

# Geofysiska undersökningsmetoder för geoenergisystem

***Måns Larsson***

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,  
kandidatarbete, nr 425  
(15 hp/ECTS credits)



Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
2015



# **Geofysiska undersökningsmetoder för geoenergisystem**

Kandidatarbete  
Måns Larsson

Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
2015

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Introduktion .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Bakgrund .....</b>	<b>7</b>
2.1	Geoenergisystem	7
<b>3</b>	<b>Förundersökningar .....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Hydrogeologiska och geologiska parametrar .....</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Undersökningsmetoder .....</b>	<b>9</b>
5.1	Undersökningsborrning	10
5.1.1	MWD-teknik (measure while drilling)	10
5.1.2	Borrtekniker	10
5.1.2.1	Hammarborrning	10
5.1.2.2	Wassara-teknik	11
5.1.2.3	Rotationsborrning	11
5.2	Undersökningar i borrhål	11
5.2.1	Pumptest	11
5.2.2	Termisk responstest	12
5.2.3	Borrhålsloggning	12
5.2.3.1	Gamma ray-teknik	12
5.2.3.2	Resistivitet	13
5.2.3.3	Caliper	13
5.3	Geofysiska undersökningsmetoder	13
5.3.1	Seismik	13
5.3.2	Geoelektrik	13
5.3.3	EM-metoder	14
<b>6</b>	<b>Resultat .....</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>Slutsats .....</b>	<b>18</b>
<b>9</b>	<b>Referenser .....</b>	<b>19</b>

# Sammanfattning

MÅNS LARSSON

Larsson, M., 2015: Geofysiska undersökningsmetoder för geoenergisystem. *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet*, Nr. 425, 19 sid. 15 hp.

**Sammanfattning:** I Sverige finns det idag mellan 400 000 – 500 000 geoenergianläggningar och det uppskattas att nettotillskottet energi från geoenergianläggningar är ungefär 18 – 20 TWh per år. Geoenergianläggningar använder markens översta 300 – 500 metrar för att utvinna värme eller kyla. Vid anläggning av geoenergisystem kan man använda olika borrhåstekniker, mer eller mindre lämpliga beroende på olika geologiska och hydrogeologiska förutsättningar. Inför anläggning av ett geoenergisystem är det således viktigt att utreda geologiska och hydrogeologiska parametrar som underlättar anläggning, val av borrhåsteknik och senare dimensionering av systemet. Många av dessa parametrar påverkar bland annat markens termiska egenskaper. De metoder som beskrivs i detta arbete, undersökningsborrning, undersökningar i borrhål och geofysiska undersökningsmetoder, kan användas för att utreda dessa parametrar. De termiska egenskaperna i marken är avgörande vid dimensioneringen av slutna geoenergisystem och termisk responstest, som utreder borrhålets termiska egenskaper under naturliga förhållande, är en undersökningsmetod som rekommenderas inför dimensionering av samtliga större slutna geoenergisystem. Vidare diskuteras och jämförs undersökningsmetoderna utifrån svagheter, styrkor och kostnad. Information från undersökningsborrning och undersökningar i borrhål ger information endast i ett borrhåls omedelbara närhet, medan de geofysiska undersökningarna ger data för att upprätta en modell över ett större område. Den stora skillnaden i de olika undersökningsmetoderna gör att de geofysiska undersökningsmetoderna huvudsakligen är lämpade i områden med varierande geologi. Dock bör alltid de modeller som produceras utifrån geofysisk data bekräftas av en eller flera undersökningsborrningar.

**Nyckelord:** Geoenergi, geofysiska undersökningar, borrhåsteknik, geoteknik.

**Handledare:** Per Möller, Lunds Universitet.

**Externa Handledare:** Pia Hansson, Tyréns. Johan Barth, Geotec. Signhild Gehlin, Svenskt geoenergicentrum

**Ämnesinriktning:** Berggrundsgeologi (Geoeteknik)

*Måns Larsson, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige. E-post: mablars-son@gmail.com*

# Abstract

MÅNS LARSSON

Larsson, M., 2015: Geophysical investigation for geoenergy. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 425, 19 pp. 15 hp (15 ECTS credits).

**Abstract:** There are about 400 000 – 500 000 shallow geothermal energy systems in Sweden and every year the net additions of energy from geothermal energy systems are about 18 – 20 TWh. Usually it is the upper 300 – 500 meters of the ground that are used for extracting heat or cold from cored strata. When constructing a shallow geothermal energy system, there are different drilling techniques available for use that are more or less suitable under different geological and hydrogeological circumstances. Different geological and hydrogeological circumstances also affect the thermal properties of the ground and are thus also important for optimizing the size and type of the geothermal energy system. To investigate all the parameters of importance, both for drilling purposes and sizing of a closed looped geothermal energy system, different investigation methods are explained, evaluated and compared. Geophysics, investigation drilling and down the hole measurements can be used to determine different geological and hydrogeological parameters that are important for closed loop systems. To investigate the ground thermal properties in situ, a thermal response test should always be conducted for more accurate sizing purposes for larger closed loop systems. Investigation drilling and down the hole measurements give only information in close vicinity of the drilling site while geophysical investigation methods can be used to produce a geological model over a larger part of an area; geophysical methods are thus very useful in areas of a varying geology. However, investigation drilling should always be performed to confirm the geological model produced by geophysical investigations.

**Keywords:** Geoenergy, Geophysical investigations, drill technique, geological parameters, geotechnical

**Supervisor(s):** Per Möller, Lund University

**External Supervisors:** Pia Hansson, Tyréns. Johan Barth, Geotec. Signhild Gehlin, Svenskt geoenergicentrum

**Subject:** Bedrock geology (Geotechnical)

*Måns Larsson, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden. E-mail: mablarsson@gmail.com*

# 1 Introduktion

Målet med detta kandidatarbete är att utvärdera de undersökningsmetoder som kan vara relevanta att använda vid planering, utvärdering, val och utförande av olika typer av geoenergisystem. För att skapa en uppfattning om de viktiga parametrar som är lämpliga att utreda beskrivs både olika typer av geoenergisystem (öppna och slutna system) och borrhstekniker (hammarborrning och rotationsborrning). Många av de undersökningsmetoder som kan användas är framför allt lämpliga, och ur kostnadssynpunkt motiverbara, i områden där information från SGU:s brunnsarkiv, samt geologiska och hydrogeologiska kartor är otillräckliga för att skapa en bra uppfattning om geologin i området.

Geoenergi är ett miljövänligt alternativ för att värma och kyla byggnader och infrastruktur. I Sverige används tekniken i stor utsträckning och det finns många konsulter och entreprenörer som arbetar med att anlägga geoenergisystem. Idag används endast enstaka förundersökningsmetoder inför planering och utförande av ett geoenergiprojekt. För att underlätta projekteringen och avgöra vilken typ av geoenergisystem som är lämplig, optimera systemens effekt och bättre kostnadsplanera projektet, är det viktigt att undersöka mark- och grundvattenförhållandena i det aktuella området. Även för själva utförandet av anläggningen, främst val av borrhsteknik, är geologin avgörande. Problem under borrhningarna leder lätt till extra kostnader för projekt.

De viktiga parametrarna kan utredas med hjälp av olika undersökningsmetoder. För att skapa en uppfattning om vad som är relevant att utreda inför varje projekt beskrivs här olika typer av geoenergisystem och borrhstekniker. Utvalda undersökningsmetoder beskrivs, för att därefter jämföras.

## 2 Bakgrund

Geoenergi är samlingsnamnet för olika tekniker där värme och kyla från markens översta 300 - 500 meter tas tillvara. I huvudsak utgörs geoenergin av solenergi som passivt lagras i mark, berg och grundvatten.

Det finns olika typer av geoenergisystem som är anpassade för olika typer av hydrogeologiska förutsättningar och för hur man skall använda energin. Systemen kan delas in i slutna respektive öppna system och vidare i aktiva respektive passiva system. De slutna systemen, illustrerade i Figur 1-2, cirkulerar en energibärare, ofta kallad köldbärare, i en värmeväxlare, vanligtvis slangar. Köldbärarvätskan består av bioetanol och vatten (Barth et al., 2012). Den cirkulerande vätskan är aldrig i direktkontakt med sin omgivning och påverkan på grundvatten och miljön runt borrhålet är normalt sett obefintlig.

Ett öppet system använder sig av det befintliga grundvattnet som energibärare, där vattnet via borrhål

pumpas upp ur den vattenbärande formationen (akvifären) och den energi som finns lagrad i berget/jordlagren utvinns (Fig. 3). Vattnet återförs helt oförändrat och utan att varit i kontakt med andra vätskor tillbaka till akvifären (Barth et al., 2012). Det föreligger således i detta fall inget nettouttag av vatten ur akvifären.

Sverige har mycket gynnsamma förutsättningar för geoenergi, och det finns ungefär 400 000 -500 000 geoenergianläggningar av olika slag idag. Majoriteten av dessa är system för villor. Det uppskattas att nettotillskottet i Sverige från geoenergin är ca 18-20 TWh per år, enligt Johan Barth på Svenskt Geoenergicentrum.

### 2.1 Geoenergisystem

Bergvärme, som är ett slutet geoenergisystem, är den vanligaste systemtypen i Sverige och kan användas till både villor och större lägenhetskomplex eller andra typer av byggnader/verksamheter (Barth et al., 2012). Placeringen av borrhålen kan variera med de geologiska förutsättningarna. Det är viktigt att de enskilda borrhålen inte påverkar varandra och borrhålsplaceringen är främst en funktion av bergets värmeledningsförmåga, bortsett från energiuttaget.

Ett grundvattensystem är ett öppet system. Där används det naturligt förekommande grundvattnet i jord- och berglager. Energin överförs effektivt från jorden eller berget till vattnet, vilket beror på att den värmeväxlande ytan i akvifärens porer och/eller sprickor är mycket större än för borrhålsväggen och slangväggen i ett slutet system och därvid blir möjligheten till energiöverföring större. Då grundvattnet används i öppna geoenergisystem är vattenkemin en viktig parameter då ogynnsamma förhållanden kan orsaka problem som korrosion och igensättningar på utsatta delar i systemet (Andersson, 2003).

**Passiva geoenergisystem** använder värme eller kyla från marken där systemens återladdning sker naturligt från omgivningen. I dessa system skall borrhålen placeras så att de ej påverkar varandra (Fig. 1). Passiva system innefattar bland annat bergvärme, jordvärme och grundvattenvärme (Thuresson, 2014; Barth et al., 2012).

**Aktiva geoenergisystem** innebär att värme och/eller kyla aktivt inlagras i marken. Borrhålslager och akvifärlager är två exempel på geoenergisystem som lagrar värme och kyla (Fig. 2, 3). I dessa system optimerar man avståndet mellan borrhålen för att få bästa lagringseffekt. Aktiva geoenergisystem brukas främst i större anläggningar och industrier där man har behov av både kyla och värme. Samma system kan utvinna värme och lagra kyla under vintern, för att på sommaren utvinna kyla och lagra värme (Barth et al., 2012).

Borrhålslager fungerar som ett lager av värme eller kyla och är i de flesta fall slutna system. De fungerar

på ett liknande sätt som det passiva bergvärmesystemet, med skillnaden att borrhålen termiskt ska påverka varandra för att öka temperaturskillnaden gentemot omgivningen. Dessa system har alltid fler borrhål. Beroende på energilasten och de geologiska förutsättningarna kan system med mer än 100 borrhål förekomma. Borrhålsdjup och borrhålsavstånd är bland annat beroende av bergets värmeledningsförmåga (Barth et al., 2012).

Ett akvifärlager är ett öppet system där grundvatten pumpas upp ur ena delen av akvifären, för att efter energiuttag (värme eller kyla) infiltreras tillbaka ner i en annan del av akvifären (Barth et al., 2012). I ett akvifärlager placeras uttagsbrunnarna och infiltrationsbrunnarna på ett tillräckligt stort avstånd från varandra så att de hydrauliskt inte kan påverka varandra. Vattenkemin, flödes hastigheten och de hydrogeologiska förutsättningarna är viktiga parametrar i detta system. Eftersom det är ett öppet system kan korrosionsproblem på utsatta delar ske på grund av utfällningar. Grundvattnets naturliga flödes hastighet i akvifären är av betydelse då större flöden kan transportera bort den inlagrade energin och systemets effektivitet minskar. Om akvifären har hög porositet kan den lagrade energin ge upphov till konvektion inom akvifären och på så sätt skapa en mindre skillnad mellan den kalla och varma sidan (Andersson, 2003).

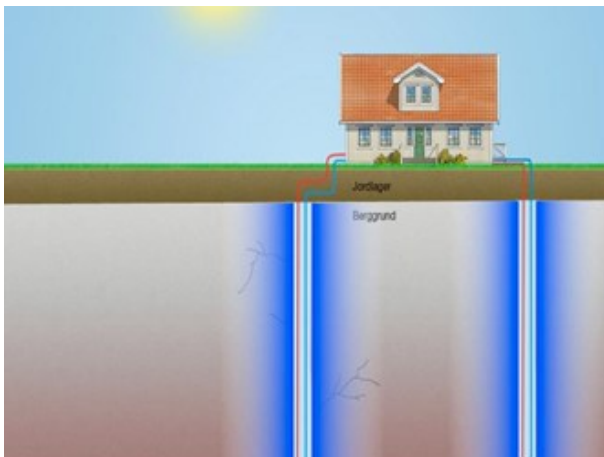


Fig. 1. Passiva geoenergisystem kan använda sig av ett eller flera borrhål för att utvinna energi ur marken. De är viktigt att borrhålen inte påverkar varandra. I bilden är påverkningsområdet runt borrhålen illustrerat med blått. Bilden är modifierad från peekab.nu (2014).

### 3 Förundersökningar

Som första steg inför geoenergi projekt används i flesta fall information från Brunnarsarkivet, som är administrerat av Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) för att få översiktlig information om den rådande geologin i ett område. Informationen går att hämta gratis på [www.sgu.se \(http://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-brunnar-sv.html\)](http://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-brunnar-sv.html) och visar bland annat en specifik brunn ID, vilken fastighet den tillhör, borrhålsdjup, djup till fast berg, vattenmängd, rörborring (indirekt djup till berg) och brunnens användning. Med hjälp av brunn-ID kan information om vem som borrar

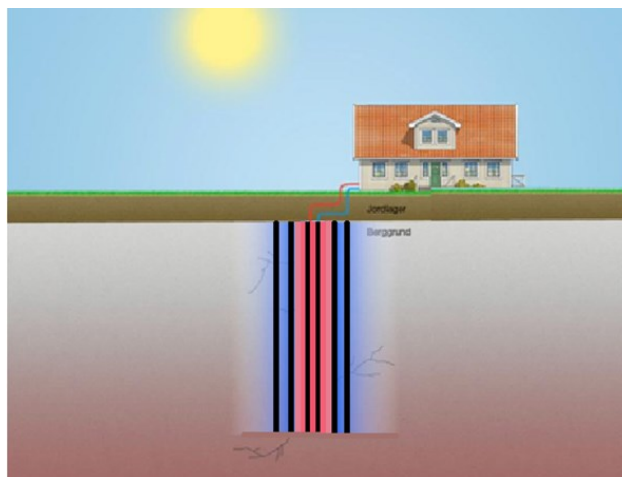


Fig. 2. I borrhålslager, som är ett aktivt geoenergisystem, lagras energin i marken från de olika årstiderna. Under uttag av värme under vintern lagras systemet samtidigt kyla i marken. Under sommaren sker uttag av kyla och lagring av värme. Bilden är modifierad från peekab.nu (2014).

brunnen hittas och därmed kan i många fall ytterligare information om lagerföljd, konsoliderade/okonsoliderade sediment, tjocklek, sprickzoner och vattenbärande lager begäras ut. De färdigproducerade berggrundskartorna, jorddjupskartor och hydrogeologiska kartor som finns hos SGU är också till stor nytta. Det är även bra att göra platsinspektioner för att skapa sig en egen uppfattning om området och/eller bekräfta information från brunnarsarkivet och/eller kartmaterialet. Utifrån detta underlagsmaterial kan en initial uppfattning om geologin i området skapas och ge en första indikation av vilken typ av geoenergisystem (öppet eller slutet) som är lämpligast. I många fall kan denna information vara tillräcklig för att gå vidare med projektet. Om det uppdagas att det finns risk att geologin varierar både lateralt och vertikalt från informationen kan det vara idé att försöka få en övergripande uppfattning om dessa variationer. Med hjälp av de undersökningsmetoder som nedan be-



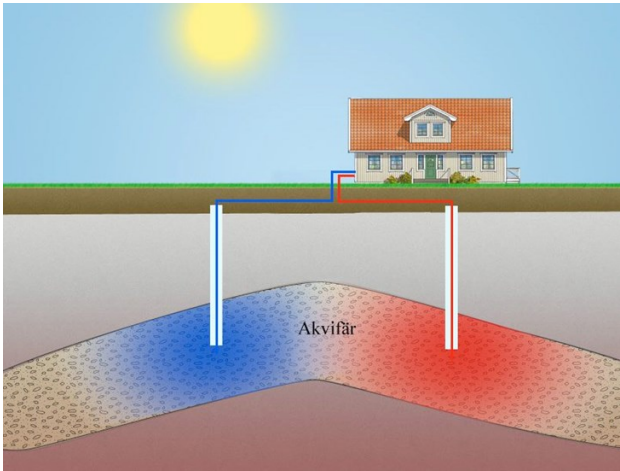


Fig. 3. Ett akvifärlager använder det naturliga grundvattnet som värms och kyls i olika delar av akvifären. Bilden är modifierad från peekab.nu (2014).

skrivs under "Undersökningsmetoder" kan dessa variationer i geologin utredas.

## 4 Hydrogeologiska och geologiska parametrar

Med hjälp av olika undersökningsmetoder kan flera geologiska och hydrogeologiska parametrar specificeras. Olika parametrar är av vikt dels för borrtekniska skäl och dels för dimensionering av geoenergisystem.

För dimensionering av geoenergisystem är markens termiska egenskaper av högsta relevans. Förmågan för en energibrunn att avge eller ta emot energi varierar bland annat med vattenförekomst, mineralogi, porositet och kornstorleksfördelning. I öppna system i berggrunden är det relevant att utreda frekvensen av vattenförande sprickzoner och vattenkemin i dessa. Även för slutna system är vattenförande sprickzoner relevant då det påverkar markens termiska egenskaper. Vattenkemin är viktig då utfällningar kan orsaka igensättningar i pumpsystem och korrosion på utsatta delar. Att planera ett öppet system i sedimentära och lösa avlagringar är något mer komplicerat. Detta kräver information om vattenförande lager, samt lagrens tjocklek och kornstorleksfördelning, för att fastställa vilken typ av filter som ska installeras, filtrets längd samt slitsstorlek. Ett slutet system är inte lika känsligt för hydrogeologiska förhållanden utöver att de påverkar markens termiska egenskaper. Markens termiska egenskaper är den viktigaste parametern för dimensionering av slutna system (Andersson, 2003). Hur långt kylan, alternativt värmen, sprider sig runt hålet är av stor betydelse för placering av borrhålen. I aktiva system ska energin bevaras i marken, medan i passiva system ska en naturlig återladdning av marktemperaturen ske.

För att underlätta val av borrteknik för anläggningen och för att kunna beräkna kostnaden för borrhålen är information om till exempel lösa sediment, djup ner till

fast berg och närvaro av sprickzoner viktig. Priset för borrhålen varierar i hög grad med djupet till fast berg då ökat djup medför ett ökat antal meter foderrör som skall drivas genom de lösa sedimenten, vilket ökar kostnaden väsentligt. Borrsjunkhastigheten varierar mycket med kornstorleksfördelningen, då det i regel går långsammare att borra i finare sediment än i grövre. Information om blockförekomster, speciellt i de översta metrarna, är viktig då det kan orsaka vinkelställning av borrhålet och på så sätt ändra dimensioneringen av systemet. Det bör övervägas att använda borrtekniker som kan bibehålla ett högt tryck i borrhålet under borrhålen om geologin i området består av lösa lager för att förhindra inras. Sprickzoner kan orsaka problem med systemet då infiltration ut i sprickorna kan skada omkringliggande borrhål (Andersson, 2007). Utöver det rent borrtekniska är den vattenmängd som kan förväntas i lagren relevant då det i vissa delar av landet finns strikta regleringar på vad som får släppas ut i ytvattendrag eller dagvattenledning. Vattenmängden kan emellertid vara svår att uppskatta utifrån de olika undersökningsmetoderna, varför borrhållsfarenhet från området är en stor fördel.

## 5 Undersökningsmetoder

För att välja rätt typ av geoenergisystem och för att sedan göra en optimal dimensionering av anläggningen är det avgörande att ha en god kunskap om det aktuella områdets geologi och hydrogeologi. I dagens läge finns ingen norm för tillvägagångssätt inför planläggning och genomförande av ett geoenergisystem. I denna studie belyses olika förundersökningsmetoder och deras lämplighet för olika geologiska och hydrogeologiska miljöer.

Genom att fastställa de rådande geologiska och hydrogeologiska förutsättningarna kan man undvika att överdimensionera, alternativt underdimensionera, ett planerat geoenergisystem. I båda fallen kan genomförandet leda till en dyrare geoenergianläggning eller att anläggningen senare måste kompletteras. Redan inför anläggningen av ett geoenergisystem är det lämpligt att fastställa geologiska parametrar som djup till fast berg, kornstorlek och blockförekomster i lösa jordlager, lagrens fysiska egenskaper, förekomsten av svällande leror och/eller okonsoliderade sandlager, allmän hydrogeologi, samt sprickzoner (Andersson, 2003). Att utreda dessa parametrar underlättar inte bara borrhållsdelen av projektet utan även val av geoenergisystem. Dessutom, med hjälp av information om ovannämnda parametrar, kan möjliga problematiska delar av projektet undvikas och/eller förutspås, allt för att ge en mer korrekt prisbild till beställaren.

I vissa delar av Sverige är det redan från början enklare att avgöra vilken typ av system som är lämpligt, det vill säga öppet eller slutet system, tack vare relativt homogena geologiska och hydrogeologiska förutsättningar. I andra delar är förhållandena så varierande

rande att det i ett tidigt skede av ett anläggningsprojekt bör utredas mer detaljerat över vilken typ av geologi och hydrogeologi som är rådande för att bestämma om man sedan ska projektera för ett öppet eller slutet system. För en större anläggning som kräver en stor markvolym i ett geologiskt heterogent material kan det vara av stor ekonomisk fördel att översiktligt karakterisera de geologiska och hydrogeologiska förutsättningarna innan man bestämmer sig för vilken typ av system som är lämpligt.

I detta arbete beskrivs de inledande arbetena endast översiktligt då det är av allt för omfattande art för att beskrivas i detalj under ett kandidatarbete. Huvuddelen av detta arbete består i att beskriva undersökningsmetoder när det är klargjort att det är ett slutet, medel- till stort system som är aktuellt.

## 5.1 Undersökningsborrning

Genom att borra en undersökningsbrunn kan de flesta geologiska parametrar som är viktiga för ett geoenergisystem mätas. Det är dock viktigt att komma ihåg att en undersökningsbrunn enbart ger punktinformation, speciellt att beakta i geologiskt heterogena områden. Den geologiska informationen som erhålls från endast en undersökningsbrunn behöver inte vara representativ för hela projektområdet. Om komplicerad geologi misstänks kan det vara lämpligt att borra fler än en undersökningsbrunn. Undersökningsbrunnen kan borras i samma dimension som de tänkta brunnarna i det planerade geoenergiprojektet för att kunna användas som en av del av produktionen.

### 5.1.1 MWD-teknik (measure while drilling)

Under en undersökningsborrning går det att specificera, med hjälp av stickprover, en geologisk sekvens, kornstorleksfördelning, djup till fast berg, hydrogeologi och sprickzoner (Andersson, 2007). De parametrar nämnda nedan mäts under borringen och kallas för MWD-parametrar (measure while drilling) (Geotrained, Intelligent Energy Europe, 2011).

Vid insamling av stickprover avstannas neddriften i 10 – 30 sekunder för enbart spolning, detta utförs huvudsakligen med borrhörtekniker som använder vatten eller mud som spolmedel. Detta gör man för att rensa ut material från ovanliggandes lager ur borrhålet och för att ta reda på hur lång tid det tar för kaxet att transporteras från botten av hålet till markytan. Stickproverna blir alltid något kontaminerade av spolmedlet, speciellt om mud används som spolmedel (Andersson, 2007). Vidare kan gravitationsstyrd sortering ske under upptransporten vid vätska som spolmedel. När luft används som spolmedel varierar insamlingen om borringen utförs över eller under grundvattenytan. Dock anser Andersson (2003) att den sortering som sker vid

transport av borrhörtekniken med luft är så pass liten att den kan förbises även för borring under grundvattenytan. För att bedöma kornstorleken i ett lager kan borrhörtekniken användas och även rotationshastigheten, vikt på borrhörtekniken, rotationsmotståndet, spolmediets flödeshastighet och tryckluftens arbetstryck (mätt i bar) beroende på den använda borrhörtekniken. Genom att kombinera data från stickprover och borrhörteknik kan många geologiska parametrarna definieras (Andersson, 2007).

För att få information om de hydrogeologiska egenskaperna vid borringar som använder luft som spolmedel mäts vatteninflödet vid olika djup genom att fylla en hink med given volym över tid (l/min) under en stoppad neddrift. Detta kallas **blåskapacitetstest**. Vattnets konduktivitet och temperatur kan då också mätas.

Provboringar som utförs med vatten som spolmedel ger indirekt information om hydrogeologin. Förlust av vatten tyder på permeabla lager. Dock är mängden svår att uppskatta (Andersson, 2007). Provboringar kan utföras med olika borrhörtekniker, bland annat med de som beskrivs nedan.

### 5.1.2 Borrhörtekniker

I Sverige används huvudsakligen tryckluftdriven hammarborring som borrhörteknik, men även vattendriven hammarborring. Olika borrhörtekniker har olika fördelar och används under olika geologiska förutsättningar. I förekommande fall kan även rotationsborring användas. Figur 4 visar en typisk borrhörteknik av modellen Nemek 407 TS och en kompressor från Atlas Copco 607 XRXS för tryckluftdriven hammarborring.

#### 5.1.2.1 Hammarborring

Hammarborring är således den vanligast förekommande borrhörtekniken i Sverige. Borringen använder sig av både slag och rotation och är lämplig i hårda bergarter (Barth, 2014). Normalt används luft som spolmedel men systemet kan även använda vatten (Nord, 2007). Hammarborring kan utföras både med så kallade topphammare och sänkhammare (Down The hole Hammer, DTH). Skillnaden på de två olika hammarborringsmetoderna är att vid användning av topphammare är hammaren hela tiden i kontakt med masten på borrhörtekniken och överför slagenergin till kronan via borrhörteknikerna. Med denna teknik sker således energiöverföringen till borrhörteknikerna utanför borrhålet. När sänkhammarborring (DTH) används är hammaren monterad i botten av borrhålet, direkt ovanpå kronan varvid energiöverföringen sker direkt vid borrhörtekniken (Perman, 2011). Figur 5 visar en DTH-hammare från Atlas Copco. Traditionellt används tryckluft som drivmedel för DTH från en kompressor som håller ett arbetstryck på ca 30-35 bar, vilket ger en penetrations-

hastighet i granit och gnejs på mellan 0.5 och 1.0 m/minut. Hål upp till 300 m djup per dag kan produceras. Tekniken kan vara begränsad av geologin i området. Instabila och/eller vattenförande sprickzoner begränsar metodens nedträngningsdjup. Instabila sprickzoner kan orsaka stabilitetsproblem i borrhålsväggen, vilket i sin tur kan orsaka problem när kollektorn i ett geoenergisystem ska installeras. Sprickzoner kan också öppnas något på grund av tryckluften och då termisk sammankoppla eller skada närliggande borrhål, vilket kan ha förödande effekter på ett slutet geoenergisystem.



Fig. 4. En borrhigg och kompressor från Malmbergs. Fotograf: M. Larsson 2014, Trelleborg.

Tekniken är inte heller fördelaktig i sedimentära avlagringar, speciellt om ett löst lager finns mellan två konsoliderade lager. Det lösa lagret kommer att producera material ut i borrhålet på grund av att borrhålet är under lägre tryck än det lösa lagret.

En stor fördel med hammarborrning är att borrhålen kan vinklas, vilket innebär att borrhålen kan utföras på en mycket liten yta och ändå på djupet vara spridda ifrån varandra. Dock måste placeringen på djupet räknas med att hål borrade med sänkhammarborrning kan avvika från den planerade borrlinjen. (Geotrained, Intelligent Energy Europe, 2011). Det finns dock tekniska hjälpmedel för att förbättra precisionen.

### 5.1.2.2 Wassara-teknik

Wassara-teknik är relativt ny vattendriven hammarborrning med DTH, utvecklad av LKAB under 90-talet. Fördel med att använda wassara-tekniken är att det hydrostatiska övertrycket som vattendrivningen producerar (150-200 bar) stabiliserar borrhålsväggarna och på så sätt förhindras inras. Metoden användes till en början i gruvbranschen för att producera spränghål och kan ha en något högre borrsjunkhastighet än traditionell hammarborrning. Det är dock något dyrare och vattnet som används som drivmedium måste vara rent (Geotrained, Intelligent Energy Europe, 2011). Enligt LKAB, som har utvecklat systemet, kan det borras

både rakare och djupare med tekniken än med traditionell hammarborrning (Nordberg, 2014).

### 5.1.2.3 Rotationsborrning

Rotationsborrning är en borrhållsteknik som mest är kopplad till oljeindustrin, men rotationsborrning används idag även till både vattenuttagsbrunnar och energibrunnar. Metoden är mest lämpad för borring i sedimentära lösa avlagringar. Den krona som används under rotationsborrning är en "trehuvad rull-borrkrona" (Fig. 6) för att bryta loss och krossa materialet, men flera typer av borrkronor finns, anpassade för olika typer av geologi. Transport av borrkaxet från botten på hålet till ytan sker genom spolning med vatten. Behövs stabilisering av borrhålsvägg eller hjälp med att lyfta kaxet, kan olika typer av mud tillsättas. Genom tillsats av bentonit eller en organisk polymer (CMC) ökar



Figur 5. En DTH-hammare (Down The Hole) från Atlas Copco. Källa: Atlascopco.se (2014).

spolmedlets densitet och därmed även transportförmågan av borrkaxet. Ökad stabilitet av borrhålsväggarna uppnås också på detta sätt. Om hålet ska användas för att pumpa grundvatten är CMC att föredra då det är nedbrytbart. Rotationsborrning i kristallint och hårt berg är olämpligt och går långsamt (Geotrained, Intelligent Energy Europe, 2011).

## 5.2 Undersökningar i borrhål

### 5.2.1 Pumptest

När provbrunnen är färdigborrad kan ett pumptest utföras för att undersöka akvifärens hydrauliska egenskaper. Vid ett pumptest monteras en pump i borrhålet. Flödet av upp-pumpat vatten (l/s) mäts samtidigt som avsänkningen i brunnen mäts, och eventuellt i närliggande observationsrör. Detta pågår tills jämvikt i akvifären uppstått och ingen förändring över tid längre registreras. Efter avslutad pumpning kan även återhämtningen registreras. Enligt Andersson (2003) kan, med hjälp av akvifärens geometri, markens hydrauliska egenskaper bestämmas. På det uppfodrade vattnet bör temperatur, pH och konduktivitet mätas. Ett flertal vattenprover bör tas vid olika tidpunkter på kontrollprogrammet. Från vattenproverna erhålls vattenkemiska parametrar. En kortvarig pumpning, så kallad **kapacitetstest** begränsar inform-

ationen till området runt brunnen och utförs på ett par timmar. De mer omfattande pumptesten tar flera dagar att genomföra och används för att definiera akvifers gränser (Andersson, 2003).



Fig. 6. Rotationsborrkrona avsedd för lösa sediment från Atlas Copco. Andra typer av rotationsborrkroner används vid olika typer av geologier. Källa: Atlascopco.se (2014).

### 5.2.2 Termisk responstest

Termisk responstest används för att avgöra markens termiska egenskaper på plats. Hög värmeledningsförmåga innebär att värmen transporteras snabbt i markmediet. Testet utförs genom att testtriggen kopplas till borrhålet och dess kollektor (som senare ska användas till geoenergisystemet). Köldbäraren i kollektorn cirkuleras genom borrhålet och responstestutrustningen med ett konstant flöde medan det tillförs en konstant effekt, vanligen en värmeeffekt med hjälp av en genomströmningsberedare. Köldbäraren överför värmen till markmediet under en bestämd tidsperiod. Responstest utförs under minst 50 timmar, vanligen 60-70 timmar. Det är viktigt att testet fortgår länge nog för att värmen eller kylan ska spridas tillräckligt långt in i formationen, annars visas de termiska egenskaperna för de material som eventuellt har använts för att stabilisera borrhålet (Andersson, 2003). Under testperioden registreras köldbärarens ingående och utgående temperatur från borrhålet. Borrhålets termiska egenskaper beräknas utifrån hur snabbt temperaturen ändras i köldbäraren över testperioden. Från testet beräknas markens effektiva värmeledningsförmåga för hela borrhålsprofilen, och man kan även beräkna kollektorns borrhålsmotstånd. Borrhålsmotståndet är ett mått på den sammanlagda temperaturförlusten mellan köldbärare och borrhålsvägg vid en viss effektlast (Gehlin, 2002).

Termisk responstest är ett effektivt sätt att utreda markens effektiva värmeledningsförmåga på plats. Fördelen med att bestämma den effektiva värmeledningsförmågan genom en termisk responstest är att markens egenskaper mäts för hela borrhålsdjupet under dess naturliga förhållanden, under tryck och med vatten närvarande i porutrymmen och sprickor. Vid laboratorietest av prover från området sker det förändringar från de naturliga förhållandena som påverkar värmeledningsför-

mågan i provmaterialet (Sundberg, 1988).

Termisk responstest är framför allt användbart för slutna system och är ett viktigt verktyg för dimensionering av systemet, till exempel för att bestämma det mest effektiva avståndet mellan borrhålen, antal borrhål och borrhålsdjup. Med flera termiska responstest i olika hål går det även att få en uppfattning om lokala variationer i markens termiska egenskaper.

Det är viktigt att borrhålet lämnas ostört i minst 3 - 5 dagar efter uppborrning innan termisk responstest utförs. På så sätt har den genomborrade formationen hunnit återhämta sig efter den energi som tillförts under själva borringen, till exempel genom friktionsvärmeförsel. Termisk responstest kan även ge värdefull information om eventuell påverkan från grundvattenflöde kring borrhålet (Gehlin, 2002).

### 5.2.3 Borrhålsloggning

Vid borrhålsloggning finns det ett antal olika metoder för undersökning av markens egenskaper. Bland annat kan mätningar av de geofysiska parametrar som beskrivs i avsnittet "Geofysiska undersökningsmetoder" nedan, utföras från ett borrhål. Vid borrhålsloggning skickas ett mätinstrument ner i borrhålet, varför det är viktigt att borrhålsväggen är stabil. För att utreda kornstorleksfördelning, litologi, formations vätska, sprickzoner och borrhålsväggens utformning kan gamma ray, resistivitet och caliper loggar utföras. Metoderna bör inte användas enskilt då de kompletterar varandra. Borrhålsloggningsmetoder har en varierande relevans i samband med geoenergiprojekt. Då metoderna har en begränsad horisontell utbredning från borrhålet ger metoderna en liknande punktinformation som en undersökningsbrunn. Det går dock att korrelera loggar från olika borrhål med varandra för att skapa en modell över geologin mellan borrhålen. Korrelerade loggar används för att få en uppfattning om sprickzoner i området. Sprickzoner i området påverkar dimensioneringen av systemet speciellt om de är vattenbärande, då detta påverkar markens termiska egenskaper. Borrhålsväggens utformning kan skapa problem om svällande leror eller inras har förminskat borrhålet så att kollektorn ej kan installeras. Litologin påverkar markens termiska egenskaper, vilket är viktigt för dimensionering av systemet.

#### 5.2.3.1 Gamma ray-teknik

Vid användning av gamma ray-teknik mäts naturligt förekommande radioaktiva isotoper i den genomborrade lagerföljden. Mängden radioaktiva isotoper är i regel kopplat till litologin. Dock krävs jämförelsedata från samma område för att kunna koppla funna värden

till en viss bergart. Gamma ray-mätningar ger vanligen höga värden i finkorniga sediment där de radioaktiva isotoperna har tendens till att anrikas. Ett högre lerinnehåll i en formation ger således högre värden än en ren sandformation. Detta kan användas för att korrelera geologiska enheter med varandra (Keys, 1997).

### 5.2.3.2 Resistivitet

Resistivetsmätningar bygger på samma princip som den geofysiska markundersökningsmetod som beskrivs mer utförligt i avsnittet "Geofysiska undersökningsmetoder" nedan. Vid borrhålsloggning används metoden dock horisontellt ut från ett borrhål. Mätningar med resistivetsloggning utreder formationsvätska och till viss del litologi och är ett bra verktyg tillsammans med gamma ray-tekniken (Keys, 1997).

### 5.2.3.3 Caliper

Caliper är en mekanisk undersökningsmetod som utreder borrhålets storlek och form. Fjädrar trycks mot borrhålsväggen och sänder information om borrhålsväggens utformning till mätinstrumentet. Eventuella hålrum och svällande leror detekteras lätt med caliper (Andersson, 2003). Caliper är ett mycket användbart mätinstrument tillsammans med andra loggningsmetoder. Till exempel ger caliper bra indikationer om kornstorleksfördelning tillsammans med gamma ray-tekniken. Borrhålets utformning är viktigt att veta då inras eller svällande leror kan skada borrhålet till den grad att kollektorn i geoenergisystemet inte går att föra ner i hålet.

## 5.3 Geofysiska undersökningsmetoder

Geofysiska undersökningsmetoder är ett samlingsbegrepp för flera metoder som alla innebär att undersökning sker genom att mäta markens fysikaliska egenskaper från markytan. Metoderna är således icke-förstörande. Det är ofta en fördel att göra inledande översiktliga geofysiska undersökningar så att man i ett senare borrskede lokaliserar borrhåll till optimal plats. Till skillnad från undersökningsborring ger geofysiska undersökningar en mer översiktlig information om hur den allmänna geologin i området ser ut. Samtidigt bör klargöras att undersökningsborringar normalt måste utföras för att jämföra och tolka de geofysiska mätdata som erhålls. Informationen från geofysiska undersökningar och undersökningsborringar kan sedan tillsammans utnyttjas för skapa en bild av geologin inom undersökningsområdet.

### 5.3.1 Seismik

Seismik mäter markvibrationer genererade artificiellt genom till exempel sprängladdningar eller slag. Vibrationer sprider sig i alla riktningar från källan och

känsliga mätinstrument placerade på marken (geofoner) plockar upp de seismiska vågorna och vågornas hastighet registreras (Fig. 7). Avståndet mellan varje geofon och vibrationskälla mäts och tiden det tar för vågorna att färdas från källan till geofonen noteras. Hastigheten varierar med lagrens fysiska egenskaper; i hårdare lager har de seismiska vågorna en hög hastighet och i lösare porösa lager har vågorna en lägre hastighet (Earthsciences.hku.hk, 2014).

Det finns två principiellt olika seismiska undersökningsmetoder, (i) reflektionsseismik och (ii) refraktionsseismik.

**Reflektionsseismik** bygger på att de reflekterade vågorna från olika gränssytor registreras. Gränssytor upp till flera kilometers djup kan detekteras. Sprickplan kan i vissa fall också detekteras. **Refraktionsseismik** använder sig av de vågor som brutits i lager med olika fysiska egenskaper (Fig. 8). Refraktionsseismik kan inte tillämpas på lika stora djup som reflektionsseismik. Endast 4 -5 gränssytor kan detekteras och tekniken kräver ökande seismisk hastighet nedåt för vare lager. Refraktionsseismik används ofta inom byggnadsgeologiska och hydrogeologiska undersökningar för att utreda djup till berg, bergkvalitet, vattenförande vertikala sprickzoner och vid vissa tillfällen vattenmätade lagrets mäktighet i till exempel isälvsavlagringar (Jeppsson, 2014).

### 5.3.2 Geoelektrik

Geoelektriska undersökningar är en grupp geofysiska undersökningsmetoder som innefattar tre olika metoder för att mäta markens elektriska egenskaper, (i) resistivetsmätning, (ii) IP-mätning och (iii) SP-mätning. I denna rapport har jag valt att utvärdera re-

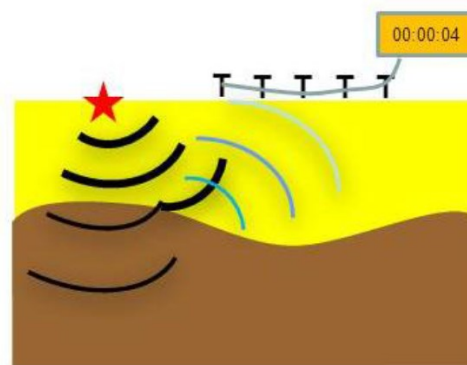


Fig. 7. Vid seismiska mätningar genereras vågor ner i marken som sedan refrakteras eller reflekteras mot gränssytor med andra fysiska egenskaper. De refrakterade, alternativt reflekterade vågorna registreras sedan av geofoner (Jeppsson, 2014).

resistivetsmätning. Vid resistivetsmätning mäts markens motstånd till ledning av elektrisk ström; en ström med känd strömstyrka leds ner i marken via två strömelektroder och spänningen mäts över två potentialelektroder. Markens resistivitet kan sedan räknas ut. Markens resistivitet påverkas av egenskaper som porositet, porfyllnadsgrad och porvätskans kemiska sammansättning (till exempel ger hög salt-halt i porvätskan en lägre resistivitet), mineralsammansättning och mineralstruktur. Detta ger i regel höga resistivetsvärden i kristallint berg och låga i vattenförande sediment. I lager med låg porositet påverkas resistiviteten av den mineralogiska sammansättningen; i regel är det mycket höga resistivetsvärden i dessa lager då de vanligt förekommande mineralen (kvarts och glimmer) har dålig elektrisk ledningsförmåga. Vid förekomst av pyrit eller magnetit ger dessa lägre resistivetsvärden. Temperatur är också en faktor; höga temperaturer leder till lägre resistivitet och låga temperaturer till hög resistivitet beroende på jonernas minskande förmåga att

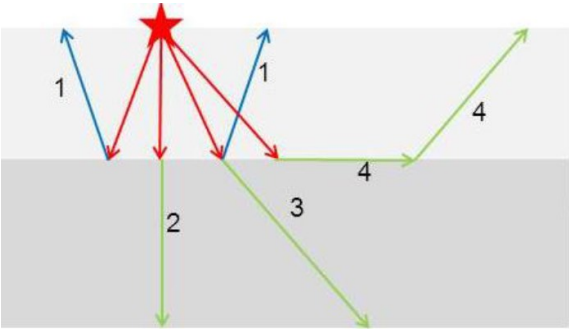


Fig. 8. Vid seismiska mätningar kan utsända seismiska vågor (röda pilar) dels reflekteras enligt pilarna markerade med (1), dels refrakteras (pil markerad med (3)). En del av den utsända ljudvågen fortsätter således ner i underliggande geologiskt lager som en refrakterad våg eller färdas längst med den geologiska gränsen (4), för att sedan gå mot markytan (kritisk refraktion). Vågor som möter en geologisk gräns i 90°vinkel passerar rakt genom gränsytan utan brytning (2). (Jeppsson, 2014).

förflytta sig vid sjunkande temperatur (Jeppsson & Dahlin, 2014). Metodens nedträngningsdjup varierar med avståndet mellan elektroderna, markförhållandena och elektrodernas konfiguration. Ett större avstånd mellan elektroderna ger djupare nedträngning. Överslagsmässigt kan nedträngningsdjupet anges som 1/3 - 1/5 av avståndet mellan strömelektroderna (GeoVista, 2014). Med hjälp av resistivetsmätningar kan djup till berg, tjocklek på ler- och silt-lager, grundvattenytans läge och hydrogeologin i området översiktligt uppskattas. Problem kan uppstå vid stora kontraster på den elektriska ledningsförmågan i underjorden och i stadsmiljö där begränsad plats kan ge

metoden ett begränsat nedträngningsdjup.

### 5.3.3 EM-metoder

EM-metoder använder elektromagnetiska vågor som sänds ut från en "radiosändare". Dessa tränger ner i marken där de påverkas av lager med olika elektromagnetiska egenskaper. När de elektromagnetiska vågorna träffar geologiska lagergränser uppstår en sekundär radiovåg med avvikande egenskaper från den primära radiovågen. Den sekundära radiovågen registreras av olika typer av mottagningsutrustning och jämförs med den primära radiovågen och markens elektromagnetiska egenskaper kan bestämmas. Konduktiva kroppar i underjorden detekteras på ett snabbt och billigt sätt och ingen kontakt med markytan behövs. Nedträngningsdjupet är något begränsat, speciellt i högt konduktiva jordlager (till exempel lera) och metoden är även känslig för störningar från elektriska installationer, vilket gör den svår använd i stadsmiljö.

Slingram är en typ av EM-metod som använder sig av en artificiell källa som sänder ut radiovågor periodiskt. Källan består av en ram som är sammanlänkad med mottagaren via en 10- 100 meter lång kabel (Fig. 9). Metoden är känslig för högt konduktiva lager och utvecklad i första hand för malmprospektering, men fungerar också utmärkt för att lokalisera vattenförande sprickzoner. Då metoden kartlägger både horisontella men framförallt vertikala enheter med avvikande konduktivitet lämpar sig metoden bäst för att kartlägga vattenledande sprickzoner, men även bergartsgränser kan detekteras när det nya mediet (bergarten) har annan elektrisk ledningsförmåga. Vid användning av slingram är nedträngningsdjupet begränsat till cirka halva ramavståndet. I mark med låg konduktivitet är djupnedträngningen mindre än i marker med hög konduktivitet (Jeppsson, 2014).

Georadar använder en reflektionsteknik där elektromagnetisk puls sänds ut från en källa. Pulsen reflekteras delvis tillbaka vid lagergränser samtidigt som en del av pulsen fortsätter ner och reflekteras tillbaka från djupare lagergränser. En del av vågen reflekteras tillbaka upp med försvagad styrka medan en del av vågen fortsätter neråt. För varje nytt medium vågen påträffar så reflekteras en del tillbaka upp och vågen försvagas ytterligare. Detta gör att metoden har ett begränsat undersökningsdjup, vilket dock varierar med utsänd frekvens på den elektromagnetiska pulsen och markens elektriska ledningsförmåga. För att maximera nedträngningsdjupet bör låga frekvenser användas och det är fördelaktigt med material med hög resistivitet. Metoden fungerar ej vid lera i marken och utreder djup till berg, geologiska strukturer och material (Jeppsson, 2014).

## 6 Resultat

inte blir relevant i förhållande till pris för geoenergisytem. Om det finns andra aktörer som utför caliperloggning enbart, eller i kombination med gamma ray- och resistivetsloggar, är ej undersökt.

De geofysiska metoderna som är utvärderade i Tabell 3

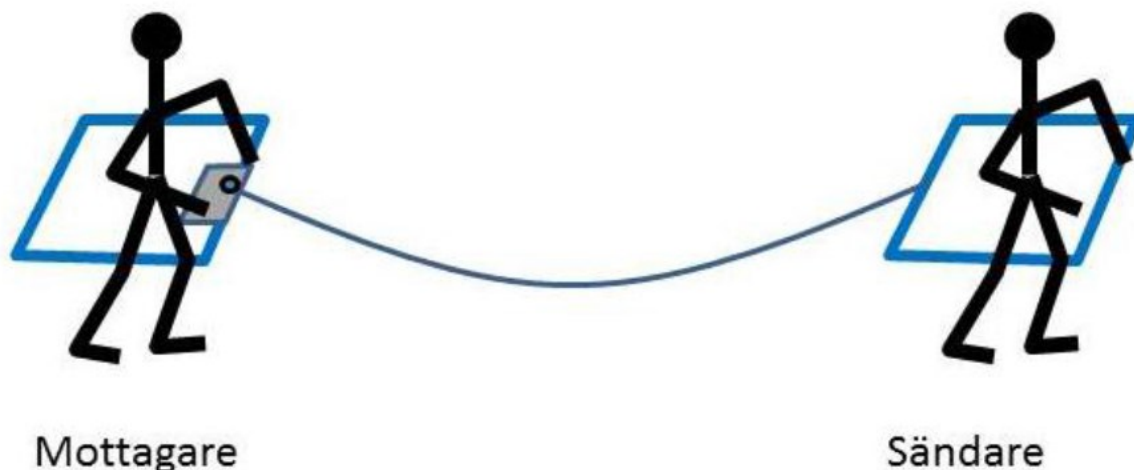


Fig. 9. Vid användning av slingram behövs en sändare som är kopplad till en mottagare så som bilden illustrerar. Radiovågor sänds ut av sändaren och registreras av mottagaren (Jeppsson, 2014).

Nedan följer en sammanfattning av de olika undersökningsmetoderna som beskrivits i denna rapport (Tabell 1 – 3) och deras kostnadsbild och användning. Det är komplicerat att jämföra priser mellan olika metoder och faktorer. Till exempel kan en undersökningsbrunn användas senare i själva geoenergianläggningen och kan därigenom ses som en investering som inte belastar förundersökningskostnaderna, medan geofysiska undersökningar, som dock är billigare, tillkommer som extra kostnad på projektet. De prisuppgifter som är presenterade här är en grov uppskattning av kostnader för de olika metoderna. Priserna är beroende av geografiskt läge för projektet, tillgänglighet, terräng, etc. Prisuppgifterna är inhämtade från entreprenörer och konsulter runt om i Sverige. De företag som har bidragit till dessa uppgifter hålls av konkurrensskäl anonyma i detta arbete.

De tester som görs i samband med en undersökningsborrning ger extra kostnader för borrningen. Stickprover kostar runt 680 kr extra per meter. Blåskapacitetstest kostar extra i den mån det tar längre tid att stanna och utföra testet, ~ 2700 kr/h. Att mäta borrhjunktning kräver extra utrustning på borrhjungen; en extrautrustad borrhjunktning kostar 3000 kr/dag mer än andra riggtyper. Borrhjunktningen kör oftast flera loggar samtidigt. Att caliper inte är med i Tabell 2 beror på att den i det här läget inte är relevant att jämföra med de andra metoderna då företaget som utför borrhjunktning endast använder caliperloggen i kombination med neutron- och densityloggar. Detta gör att caliperloggen

nedan har tydliga både fördelar och begränsningar. Vad de metoderna har gemensamt är att de kräver erfarenhet för att bra tolkningar av mätresultaten ska kunna göras. De dyrare metoderna kan ge väldigt bra information om området, men även där finns uppenbara svagheter som

Tabell 1. Sammanfattande tabell som beskriver pris (kr/m) för undersökningsborrning samt styrkor och svagheter.

Metod	Pris kr/m	Styrka	Svaghet
Undersökningsborrning	Rördrivning ~ 600 - 1000 Öppet hål ~ 200	Kan användas som energibrunn	Punktinformation

gör dem mindre lämpliga inom geoenergiprojekt. Seismiska undersökningar kräver till exempel ökande seismisk hastighet för varje lager och endast 4 - 5 olika gränssytor kan detekteras. Metoden är platskrävande och användning i stadsmiljö ger lätt bakgrundsstörningar. Utöver detta minskar även upplösningen med djupet. Det är dock en bra metod i heterogen berggrund där information om sprickor och hydrogeologi behövs.

Med resistivetsmätning finns det klara fördelar då denna metod har ett stort nedträngningsdjup och inga direkta geologiska begränsningar. Det finns dock även nackdelar; resistivetsmätning fungerar dåligt vid frusen mark och störs av metallobjekt i marken. Mätningarna ger information om lagergränser och sprickzoner och konkurrerar klart med seismiska mätningar. Då metoden är något billigare än seismik är den att föredra när omständigheterna tillåter det.

Tabell 2. Sammanfattning av de undersökningsmetoder som utförs i ett borrhål utifrån tid för utförandet och pris (Kr).

Metod	Tid för utförande	~Pris (Kr)
Pumptest	2 v test	30 000 - 60 000
Kapacitetstest	2 h test	8 000
Termisk responstest	50 - 70 h	35 000 - 50 000
Borrhålsloggning, gamma ray + resistivitet	~ 8 - 10 min / meter	1 hål till ca 300 m ~15 000

Georadar och slingram är betydligt billigare metoder i jämförelse med resistivitet och seismik, dock gör deras begränsade nedträngningsdjup och geologiska begränsningar att deras relevans för geoenergiprojekt kan ifrågasättas (vidare resonemang om detta görs under rubriken "Diskussion").

att utföra undersökningarna. Som Andersson (2003) beskriver är behovet av förundersökningar för ett litet till medelstort slutet system ofta relativt litet. För större slutna system är det dock alltid bra att utreda de geologiska förutsättningarna och markens värmeledningsförmåga för att undvika över- eller underdimensionering av systemet. En förundersökning ger även information om det råder omständigheter som kan leda till problem under borrningen, vilket kan leda till onödiga extra kostnader för utförandet av systemet.

## 7 Diskussion

Förundersökningar som är av relevans för slutna system är tätt kopplade till när det är ekonomiskt lönsamt

Ett undersökningsprogram ser rimligtvis olika ut beroende på var en anläggning ska uppföras, hur stor den ska vara, vilken typ av geologi som förväntas, hur mycket av den geologiska informationen som kan fås från geologiska och hydrogeologiska kartor samt från

Tabell 3. Sammanfattning av de geofysiska undersökningsmetoderna utifrån pris (Kr), styrka och svaghet.

Metod	Pris kr/m ink allt	Styrka	Svaghet
Refraktionsseismik	~ 150 - 200	Utredar; Stratigrafi, hydrogeologi, djup till berg, bergkvalitet och sprickzoner	Kräver dynamit för god signal
Resistivitet	~ 45 - 125	Inga geologiska begränsningar	Platskrävande, fungerar dåligt vid frusen mark och störs av metallobjekt i jorden
Georadar	~ 6 - 10	Snabb metod	Fungerar ej vid lera i marken, begränsat nedträngningsdjup till 30 - 50 m, dålig upplösning efter 10 m
Slingram	~ 10 - 15	Vattenledande sprickor	Kräver annan elektrisk ledningsförmåga i berget för detektion.



brunnsarkivet och hur tillförlitlig den informationen förmodas vara. Fyra scenarier beskrivs nedan och därefter följer förslag på möjliga tillvägagångssätt gällande undersökningar för de olika scenarierna. Samtliga scenarier gäller för större slutna system där systemens önskade effekt redan är bestämd. De tillvägagångssätt som beskrivs för de olika scenarierna är endast förslag på möjliga tillvägagångssätt utifrån de undersökningsmetoder som är beskrivna i detta arbete.

1. Förmodat djup genom lösa jordlager ner till berg mer än 10 m, därefter kristallin berggrund. Brunnar finns i närområdet och likaså geologiska och hydrogeologiska kartor.

Tillvägagångssätt: Efter utvärdering av närliggande brunnar samt av geologiska och hydrogeologiska kartor utförs en undersökningsborrning där stickprover och blåskapacitetstest utförs för att bekräfta den information som inhämtats från närliggande brunnar och kartmaterial. Vid huvudsakligen relativt fast, ej uppsprucken kristallin berggrund utförs undersökningsborrningen med DTH hammarborrning med luft som spolmedium. Om geologin och hydrogeologin ser ut som förväntat utförs en termisk responstest för att optimera resterande delen av anläggningen. Om problem med inras av lösa sediment infunnit sig under undersökningsborrningen kan wassara-tekniken övervägas för resterande brunnar i systemet.

2. Förmodat djup genom lösa jordlager ner till berg mer än 10 m, därefter kristallin berggrund. Brunnar saknas i närområdet, men det finns tillgång till geologiska och hydrogeologiska kartor.

Tillvägagångssätt: Om de geologiska kartorna indikerar en sprickfri och relativt homogen berggrund kan en undersökningsbrunn ge information om vattenmängd vid olika nivåer, lagerföljd ner till fast berg samt djup till fast berg. Om fast berg inte detekteras i de översta 30 metrarna och stora vattenmängder finns tillgängliga i jordlagret kan vidare undersökningar för eventuellt öppet system genomföras, annars fortgår utförandet som beskrivet i scenario nr 1.

3. Osäkert jorddjup som kan variera med flera meter över en kort sträcka, därefter följer kristallin berggrund som förmodas vara genomkorsad av kraftiga sprickzoner. Brunnar finns i närområdet och likaså geologiska och hydrogeologiska kartor.

Tillvägagångssätt: Efter undersökning av närliggande brunnar och kartmaterial kan resistivitetmätning användas för att utreda var sprickzoner går och hur dessa kan tänkas påverka det planerade området. Metoden

utredar stratigrafi, hydrogeologi och sprickor. Även seismik kan användas, men detta är ett dyrare val. Efter genomförd undersökning sammanställs data och en geologisk modell kan produceras, varefter undersökningsborrningar utförs för att bekräfta modellen. I undersökningsbrunnarna är det lämpligt att utföra minst två termiska responstester. Detta görs för att de termiska egenskaperna i marken kan variera beroende på hur sprickorna går och om de är vattenförande. Wassara-tekniken är en lämplig borrhållsteknik i områden där det är stor risk att borra i sprickrikt berg.

4. Osäkert jorddjup som följs av en osäker geologi bestående av sedimentär berggrund av olika typ. Brunnar finns i närområdet och likaså geologiska och hydrogeologiska kartor.

Tillvägagångssätt: Utvärdera kartmaterial och brunnar i området, begär ut borrhållsprotokoll, kontakta entreprenörer med borrhållserfarenhet från området samt genomför platsundersökning i fält. Om ingen lera påträffas kan georadarundersökning påvisa ungefärligt jorddjup, bergkontakt, förekomst av sprickor, samt vattenförekomst. Georadaundersökning har förutsättning av dattainsamling för de översta 35 metrarna. Om det finns lera i området bör slingram övervägas, då georadar utgår i ett sådant läge. Metoden är bra för att utreda sprickzoner och om dessa är vattenförande och även djup till berg kan detekteras. Undersökningsborrningar används för att bekräfta en geologisk modell. Undersökningsbrunnarna kan användas för borrhållsloggning för att vidare korrelera lager med varandra för att få bättre information om kornstorleksfördelning, sprickzoner och vattenförekomster på större djup. Då sedimentär berggrund är bekräftat bör rotationsborrning övervägas. Metoden är snabb i sedimentär berggrund och bibehåller tryck i borrhålet under borringen, vilket förhindrar eventuella inras från ostabila lager. Termisk responstest kan utföras på utvalda brunnar för att optimera dimensioneringen av systemet.

Då inte alla de utvärderade undersökningsmetoderna tillämpas i de fyra scenarierna ovan betyder detta inte att användning av metoderna helt ska uteslutas. Verkliga scenarier kan vara långt mer komplicerade, med förutsättningar som gör andra geofysiska undersökningsmetoder lämpliga. Relevansen av propumpning för slutna system kan diskuteras då den information om de hydrogeologiska förutsättningarna som är av vikt för slutna geoenergisystem kan utredas billigare genom blåskapacitetstest under undersökningsborrning.

## 8 Slutsatser

Ett standardiserat tillvägagångssätt att använda inför varje geoenergiprojekt, för att undvika möjliga utförandeproblem och för att kunna optimera dimensioneringen av det valda geoenergisystemet, hade varit önskvärt. Det är dock svåruppnåeligt då olika geologiska miljöer ger olika förutsättningar för undersökningsmetodernas lämplighet. Tillgänglig information från olika områden har också en stor variationsgrad.

Undersökningsmetoder som ger data för upprättande av en geologisk modell över området är bra i områden med mer komplicerad geologi eftersom en enstaka undersökningsbrunn enbart ger punktinformation. I ett område med känd och mer homogen geologi är en undersökningsborrning och termisk responstest normalt sett tillräckligt för att all nödvändig information för dimensionering av systemet ska erhållas. Även geofysiska markundersökningar är lämpliga att överväga i denna typ av område; dock bör de modeller som produceras med utgångspunkt från geofysiska undersökningsmetoder bekräftas med borrhål. I områden med stort varierande geologi bör flera termiska responstest utföras för att kartlägga de varierande termiska egenskaperna i marken, speciellt för att få en bättre dimensionering av systemet. Termisk responstest bör alltid utföras för större slutna geoenergisystem.

Förslag på vidare utveckling av det här arbetet är att utreda vilka förundersökningar som är lämpliga för större öppna system.

För att få en helhetssyn på kostnader och miljöpåverkan av att utföra en geoenergianläggning, och för att kunna jämföra kostnader med andra energisystem, kan LCC (livscykelkostnad) och LCA (livscykelanalys) utföras. Sådana ger en uppfattning om en anläggnings totalkostnad, d.v.s. inklusive drift och underhåll, och inte bara investeringskostnader. I detta sammanhang får man även en bra uppfattning om hur stor del av ett projekt som en eventuell förundersökning utgör.

## 9 Referenser

- Atlascopco.se, 2014. Tillgänglig på: [http://www.atlascopco.se/sesv/news/productnews/cop\\_44\\_gold\\_---\\_20090909\\_14\\_03.aspx](http://www.atlascopco.se/sesv/news/productnews/cop_44_gold_---_20090909_14_03.aspx) [Hämtad 31 Dec. 2014].
- Andersson, B. 2003. *Geodata collection for utes applications by the use of test drilling*. lic.-avh. Lund Universitet. 102 pp.
- Andersson, O. 2007. Geo-documentation for test wells. Section D: Specific Items for Ground water Applications. Presentation 07 Drillers. Lunds universitet. Sweco.
- Barth, J. 2014. *Borrkurs 2014*. Brunnsteknik. Den vanliga bergborran. Undervisningsmaterial. Lunds universitet, Lund.
- Barth, J., Andersson, O., Nordell, B., Hellström, G., Berg, M., Gehlin, S., Frank, H., Risberg, G. & Nowacki, J.-E. 2012. *Geoenergin i samhället: en viktig del i en hållbar energiförsörjning: 2012*. Lund: Geotec
- Earthsciences.hku.hk, 2014. The University of Hong Kong - Department of Earth Sciences. Tillgänglig på: <http://www.earthsciences.hku.hk/> [Hämtad 29 Dec. 2014].
- Gehlin, S. 2002. *Thermal Response Test*. Ph.D. thesis, Luleå universitet, Luleå. 1 - 43 pp.
- Geotrained, Intelligent Energy Europe, 2011. Geotrained training manual for drillers of shallow geothermal systems. Geo-Education for a sustainable geothermal heating and cooling market. Brussels: Geotrained. Tillgänglig på: [http://www.geotrained.eu/moodle/file.php/1/Didactic\\_Materials/Drillers%20Manual%20Final%20V2%2010.11.pdf](http://www.geotrained.eu/moodle/file.php/1/Didactic_Materials/Drillers%20Manual%20Final%20V2%2010.11.pdf) [Hämtad 28 Dec. 2014]. Kap 6-8.
- GeoVista, 2014. Resistivitet • GeoVista. Tillgänglig på: <http://www.geovista.se/metoder/resistivitet/> [Hämtad 29 Dec. 2014].
- Jeppsson, H. 2014. *Elektromagnetiska metoder*. Kompendium i Geofysisk undersökningsmetodik. Lunds universitet, Lund. 122 pp.
- Jeppsson, H. 2014. *Seismiska metoder*. Kompendium i Geofysisk undersökningsmetodik. Lunds universitet, Lund. 146 pp.
- Jeppsson, H. & Dahlin, T. 2014. *Geoelektriska metoder*. Kompendium i Geofysiska undersökningsmetoder. Lunds universitet, Lund. 70 pp.
- Keys, W. S. 1997. *A practical guide to borehole geophysics in environmental investigations*. Boca Raton: CRC Press. 176 pp.
- Nord, G. 2007. Borrning av djupa och vida hål. Seminarium IVA. Tillgänglig på: <http://www.karnavfallsradet.se/sites/default/files/dokument/seminarier/165.pdf> [Hämtad 20 Dec. 2014].
- Nordberg, S. 2014. Raka rör med vattendriven borrning. NyTeknik. Tillgänglig på: <http://www.nyteknik.se/nyheter/automation/verkstadsautomation/article3576189.ece> [Hämtad 28 Dec. 2014].
- Peekab.nu, 2014. Tillgänglig på: [http://peekab.nu/img/sidebar/bergvarme\\_b.jpg](http://peekab.nu/img/sidebar/bergvarme_b.jpg) [Hämtad 31 Dec. 2014].
- Perman, M. 2011. *Borr- och arbetsmetoder vid instrumentering av fyllningsdammar*. M.Sc. thesis, Luleå tekniska universitet. 71 pp.
- Sundberg, J. 1988. Thermal properties of soils and rocks. Chalmers tekniska högskola, Göteborg. SGI Rapport; 35. 310 pp.



## Tidigare skrifter i serien

### ”Examensarbeten i Geologi vid Lunds universitet”:

382. Malmer, Edit, 2014: Vulkanism - en fara för vår hälsa? (15 hp)
383. Stamsnijder, Joaen, 2014: Bestämning av kvartshalt i sandprov - metodutveckling med OSL-, SEM- och EDS-analys. (15 hp)
384. Helmfrid, Annelie, 2014: Konceptuell modell över spridningsvägar för glasbruksföreningar i Rejmyre samhälle. (15 hp)
385. Adolfsson, Max, 2014: Visualizing the volcanic history of the Kaapvaal Craton using ArcGIS. (15 hp)
386. Hajny, Casandra, 2014: Ett mystiskt ryggradsdjursfossil från Åsen och dess koppling till den skånska, krittida ryggradsdjursfaunan. (15 hp)
387. Ekström, Elin, 2014: – Geologins betydelse för geotekniker i Skåne. (15 hp)
388. Thuresson, Emma, 2014: Systematisk sammanställning av större geoenergianläggningar i Sverige. (15 hp)
389. Redmo, Malin, 2014: Paleontologiska och impaktrelaterade studier av ett anomalt lerlager i Schweiz. (15 hp)
390. Artursson, Christopher, 2014: Comparison of radionuclide-based solar reconstructions and sunspot observations the last 2000 years. (15 hp)
391. Svahn, Fredrika, 2014: Traces of impact in crystalline rock – A summary of processes and products of shock metamorphism in crystalline rock with focus on planar deformation features in feldspars. (15 hp)
392. Järvin, Sara, 2014: Studie av faktorer som påverkar skredutbredningen vid Norsälven, Värmland. (15 hp)
393. Åberg, Gisela, 2014: Stratigrafin i Hanöbukten under senaste glaciationen: en studie av borrhärdar från IODP's expedition nr 347. (15 hp)
394. Westlund, Kristian, 2014: Geomorphological evidence for an ongoing transgression on northwestern Svalbard. (15 hp)
395. Rooth, Richard, 2014: Uppföljning av utlastningsgrad vid Dannemora gruva; april 2012 - april 2014. (15 hp)
396. Persson, Daniel, 2014: Miljögeologisk undersökning av deponin vid Getabjär, Sölvesborg. (15 hp)
397. Jennerheim, Jessica, 2014: Undersökning av långsiktiga effekter på mark och grundvatten vid infiltration av lakvatten – fältundersökning och utvärdering av förhållanden vid Kejsarkullens avfall-sanläggning, Hulthsfred. (15 hp)
398. Särman, Kim, 2014: Utvärdering av befintliga vattenskyddsområden i Sverige. (15 hp)
399. Tuveesson, Henrik, 2014: Från hav till land – en beskrivning av geologin i Skrylle. (15 hp)
400. Nilsson Brunlid, Anette, 2014: Paleogeologisk och kemisk-fysikalisk undersökning av ett avvikande sedimentlager i Barsebäcks mosse, sydvästra Skåne, bil dat för ca 13 000 år sedan. (15 hp)
401. Falkenhaus, Jorunn, 2014: Vattnets kretslopp i området vid Lilla Klåveröd: ett kunskapsprojekt med vatten i fokus. (15 hp)
402. Heingård, Miriam, 2014: Long bone and vertebral microanatomy and osteohistology of 'Platecarpus' ptychodon (Reptilia, Mosasauridae) – implications for marine adaptations. (15 hp)
403. Kall, Christoffer, 2014: Microscopic echinoderm remains from the Darriwilian (Middle Ordovician) of Västergötland, Sweden – faunal composition and applicability as environmental proxies. (15 hp)
404. Preis Bergdahl, Daniel, 2014: Geoenergi för växthusjordbruk – Möjlig anläggning av värme och kyla i Västskåne. (15 hp)
405. Jakobsson, Mikael, 2014: Geophysical characterization and petrographic analysis of cap and reservoir rocks within the Lund Sandstone in Kyrkheddinge. (15 hp)
406. Björnfors, Oliver, 2014: A comparison of size fractions in faunal assemblages of deep-water benthic foraminifera—A case study from the coast of SW-Africa. (15 hp)

407. Rådman, Johan, 2014: U-Pb baddeleyite geochronology and geochemistry of the White Mfolozi Dyke Swarm: unravelling the complexities of 2.70-2.66 Ga dyke swarms on the eastern Kaapvaal Craton, South Africa. (45 hp)
408. Andersson, Monica, 2014: Drumliner vid moderna glaciärer — hur vanliga är de? (15 hp)
409. Olsenius, Björn, 2014: Vinderosion, sanddrift och markanvändning på Kristianstadssläätten. (15 hp)
410. Bokhari Friberg, Yasmin, 2014: Oxygen isotopes in corals and their use as proxies for El Niño. (15 hp)
411. Fullerton, Wayne, 2014: REE mineralisation and metasomatic alteration in the Olserum metasediments. (45 hp)
412. Mekhaldi, Florian, 2014: The cosmic-ray events around AD 775 and AD 993 - Assessing their causes and possible effects on climate. (45 hp)
413. Timms Eliasson, Isabelle, 2014: Is it possible to reconstruct local presence of pine on bogs during the Holocene based on pollen data? A study based on surface and stratigraphical samples from three bogs in southern Sweden. (45 hp)
414. Hjulström, Joakim, 2014: Bortforsling av kaxblandat vatten från borrhningar via dagvattenledningar: Riskanalys, karaktärisering av kaxvatten och reningsmetoder. (45 hp)
415. Fredrich, Birgit, 2014: Metadolerites as quantitative P-T markers for Sveconorwegian metamorphism, SW Sweden. (45 hp)
416. Alebouyeh Semami, Farnaz, 2014: U-Pb geochronology of the Tsineng dyke swarm and paleomagnetism of the Hartley Basalt, South Africa – evidence for two separate magmatic events at 1.93-1.92 and 1.88-1.84 Ga in the Kalahari craton. (45 hp)
417. Reiche, Sophie, 2014: Ascertaining the lithological boundaries of the Yoldia Sea of the Baltic Sea – a geochemical approach. (45 hp)
418. Mroczek, Robert, 2014: Microscopic shock-metamorphic features in crystalline bedrock: A comparison between shocked and unshocked granite from the Siljan impact structure. (15 hp)
419. Baliija, Fisnik, 2014: Radon ett samhällsproblem - En litteraturstudie om geologiskt sammanhang, hälsoeffekter och möjliga lösningar. (15 hp)
420. Andersson, Sandra, 2014: Undersökning av kalciumkarbonatförekomsten i infiltrationsområdet i Sydsvettens vattenverk, Vombverket. (15 hp)
421. Martin, Ellinor, 2014: Chrome spinel grains from the Komstad Limestone Formation, Killeröd, southern Sweden: A high-resolution study of an increased meteorite flux in the Middle Ordovician. (45 hp)
422. Gabrielsson, Johan, 2014: A study over Mg/Ca in benthic foraminifera sampled across a large salinity gradient. (45 hp)
423. Ingvaldson, Ola, 2015: Ansvarutredningar av tre potentiellt förorenade fastigheter i Helsingborgs stad. (15 hp)
424. Robygd, Joakim, 2015: Geochemical and palaeomagnetic characteristics of a Swedish Holocene sediment sequence from Lake Storsjön, Jämtland. (45 hp)
425. Larsson, Måns, 2015: Geofysiska undersökningsmetoder för geoenergisystem. (15 hp)



**LUNDS UNIVERSITET**