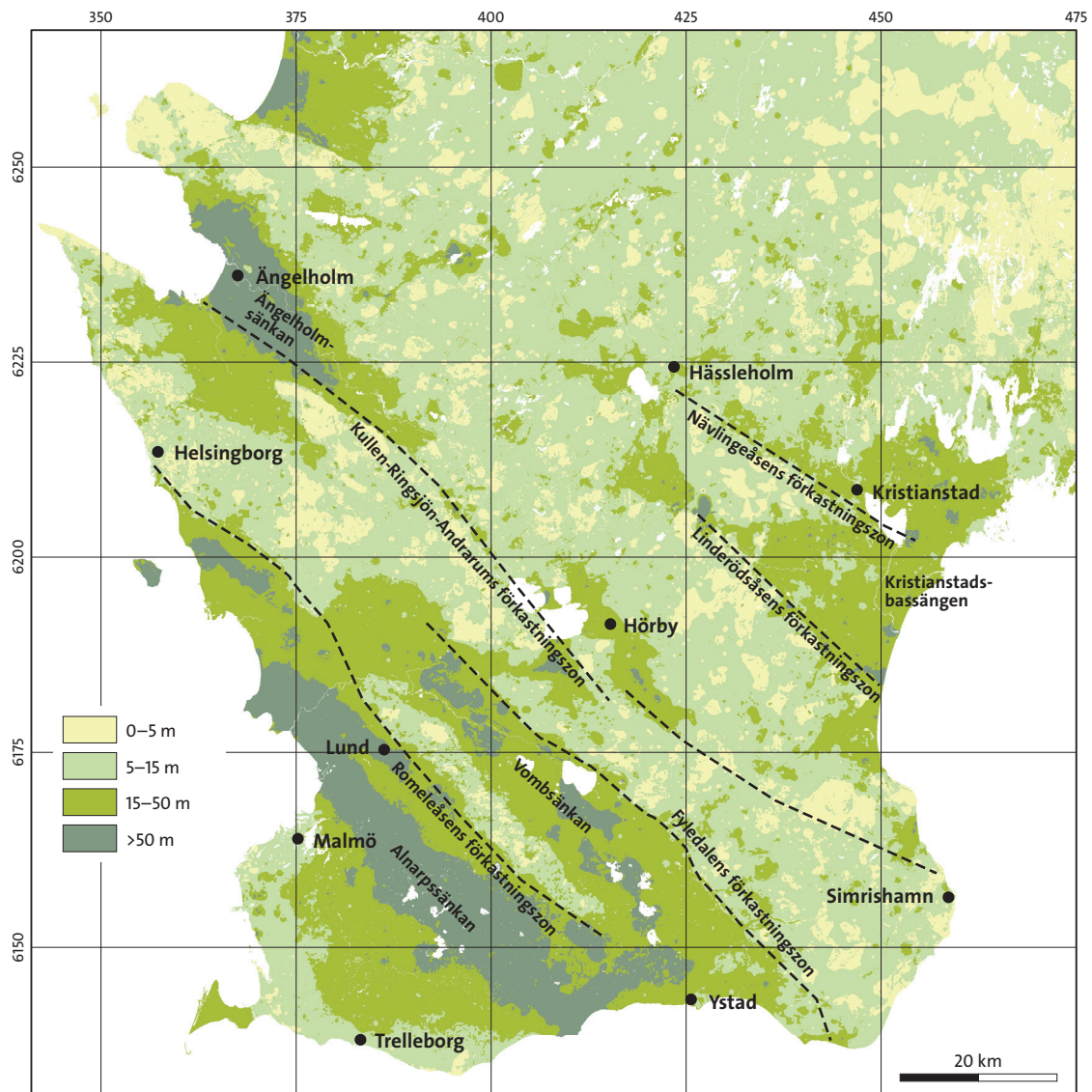
Den manuellt framtagna jorrdjupsmodellen för Skåne visas i figur 34. Modellen baseras på jorrdjupsinformation från SGUs brunnarsarkiv och på observationer av berg i dagen. Den första versionen togs fram som ett uppdrag åt Länsstyrelsen i Malmöhus län år 2000. En äldre SGU-karta över sydvästra Skåne har också använts som underlag (Gustafsson 1980). Dessa kartor har sedan kompletterats med ny information från databaserna enligt ovan. Brunnsuppgifter som registrerats i SGUs brunnarsarkiv 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 jordtäckets 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 cirka 3 brunnar per kvadratkilometer.

Information om hållar (berg i dagen) har dessutom hämtats från jorddatabasen. Totalt ingår 14 050 hålltytor och cirka 4 000 linje- (till exempel vägskärningar) eller punktobjekt (små hållar) i databasen.

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

Utvärdering av jorrdjupsmodeller

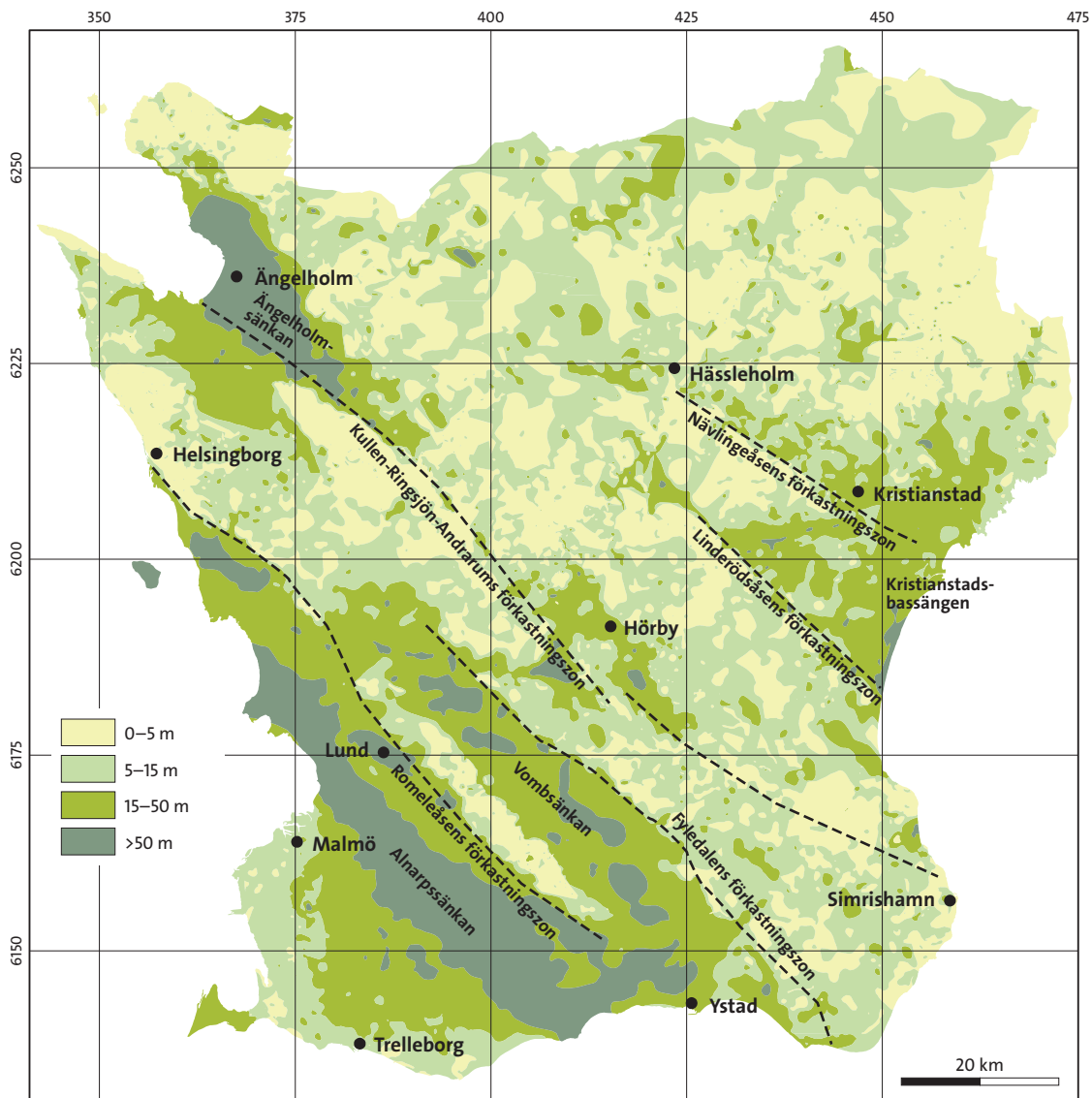
Båda modellerna visar i stor sett samma fördelning av jordmäktigheter, samt en koppling mellan jordmäktighet och den underliggande berggrundens uppbyggnad samt förekomsten av större förkastningszoner. En väl synlig, nordvästlig trend i områdena med stora jordmäktigheter sammanfaller med riktningen på 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



Figur 33. Datorgenererad jorddjupsmodell enligt metodik beskriven i Daniels & Thunholm (2014).

berggrund (fig. 35). 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 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 mäktigaste jordlagren påträffas i Alnarpssänkan, som utgör en väl avgränsad dalsänka i berggrunden. Här finns uppgifter om upp till 183 m mäktiga jordlager. Sänkan är väl dokumenterad med borrhningar och geofysiska undersökningar, eftersom grusavlagringarna i dess djupare delare

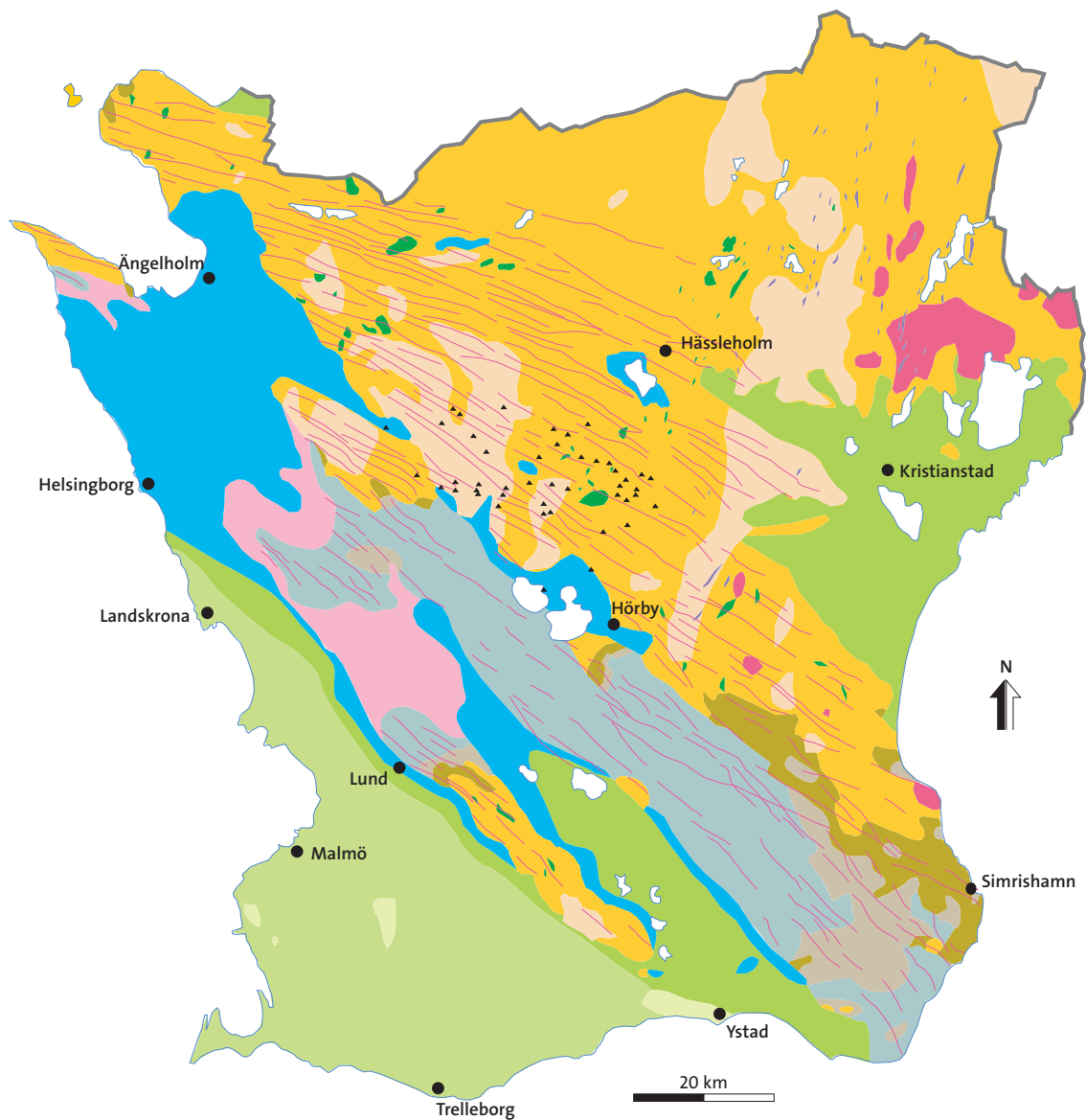


Figur 34. Jorddjupsmodell framtagen manuellt med stöd av framför allt brunnssdata, hållinformation och lokal geologisk kunskap.

utgör en betydande akvifer. Jorddjupen har tidigare dokumenterats av Gustafsson (1980).

I båda modellerna framträder också de betydande jordmättigheter 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 så kallade skånska urbergshorstarna.

Sydväst om Östra Ringsjön och i Vombsänkan framträder sänkor i berggrunden som troligtvis bildades under prekvarter 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 mörkgrå
- Danien: vit–ljusgrå bryozo-kalksten 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
- Amfibolit: gångar, linser och ådror, ofta granatförande
- Hyperitdiabas: fin- till medelkornig gångbergart
- Gnejsgranit: medel till grovkornig, rödgrå, ställvis bandad till ådrad
- Ortognejs: finkornig, röd till rödgrå

Figur 35. Berggrundskarta över Skåne, där såväl sedimentära som kristallina bergarter påträffas. För deras betydelse, se text.

Bergarter och energiborrning i skånsk berggrund

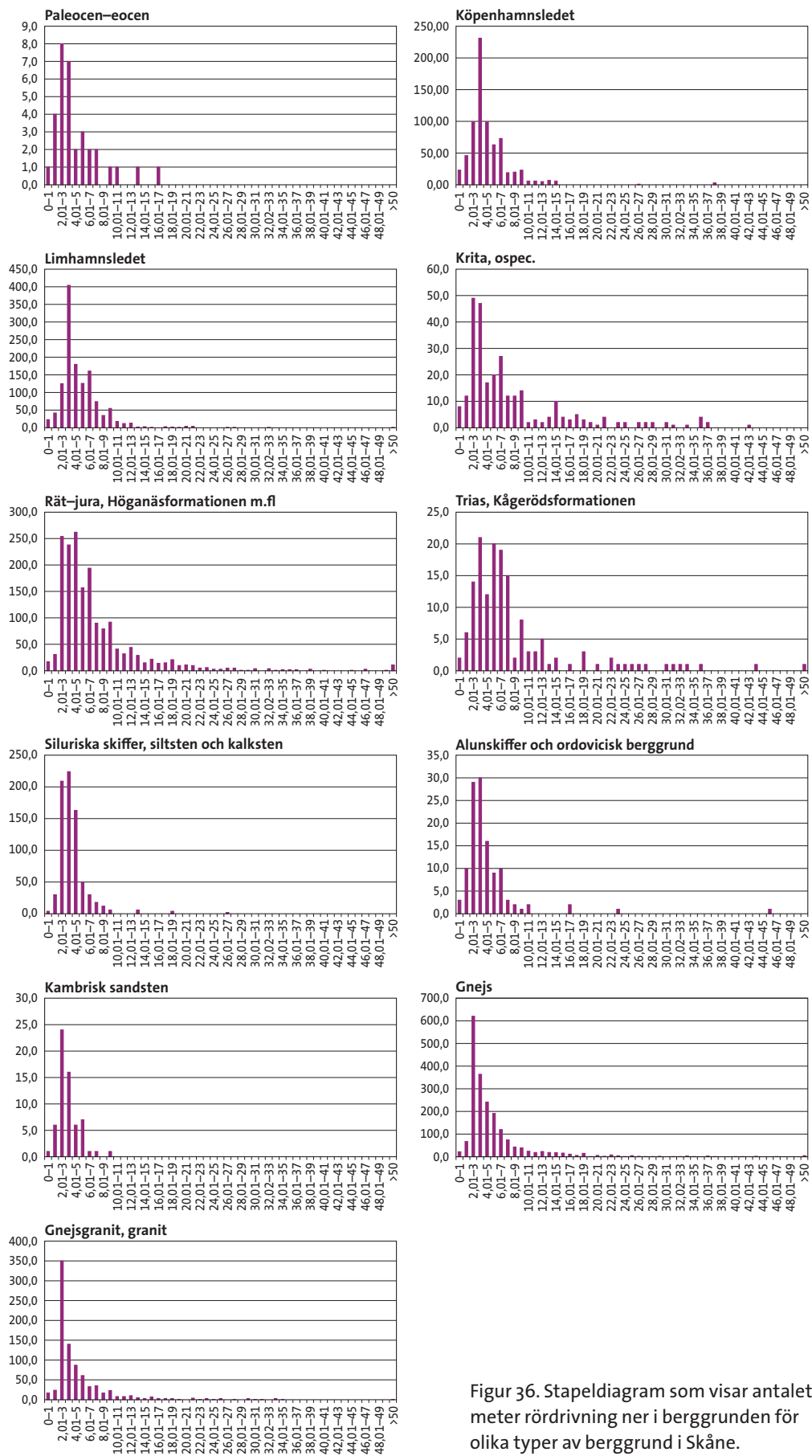
Den skånska berggrunden är unik. Här förekommer både kristallina bergarter, som till exempel gnejs och granit, och yngre sedimentära bergarter, som till exempel kalksten, skiffer och sandsten (fig. 35). Detta medför olika förutsättningar för borrning beroende på stora variationer av berggrundens hårdhet, porositet, lagring och vattenföring. Samtliga dessa faktorer påverkar också utformningen av ett geoenergisystem. Informationen om jorddjupet är väldigt viktig. Generellt krävs ett större borrhjup i sedimentär berggrund än i urberg, beroende på att de 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. Detta medför generellt ett större borrhjup i Norrland jämfört med i Skåne för motsvarande berggrund och energiuttag.

Förutom berggrundens termiska egenskaper har dess densitet stor betydelse för hur lätt eller svårt det är att borra. Berggrundens in situ-egenskaper bestämmer bland annat borrhjupet. Berggrundens stabilitet och borrarhet har stor betydelse för att man ska nå dessa djup. I områden med mycket hård berggrund, till exempel kvartsit, kan borrarheten vara kostsam på grund av stort slitage på borrar och borrar. I områden med sprickig eller vittrad berggrund, till exempel i anslutning till förkastningszoner, kan det bli svårt att nå önskat borrhjup på grund av ras i hålet.

Det finns ett tydligt samband mellan bergart och antalet meter foderrör i berggrunden. Geoenergibrunnar i yngre sedimentära bergarter, till exempel i nordvästra Skåne, kräver relativt fler meter foderrör jämfört med i områden med hårda bergarter, som till exempel kambrisk sandsten. En sammanställning av drygt 7 100 brunnsprotokoll från geoenergibrunnar redovisas i tabell 2 och figur 36. Denna information kan användas för att ge en uppskattning av borrarheten, men också för att kunna ge en första uppskattning av kostnaderna.

Tabell 2. Sammanställning av foderrörsdrivning i olika typer av bergarter och berggrund i Skåne (se även figur 36).

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



Figur 36. 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. Abesser (2007) och Hähnlein m.fl. (2013) har bland annat belyst dessa konsekvenser för europeiska geoenergianläggningar.

SGU har en viktig roll som remissinstans vid bedömning av lämpligheten för geoenergianläggningar inom vattenskyddsområden. När det gäller vattenskyddsområden är det mestadels relativt tydligt vilka riktlinjer och regleringar som finns för respektive område (skyddszon). Däremot är det 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 beslutsunderlag kommer att finnas att tillgå för handläggaren. Att utveckla kunskap och underlag öppnar för ett mer nyanserat förhållningssätt till de olika intressena geoenergi och grundvatten av god kvalitet.

I denna rapport har exempel på information som kan användas för att bedöma metod, design och kostnad för geoenergianläggningar 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 hur informationen bör användas och vilka begränsningar som finns? Hänsyn till deformation, sprickighet, kornstorlek, bergspänningsförhållanden och porositet har till exempel 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 till exempel använder många borrentreprenörer 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, det vill säga ner till det ungefärliga djup där man vanligen anlägger geoenergi. 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 förutsättningar för ett kompetent stöd till samhället avseende geoenergi. Förutom geologisk kompetens har SGU även analys- och laboratorieutrustning 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 geoenergin 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. Mätresultaten visar de termiska förhållandena i ett borrhål och ger en samlad bild av de geologiska och hydrogeologiska faktorer som påverkar brunnens förmåga att termiskt kommunicera med omgivningen. Dessa mätningar kan vara ett värdefullt komplement till den information som SGU tillhandahåller. 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 både för 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. Den 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 inte rutinmässigt kan lagras i SGUs databas. Information om observationer som gjorts under själva borrningen om sprickighet, vattenföring i olika zoner, konduktivitet, bergart eller färg på borrhax, samt sjunkhastighet, finns av varierande kvalitet och omfattning i borrhprotokollen. Informationen kan vara till stor nytta för att bedöma berggrundens hydrogeologiska förhållanden. En målsättning är att SGU ska kunna lagra dessa uppgifter och dessutom visa dem utåt. Detta skapar större motivation hos borrarerna att fylla i uppgifterna och därmed förbättra databasens information, både kvalitativt och kvantitativt.

Precis som i övriga världen medför den urbana utvecklingen i Sverige 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, ledningsdraging, avloppssystem och byggnader, men även utnyttjande av resurserna för till exempel geoenergi. SGU deltar i EU-projektet SUB-URBAN (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. Det kan vara 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. Resultaten från projektet kommer att bestå av delrapporter med olika inriktning och kommer att finnas tillgängliga på engelska via projektets webbplats. SGU kommer i efterhand att låta översätta valda delar av resultaten till svenska.

Slutsatsen av den här rapporten är att SGU har en hel del användbar geologisk information för bedömning av geoenergianläggningar, men vi anser att det behövs ett ökat samarbete mellan myndigheter, forskningsinstitutioner och branschorganisationer för att bredda kompetensen och kunskapen ytterligare om geoenergins förutsättningar i Sverige. En samsyn om problemställningar och utvecklingsmöjligheter ur ett, tekniskt, geovetenskapligt och samhällsekonomiskt perspektiv bedöms som viktigt för att stärka geoenergins roll i en hållbar samhällsutveckling.

TACK

Tack till branschorganisationerna Avanti och Geotec, José Acuña (KTH), Göran Persson (HP-Borrningar AB), och till värmepumpsgruppen (Stockholms Stad) som kommit med värdefulla synpunkter som avsevärt förbättrat rapportens innehåll. Tack också till Magdalena Thorsbrink som drivit arbetet med att ta fram figurerna 1–5 och till Bo Thunholm för textgranskning och bidraget till figur 10 samt figur 19. Även Anna Hedenström och Kerstin Finn tackas för granskning av texten.

REFERENSER

- Abesser, C., 2007: Open-loop ground source heat pumps and the groundwater systems: A literature review of current applications, regulations and problems. *British Geological Survey Open Report OR/10/045*, 31 s.
- Acuña, J., 2013: Distributed thermal response tests – New insights on U-pipe and Coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes. *KTH Report 13/01*, 138 s. (Doktorsavhandling)
- 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. & Risberg, 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-Wärmespeichern*. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik. Universität Stuttgart, Diss., 136 s.
- Beltrami, H., Matharoo, G.S., Tarasov, L., Rath, V. & Smerdon, J.E., 2014: Numerical studies on the Impact of the Last Glacial Cycle on recent borehole temperature profiles: implications for terrestrial energy balance. *Climate of the Past 10*, 1693–1706.
- 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 Transactions 30*, 655–658.
- Bonsor, H.C., Dahlqvist, P., Moosemann, L., Classen, N., Epting, J., Huggenberger, P., Jantza, M., Laursen, G. & Gogu, C.R., 2015: Groundwater, geothermal modeling and monitoring at city-scales –Identifying good practice, and effective knowledge exchange. COST Subsurface Action – working group 2 report, 50 s.
- Claesson, J. & Eskilson, P., 1987: Conductive heat extraction by a deep borehole. Thermal analyses and dimensioning rules. 29 s. I P. Eskilson, 1987: *Thermal analyses of heat extraction boreholes*, Doktorsavhandling, Matematisk fysik, Lunds universitet. 222 s.
- 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 undersökning SGU-rapport 2014:14*, 14 s.
- Dreyer, W., 1974: *Materialverhalten anisotroper Festkörper: Thermische und elektrische Eigenschaften. 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*. Europaparlamentets 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. In E. Hurtig, m.fl. (ed.): *Geothermal atlas of Europe*. International 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: Skifffergas och biogen gas i alunskiffern i Sverige, förekomst och förutsättningar – 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.
- Eugster, W.J., 2001: Langzeitverhalten der EWSAnlage in Elgg (ZH), Spotmessung vom Herbst 2001. *Final Report, Swiss Federal Office of Energy, Berne*, 14 s.
- Fetter, C.W., 2001: *Applied hydrogeology*. Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, 598 s.
- Gehlin, S., 1998: Thermal Response Test – in situ measurements of thermal properties in hard rock. *Luleå University of Technology, Sweden, Licentiate thesis 1998:37*, 41 s.
- Gehlin, S., 2002: Thermal Response Test - Method, Development and Evaluation. *Luleå University of Technology, Doctoral Thesis 2002:39*, 44 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.
- Henning, A. & Limberg, A., 2012: Veränderung des oberflächennahen Temperaturfeldes von Berlin durch Klimawandel und Urbanisierung. *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge* 19.1, 81–92.
- Horai, K., 1971: Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Journal of Geophysical Research* 76, 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.
- Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G. & Blum, P., 2013: Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy* 59, 914–925.
- 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.
- Kiehl, J.T. & Trenberth, K.E., 1997: Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78, 197–208.
- Lachenbruch, A.H., Sass, J.H., Marshall, B.V. & Moses Douglas Jr., T.H., 1982: Permafrost, Heat Flow, and the Geothermal Regime at Prudhoe Bay, Alaska. *Journal of Geophysical Research* 87, 9301–9316.
- 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.
- Raymond, J., Therrien, R., Gosselin, L. & Lefebvre, R., 2011: A review of thermal response test analysis using pumping test concepts. *Ground Water* 49, 932–945.
- 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.
- Rybach, L., 2012: Shallow Systems: Geothermal Heat Pumps. In Sayigh A, (ed.) *Comprehensive Renewable Energy* 7, 187–205, Oxford: Elsevier.

- Rybach, L. & Sanner, B., 2000: Ground-source heat pump systems – The European experience. *GeoHeatCenter Bull.* 21/1, 16–26.
- Rybach, L. & Eugster, W.J., 2002: Sustainability aspects of geothermal heat pumps. *Proc. 27th workshop on Geothermal reservoir Engineering, Stanford, SGP-TR-171*, 55–64.
- 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 s.
- 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, s. 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 Department of Mechanical and Process Engineering Zürich, 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, L.O. & 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.
- Svenskt Geoenergicentrum, 2015: Riktlinjer för termisk responstest. <[http://www. geoenergicentrum.se](http://www.geoenergicentrum.se)>
- Wallroth, T., Eliasson, T. & Sundquist, U., 1999: Hot dry rock research experiments at Fjällbacka Sweden. *Geothermics* 28, 617–625.