

Loggning och återfyllning av borrhål – Praktiska försök och utveckling av täthetskontroll i fält

Jari Leskelä

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,
kandidatarbete, nr 309
(15 hp/ECTS credits)



Geologiska institutionen
Lunds universitet
2012

Loggning och återfyllning av borrhål – Praktiska försök och utveckling av täthetskontroll i fält

Kandidatarbete
Jari Leskelä

Geologiska institutionen
Lunds universitet
2012

Innehåll

1	Introduktion	5
1.1	Arbetes syfte	5
1.2	Geoenergisystem och dess komponenter	6
1.3	Återfyllningsmetoder	7
1.4	Vad är ett tät borrhål?	9
1.5	Lagstiftning	9
1.5.1	Borrning innanför vattenskyddsområde	10
1.6	Geologisk modell	10
2	Fältförsök	10
2.1	Material	10
2.2	Metod	12
2.3	Resultat	14
3	Borrning av energibrunn.....	17
3.1	Material och utrustning	18
3.2	Metod	18
3.3	Resultat	19
4	Täthetskontroll och metod	20
5	Diskussion och felkällor	21
6	Slutsatser.....	24
7	Tack.....	24
8	Referenser	24
9	Bilagor.....	25

Omslagsbild: Återfyllning av energibrunn med stensmjöl. Foto Jari Leskelä 2012.

Loggning och återfyllning av borrhål – Praktiska försök och utveckling av täthetskontroll i fält.

JARI LESKELÄ

Leskelä, J., 2012: Återfyllning av borrhål - Praktiska försök och utveckling av täthetskontroll i fält. *Examensarbete i geologi vid Lunds universitet*, Nr 309, 32 sid. 15 hp.

Sammanfattning: Återfyllning av energibrunnar har tidigare inte varit aktuellt i någon större grad. De senaste åren har det höjts röster från ett fåtal kommuner om att installationen av dessa system kan skapa en potentiell föroreningsutbredning. Trots att installationerna i verkligheten skapat få fall där problem uppstått, fortsätter vissa kommuner att sätta restriktioner mot öppna borrhål vilket framtvingar återfyllning av energibrunnar i större grad än nödvändigt. Arbetet vill därför lösa problemen relaterade till återfyllning och utbilda bort okunskapen som i många fall ligger till grund för återfyllningar.

Vid återfyllning väljer vissa entreprenörer att återfylla med stensmjöl. Eftersom stensmjöl i tidigare litteratur visat sig vara olämpligt som återfyllningsmaterial med nuvarande återfyllningsmetodik, mättes stensmjölets tätande egenskaper vid återfyllningen av en energibrunn.

Då en kontrollmetodik med täthetsmätningar av godkända återfyllningsmaterial till stor del saknas, har en dokumentering vid borrning och loggning av en energibrunn utförts. Den ligger till grund för utvecklingen av en kontrollmetodik vilken avser mäta den vertikala tätheten i en brunn återfylld med Muoviterm, ett bentonitbaserat återfyllningsmaterial.

Resultaten visar att stensmjöl vid nuvarande återfyllningsmetodik där det föses ner från ytan, uppvisar separation vilket leder till ett heterogent medium med en enligt SGU icke godkänd permeabilitet i borrhålet. Vidare visar kornstorleksanalysen att kornstorleksintervallet i stensmjölet på 0,0063 mm – 5.6 mm har för hög permeabilitet för att kunna ge en acceptabel täthet.

Arbetet berättar även att återfyllningar skall grundas på beslut via kunskap och inte antaganden och att när det är motiverat, bör ett delvis återfyllt borrhål överläggas då det är billigare och ger samma resultat.

Nyckelord: Geoenergi, bergvärme, återfyllning, permeabilitet, borrhål, energibrunn, tätning

Handledare: Johan Barth, Mikael Calner

Ämnesinriktning: Berggrundsgeologi

Jari Leskelä, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige.

E-post: jari.leskela@gmail.com

Logging and grouting of boreholes – Practical experiments and permeability control in field.

JARI LESKELÄ

Leskelä, J., 2012: Logging and grouting of boreholes – Practical experiments and permeability control in field. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 309, 32 pp. 15 hp (15 ECTS credits).

Abstract: Grouting of energy wells has previously not been a big issue. A few years ago, voices were raised from a couple of towns stating that the installation of these systems could potentially create a spreading of impurities. When in reality, very few of these systems creates problems, some towns keeps putting restrictions against open boreholes. This creates a situation where grouting becomes more common than necessary.

This paper is looking to solve some of the problems related to grouting and spread knowledge to minimize unmotivated grouting.

Some entrepreneurs choose to grout with rock flour. Because of older literature showing that using rock flour with the current method makes an unsuitable grouting material, a measurement of rock flours permeability was made during the grouting of a energy well.

Due to the lack of field testing regarding permeability of an authorized grouting material, a documentation of drilling and logging of a energy well was made. This lay as foundation to a methodology regarding the measurement of vertical permeability in energy wells.

Results show that rock flour with current grouting method, where it is poured from the surface down the hole, undergoes separation which leads to a heterogeneous material by SGU regarded as having a to high permeability. This is strengthened by grain size analyzing showing a grain size interval between 0.0063 – 5.3 mm with a to high permeability.

Dissertation further tells that grouting should be based on decisions made with knowledge and not assumptions and when motivated, a partly grouted borehole should be given a thought, hence it is cheaper and could give equal if not better results.

Keywords: Shallow geothermal energy, grout, borehole, permeability

Supervisors: Johan Barth, Mikael Calner

*Jari Leskelä, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden.
E-mail: jari.leskela@gmail.com*

1 Introduktion

Geoenergisystem används idag i Sverige i en relativt stor omfattning för dess ekonomiska och miljömässiga fördelar jämfört med konventionell energianvändning.

Systemet baseras på principen att energi från solen lagras i marken under året, och kan både utvinnas och säsongslagras och därmed ge värme och/eller kyla till bostäder och andra fastigheter året runt. Den del av anläggningen där markenergin överförs kallas energibrunn och i Sverige är dessa normalt öppna - dvs. grundvattnet i borrhålet kan röra sig fritt.

Under de senaste åren har det i några enstaka kommuner höjts röster om att installationen av dessa system skulle kunna skapa en potentiell förorenings-spridning. Argumenten har varit att ytligt liggande föroreningar skulle kunna kontaminera borrhålen och sen spridas vidare i grundvattnet. I Sverige har dock föroreningsproblem relaterade till energibrunnar inte varit utbredd och det handlar om några enstaka fall per år (Barth, pers. komm. 2011). Angående föroreningsrisken har Risberg (pers. komm. 2011) sagt att ”*I regel rör det sig om en enskild brunn som förorenas då en energibrunn borrar åt en närliggande fastighet. Vanligast är att borrhålet öppnat upp en ny transportväg för föroreningar som redan fanns i marken. Problemens frekvens har minskat i takt med att borrhålens utförande förbättrats de senaste decennierna*”. I de fall det har varit aktuellt har borrhålen återfyllts, vilken i princip går ut på att man fyller borrhålet med ett tätande material som i sin tur leder till att permeabiliteten i borrhålet minskar. Trots den lilla omfattningen av problem, väljer ett antal kommuner att fortsätta med restriktioner mot öppna borrhål, vilket leder till att antalet omotiverade återfyllningar ökar.

Problemet med återfyllning är att det i Sverige och stora delar av världen saknas regelverk att följa vid återfyllning, och där regler finns skiljer de sig ofta mycket från varandra (Bayer et al. 2010). Detta har fått konsekvensen att återfyllningsteknikerna och återfyllnadsmaterialen är många och tekniskt spridda (Hjulström 2012).

Problemet vid återfyllnad är att få borrhålet tätt dvs. minska permeabiliteten över hela borrhålens längd. Det innebär att det inte får ske några grundvattenrörelser genom det återfyllda materialet eller omgivningen, samt att köldbäraren i värmeväxlarna inte skall kunna läcka ut i de borrhålesformationerna. Detta betyder i princip att markförhållandena skall få ett föroreningskydd som är likvärdigt, men generellt sett bättre än innan borrhålet borrades. Detta ställer krav på återfyllningsmaterialet som dels måste ha en låg permeabilitet, men även vara beständig över tid dvs. inte eroderas bort eller förlora sina tätande egenskaper efter återfyllnaden. Samtidigt måste man ta hänsyn till att den termiska konduktiviteten inte går förlorad. Om den försämras så försämras även energibrunnen som då avger mindre energi än om den var fylld med grundvatten som i normalfallet. Vatten i sig har en ganska dålig termisk konduktivitet. Trots det är en

energibrunn fylld med grundvatten mycket effektiv. Detta beror på vattenrörelser i borrhålet som transporterar den energi som finns i borrhålens väggar till köldbäraren i kollektorlangen. Det sker bland annat p.g.a. de konvektionsceller och vertikala vattenrörelserna som formas i det vattenfyllda borrhålet (Hjulström 2012). Om borrhålet återfylls missgynnas dessa fenomen och energiöverföringen försämras (Hellström 2002). Detta kan i sin tur leda till att man måste borra ett djupare eller fler hål för att kompensera för energiförlusten. Det finns även risk att den ursprungliga installationen med ett vist antal borrhål och värmeväxlare, som utformats just för den aktuella platsen, måste konfigureras för att kompensera för den minskade termiska konduktiviteten. Denna förändring medför en betydande kostnad, vilket gör materialvalet vid återfyllningen viktig.

På grund av den dyra kostnaden vid återfyllning, har en del företag valt att använda sig utav det billigare alternativet stenmjöl som återfyllningsmaterial. Då stenmjölens egenskaper t.ex. termisk konduktivitet och kornstorlek varierar mycket beroende på dess innehåll vilket styrs av dess proveniens, kan man inte ge ett generellt svar hur stenmjöl är som återfyllningsmaterial. Detta arbete har på grund av ovanstående fakta dokumenterat en återfyllning med stenmjöl och den allmänt använda återfyllningsmetoden för materialet.

Ett geoenergisystems driftbelastning varierar över året, speciellt på de norra bredgraderna där klimatet ger oss långa kalla vintrar med högre driftbelastning och varma somrar där belastningen är omvänd vid uttag av kyla. Återfyllnads materialet skall därför vara driftsäkert, och klara de temperaturskillnader som uppstår i systemet, vilket ställer ytterligare krav på materialet.

1.1 Arbetets syfte

För att informera och utbilda bort den okunskap som ligger till grund för de senaste årens diskussioner har Geotec, som är Svenska Borrentreprenörers Branschorganisation, tagit sig an uppgiften att ta fram en rekommendation/handledning över hur och vad man återfyller med.

I ett tidigare arbete som gjorts i samarbete med Geotec (Hjulström 2012), sammanställdes den nuvarande globala litteraturen och kunskapen om hur man utför en återfyllning med bästa behållning och effektivitet.

I nuvarande litteratur saknas studier där täthetskontroller av återfyllningsmaterial har utförts i fält på platsen för återfyllningen, de har istället varit fokuserade på div. laborationstester.

Då tidigare litteratur saknar liknande forskning, avser detta arbete att dokumentera borrhålets av en energibrunn. Dokumenteringen skall innefatta provtagning och bearbetning av relevant fältdata, vilka skall ligga till grund för utvecklingen av en framtida täthetskontroll av återfyllt material i energibrunnar.

Arbetet skall även p.g.a. förgående avsnitts fakta dokumentera återfyllningen av ett borrhål med sten-

mjöl, och utvärdera om återfyllnadsmetoden fungerar rent praktiskt, hur lång tid återfyllningen tar, men främst om den skapar ett tät borrhål.

Eftersom det både i USA (Remund och Smith 1997), och i Tyskland (VDI 2001) har publicerats anvisningar som behandlar när, var och hur man skall återfylla för bästa resultat, samt att det där forskats i ämnet senaste 20 åren (Hjulström 2012), har det även utförts en mindre litteraturstudie som avser att se hur detta arbetets resultat korrelerar med tidigare forskning.

Det kommer även föras en diskussion angående vilka krav som är rimliga att ställa beträffande återfyllningsmaterialens och berggrundens täthet.

Följande frågeställningar utreds i arbetet:

- Hur utförs en täthetskontroll av ett återfyllningsmaterial?
- Vilka faktorer måste tas hänsyn till vid en täthetskontroll?
- Är metodiken användbar för alla återfyllningsmaterial?
- Har alla entreprenörer möjlighet/kompetens att utföra testmetodiken?
- Blir borrhålet tillräckligt tätt med stenmjöl?
- Vilka krav är rimliga att ställa beträffande materialets täthet och den omgivande berggrunden.

1.2 Geoenergisystem och dess komponenter

Geoenergi är energi som bildas när solen värmer markytan varav en del den sen lagras som värme. Energin består också till en mindre del utav värme från jordens inre.

I dagsläget står geoenergin i Sverige för ca 12-15 % av Sveriges totala uppvärmning av enfamiljbostäder samt andra lokaler och denna siffra stiger årligen (Andersson et. al 2009). Systemet kan även ge kyla under året, och bidrar då med värme som ”restprodukt” vilket kan värma upp borrhålet genom s.k. återladdning. Den värme som tas ur marken för uppvärmning under årets kalla månader återförs under sommarhalvåret från solen och jordens inre och kan därför utnyttjas år efter år.

Borrhålen kan ha en längd på allt från 100-300 m, och antalet borrhål varierar kraftigt, från det enkla borrhålet för privatbostäder till hundratalet borrhål vid installationer i stora bostadskomplex. Antalet borrhål styrs av fastighetens energibehov, samt de geologiska förutsättningar i området där systemet installerats.

Man brukar i sammanhanget tala om ett passivt eller ett aktivt energisystem, där det förstnämnda är vanligast i enskilda fastigheter och det senare för värme och kyla av kommersiella fastigheter (Andersson et. al 2009). Även inom de passiva systemen finns det flera alternativ, vanligast är dock bergvärmesystemet, vilket är det system som behandlas i arbetet och illustreras i figur 1. Detta system fungerar efter principen

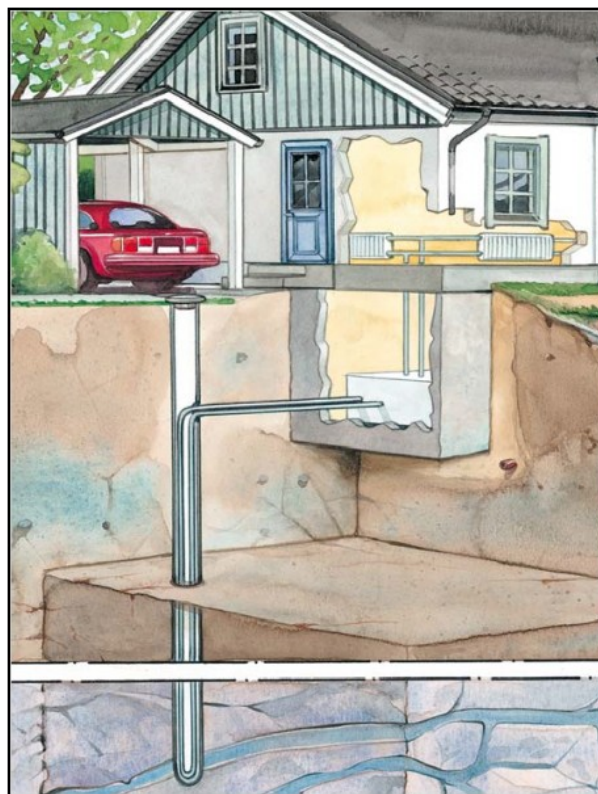


Fig. 1. Ett typiskt bergvärmesystem med ett borrhål, kollektorslang och värmepump. Bilden är en omarbetad version av originalet från www.Geotec.se.

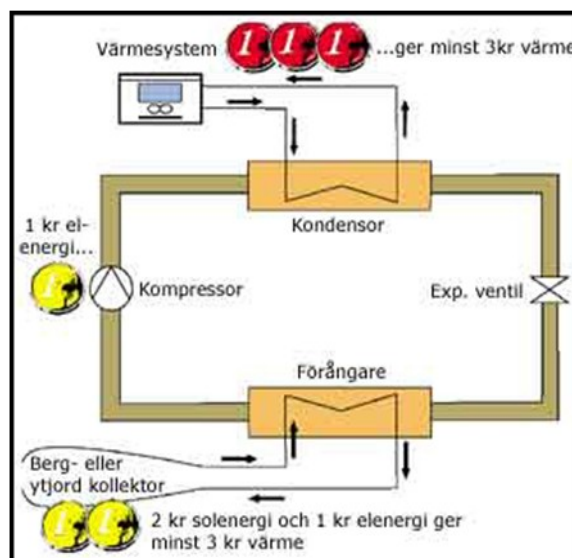


Fig. 2. Illustration och processbeskrivning av en värmepump (http://cenith.se/funktion.html).

att ett energiborrhål av varierande djup borrar. Energin från borrhållsväggen transporteras av grundvattnet till en kollektorslang tillverkad i PEM-material, i vilken en cirkulerande köldbärare transporterar energin till den i det förekommande fallet inkopplade värmepumpen.

Värmepumpen

Värmepumpens huvudprincip kan ses i figur 2. Kortfattat fungerar den så att köldbäraren, som i Sverige normalt består av bioetanol, värmer upp värmepumpens köldmedium i förångaren (en värmeväxlare), vilket får den att koka och förångas. Därefter förs den in i kompressorn, där trycket ökar, vilket får den att öka i temperatur. När köldmedlet senare kondenseras från gas till vätska i kondensorn avges värme som används för att värma fastigheten. Därefter går köldmedium tillbaka till förångaren och processen upprepas. Köldbäraren pumpas efter förångaren åter ner i borrhålet för upprepad värmeupptagning (Geotec 2009).

Kollektorslangen

Som tidigare nämnts är kollektorslangen gjord av ett material som heter PEM vilket är ett plastmaterial. Slangens uppgift är innesluta köldbärarvätskan som tar upp den energi som vattnet i borrhålet har transporterat från borrhålsväggen.

Även om läckage från kollektorslangen är ovanligt, och i de fall när de väl händer kan härledas till bristande installationsteknik, så är det vid installation av kollektorslang viktigt att man använder en slang av hög kvalitet och certifierad installatör för att minimera riskerna (Svenska Värmepumpföreningen 2004).

Borrhålet

Ett typiskt borrhål avsett för energiuttag är dimensionerat med en diameter mellan 115-140 mm. Energi-brunnens djup bestäms av vilket energibehov din värmepump har för att ge den energi fastigheten behöver (Geotec 2009).

Borning av en energi-brunn utförs mer eller mindre på samma sätt som borring utav en dricksvatten-brunn, och de har likartade kvalitetskrav. Brunnens övre del som når marknivå måste i båda fall tätas så att potentiella ytliga föroreningar inte når grundvattnet i brunnen, och ut till närliggande brunnar.

Skillnaden dem emellan ligger i att vattenkvaliteten i energi-brunnen inte spelar lika stor roll, eftersom energi-brunnens vatten inte skall drickas, utan endast överföra energi mellan borrhålsväggen och köldbäraren i kollektorslangen (Geotec 2009).

Foderröret

Då man vid borring av ett borrhål oftast måste borra sig igenom ett antal meter av löst sammansatta kvartära avlagringar (i Sverige oftast morän), måste man använda sig utav ett s.k. foderrör.

Foderröret består av ett stålrör och dess uppgift är att hindra inträngning av jord, berg och ytligt grundvatten ner i den nyborrade brunnen (SGU 2008). Foderröret förhindrar dessutom effektivt att eventuella föroreningar som finns i de övre marklagren når brunns insida. Foderröret skall därför alltid borras ner i minst 2 meter berg, där det sedan tätas av mellan borrhålets vägg och foderrörets utsida med hjälp av cement (SGU 2008). Denna tätning säkerställer att borrhålet inte har någon kontakt med de lösa avlagringarna i



Foto 1A. Placering av foderrör innan svetsning vid energi-brunnen i Helsingborg. Foto 1B. Svetsning av foderrör i Helsingborg. Foto 1C. Svetsfog på foderröret vid energi-brunnen i Helsingborg (Foto av Jari Leskelä 2012).

marken och eventuella föroreningar som finns ovan berget.

Foderröret levereras i 3 eller 6 m sektioner beroende på borrustrustning, och svetsas ihop allt eftersom foderrörssektionerna drivs ner i marken (se foto 1A-C). Därför det viktigt att svetsfogen svetsas av behörig personal och utförs enligt gällande normer så att röret blir tät.

1.3 Återfyllningsmetoder

Vid återfyllning av ett borrhål så används som tidigare nämnts många olika material och metoder. För en utförlig presentation av dessa ges hänvisning till Joakim Hjulströms (2012) arbete.

När man avser att återfylla ett borrhål så är det viktigt att materialet fyller ut hela borrhålet och att det

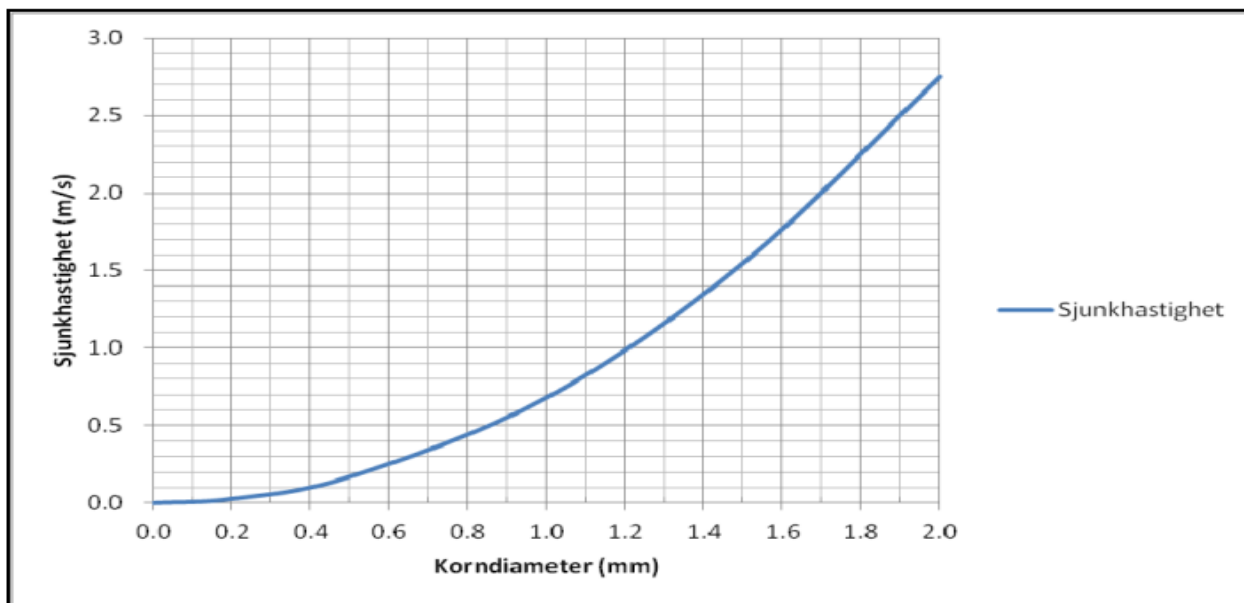


Fig. 3. Hastigheten (m/s) med vilken sfäriska kvartspartiklar ($\rho = 2,65$) av olika kornstorlek sjunker genom tiogradigt vatten (Hjulström 2012).

inte bildas öppna områden i hålet. Man vill även att materialet skall hålla samma kvalitet när det lämnar markytan som när den är på plats i borrhålet (Hjulström 2012). Den jämna sammansättningen genom hela borrhålets längd är viktig för att undvika kvalitetsskillnader vilket kan leda till att de tätande egenskaperna i materialet varierar.

Nedan beskrivs de två metoder som används i detta arbete. Vidare beskrivs även fenomenet separation vilket drabbar osorterade återfyllningsmaterial som återfylls enligt metoden nedan.

Material uppifrån

Metoden förekommer vid återfyllning med olika återfyllningsprodukter som t.ex. bentonitpellets, borrkax, sand (Hjulström 2012) och stenhjöl som i detta fältförsök.

Metoden går i princip ut på att man föser eller spolrar ner materialet från ytan. Det får sen sjunka mot borrhålets botten. Metoden präglas av separationsproblem, (läs separationsavsnitt och separationsexperiment) och är en av huvudanledningarna till dess olämplighet.

Vid tidigare litteratur (Paul och Remund 1997) testades att hålla ner en blandning av bentonitpellets och kvartsit i en vattenfylld rör enligt metoden och fann att resultaten även bland prover med samma sammansättning blev mycket varierande. Även om testet huvudsakligen var ute efter att testa termisk konduktivitet, kom man fram till att separation av de två materialen existerade och antagligen förvärrades vid återfyllning av ett djupt borrhål.

Tryckinjektering

Metodens princip går ut på att man vid nedsänkandet av kollektorslang i borrhålet fäster en extra slang (Tremie pipe) på kollektorslangen vilken förs ner till botten av hålet. Slangen fästs sedan till en pump vilken

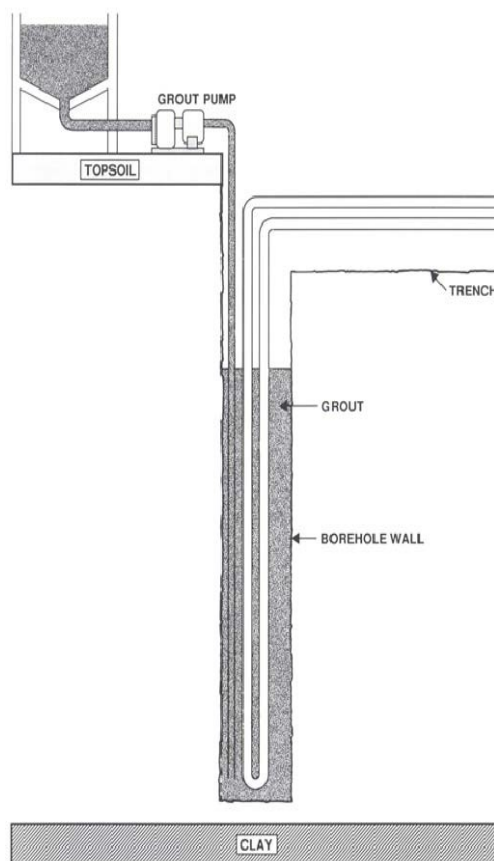


Fig. 4. Principskiss av en återfyllning med tryckinjekteringsmetoden där man använder sig utav en så kallad tremie pipe. Bilden är från Remund och Smith (1997).

pumpar ner materialet direkt till botten (se fig.4). Som pumpanordning rekommenderas av både Allan och Philippacopoulos (1998) och Remund och Smith (1997) en kolvpump. I USA dras slangen upp ur borrhålet allteftersom materialet fyller borrhålet (Remund

och Smith 1997). Enligt VDI (2001) skall man vid återfyllningsdjup större än 60 meter för att undvika problem fylla röret varefter det lämnas kvar i hålet. Metoden stöds av studerade källor (Remund och Smith 1997, VDI 2001, Paul och Remund 1996, och Allan 1997) då den eliminerar problem så som separation och utspädning av återfyllningsprodukten samt att det säkerställs att borrhålet återfylls helt och att inga luftfickor bildas i hålet.

Metoden nämns även av källorna som den metod vilken fungerar vid alla typer av återfyllningar. Dock ställer metoden krav på att materialet har en viskositet som gör materialet pumpbart (Hjulström 2012).

Separation

Separation är ett fenomen som sker när ett material med olika kornstorlekar får falla fritt genom en vattenpelare, i fallet med en energibrunn ca 100-300 meter.

De mindre partiklarna som t.ex. lerfraktionerna, kommer att hållas i suspension under en längre tid, medans de grövre partiklarna kommer att sjunka till botten i en mycket snabbare takt. (Hjulström 2012). Detta får konsekvensen att borrhålets återfyllningsmaterial kommer att delas upp i sektioner av olika kornstorlekar beroende på deras individuella storlekar. Dessa sektioner kommer att upprepa sig genom hela borrhålet då återfyllningen också sker i flera omgångar.

Enligt Stokes lag kan en partikels hastighet när den sedimenterar genom en pelare av vatten räknas ut med följande formel:

$$w = \Delta\rho d^2 g / 18\mu$$

Där följande parametrar ingår:

w = Partikelns hastighet neråt i borrhålet (m/s).

$\Delta\rho$ = Skillnaden i densitet mellan vattnet och partikeln (kg/m^3).

d = Kornets diameter (m).

g = Tyngdacceleration (m/s^2).

μ = Dynamisk viskositet (Ns/m^2) (Tucker 2001).

Kvartskorns sjunkhastighet i förhållande till dess storlek beräknat enligt Stokes lag kan ses i figur 3.

1.4 Vad är ett tät borrhål?

Att ett återfyllt borrhål blir tät är en absolut nödvändighet då anledningen till återfyllningen från först början är att förhindra spridning av eventuella föroreningar. I Sverige finns det idag ingen siffra på hur tät ett material skall vara för att anses som tät. Frågan ansvarar SGU för och det diskuteras i nuläget om vad som är tätt eller inte. I nuläget hänvisar de till de internationella värdena (Hjulström 2012). Enligt Remund och Smith (1997) har amerikanska Environmental Protection Agency bestämt att en permeabilitet som inte överstiger $1 \cdot 10^{-9}$ m/s får ses som acceptabel. Frågan om hur tät ett material med ovanstående permeabilitet är kvarstår dock.

En typisk bentonitbaserad återfyllningsprodukt som används vid återfyllning av energibrunnar har en permeabilitet på ungefär $1 \cdot 10^{-9}$ m/s eller lägre (Hjulström 2012) och anses tät, men materialet kommer fortfarande att ha en vis permeabilitet.

Enligt SVEP (Svenska Värmepumpföreningen) så har en energibrunn och dess tillhörande kollektor-slangsystem en livslängd på över 100 år (Svenska värmepumpföreningen 2004). Detta ställer stora krav på återfyllningsmaterialet, vilket under denna driftperiod skall förhindra att grundvatten kan transporteras genom brunnens olika avsnitt.

1.5 Lagstiftning

När man skall anlägga en brunn för produktion av dricksvatten, eller i energiproduktionssyfte som vid installation av en energibrunn, finns det lagar man måste ta hänsyn till. Lagarna finns där för att dels skydda den enskilde, men även för samhällets intressen (SGU 2008). Dessa lagar styr relationen mellan konsument, brunnsbörare och myndigheterna som berörs av projektet. Följande avsnitt innehåller en sammanställning av det regelverk som verkar i nuläget.

Plan och bygglagen

Används av kommunerna för att styra över hur kommunens marker utvecklas. Lagen reglerar var, och hur en vis sorts bebyggelse får lov att utföras. Lagen ger även kommunen rätt att avgöra vilka markförändringsåtgärder som kräver bygglov. En sådan markåtgärd kan vara uppförandet av en energibrunn i ett område där den kan skapa olägenheter. Problemet kan bestå av saltvattenkontaminering av existerande vattenproduktionsbrunnar (SGU 2008), men även spridning av föroreningar som redan finns i marken.

Lagen informerar även om kraven på myndighetsupplysning, som t.ex. kunskap om vissa speciellt känsliga områden. Dessa områdens skyddsvärde skall utvärderas och redovisas på kartor. Dessa områden kräver ofta en ökad miljöhänsyn, och en överlag skärpt lagstiftning. Detta innebär ofta en ökad hänsyn vid brunnsplaceringen och övrig aktivitet i området (SGU 2008).

Miljöbalken

Miljöbalken (MB) är ett av de redskap som används för att få igenom målet om ekologisk hållbar utveckling. Följande går att läsa från naturvårdsverkets hemsida om hållbar utveckling ”*Hållbar utveckling handlar inte bara om en god miljö, utan växer fram i samspelen mellan tre ömsesidigt beroende delar – ekologisk, ekonomisk och social hållbarhet. Det kan till exempel betyda att ekonomisk tillväxt inte får ske till priset av ett segregerat och ojämlikt samhälle och en förstörd miljö. Samhället bör i stället anpassas efter vad miljön och människors hälsa tål och där vi långsiktigt investerar i dessa resurser*”.

De viktigaste lagarna i miljöbalken som reglerar hur

miljöpåverkande aktiviteter får utföras kan läsas ur kap 2: Allmänna hänsynsreglerna

§ 1: Hållbar utveckling

”När frågor prövas om tillåtlighet, tillstånd, godkännande och dispens och när sådana villkor prövas som inte avser ersättning samt vid tillsyn enligt denna balk är alla som bedriver eller avser att bedriva en verksamhet eller vidta en åtgärd skyldiga att visa att de förpliktelser som följer av detta kapitel iaktas. Detta gäller även den som har bedrivit verksamhet som kan antas ha orsakat skada eller olägenhet för miljön. I detta kapitel avses med åtgärd en sådan åtgärd som inte är av försumbar betydelse i det enskilda fallet”.

§ 3: Försiktighetsprincipen

”Alla som bedriver eller avser att bedriva en verksamhet eller vidta en åtgärd skall utföra de skyddsåtgärder, iaktta de begränsningar och vidta de försiktighetsmått i övrigt som behövs för att förebygga, hindra eller motverka att verksamheten eller åtgärden medför skada eller olägenhet för människors hälsa eller miljön. I samma syfte skall vid yrkesmässig verksamhet användas bästa möjliga teknik. Dessa försiktighetsmått skall vidtas så snart det finns skäl att anta att en verksamhet eller åtgärd kan medföra skada eller olägenhet för människors hälsa eller miljön”.

§5: Hushållsprincipen

”För en verksamhet eller åtgärd som tar i anspråk ett mark- eller vattenområde skall det väljas en plats som är lämplig med hänsyn till att ändamålet skall kunna uppnås med minsta intrång och olägenhet för människors hälsa och miljön”.

Dessa lagparagrafer har alla en stor betydelse i hur nuvarande miljölagar är utformade och applicerbara vid verksamheter som klassas som miljöfarlig verksamhet.

Utöver de lagar som nämnts finns det dessutom ett flertal lagar som rör relationen mellan beställare och entreprenör och finns sammanfattade i Normbrunn 07 (SGU 2008).

1.5.1 Borrning innanför vattenskyddsområde

Ett vattenskyddsområde kan delas in i upp till 3 skyddszoner vilka är den primära, sekundära och den tertiära. I den primära, vilket är den första skyddszonen är borrning förbjuden, medans det i den andra (sekundära) ligger en tillståndsplikt (SGU 2008).

För områden med vattenskydd ligger tidigare citerade försiktighetsprincipen som grund vid myndigheternas utformning, och föreskrifter av dessa. Även vilka krav som ställs på verksamhetsutövaren ligger med grund i de allmänna hänsynsreglerna. Ett område får av länsstyrelsen eller kommun klassas som ett vattenskyddsområde, om det anses nödvändigt för att skydda ett grund eller ytvattenområde som är eller kan komma att användas som vattentäkt (7 kap. 21 § MB).

Följande text är ett citat från p. 11 till 7 kap. 22 § MB

och rör föreskrifterna vid installation av geoenergisystem.

”I föreskrifter för ett vattenskyddsområde bör anges att i primär skyddszon för grundvattentäkt är anläggningar för lagring av och utvinning av värmeenergi ur berg, mark och vatten, uttag av vatten från berg och jord, samt även andra typer av borrningar som kan påverka vattentillgång/kvalitet, förbjudna och att i sekundär skyddszon för grundvattentäkt och i primär skyddszon för ytvattentäkt krävs tillstånd för sådana anläggningar.”

Vid installation av energibrunn kan det därför inom ett vattenskyddsområde ställas krav på att den utförs under vissa premisser. Riskerna som utvärderas är (1) själva anläggningen av systemet, med borrning, bortledning av vatten och oljeläckage från borrrustning. (2) Anläggningens påverkan på områdets geologi med t.ex. kortslutna akvifärer. (3) Eventuella komplikationer som rör driften av systemet, där framtida läckage från kollektorslangar och förorenings-spridningar vid t.ex. olyckor mm framhålls. De tre riskmomenten bör alla uppmärksammas och samverka vid utformning av dessa premisser, de skall även sättas i samband med vattenskyddsområdets zoner och de geologisk rådande förhållandena på platsen. Reglerna bör även formas så att de tar hänsyn till det enskilda fallets egenskaper, som typ av vattentäkt och anläggningens risker (Naturvårdsverkets 2011).

1.6 Geologisk modell

Vid återfyllning av energibrunnar måste hänsyn tas till det material som omger borrhålet. Eftersom inga återfyllnadsmaterial stelnar alternativt sätter sig direkt vid återfyllnaden, har bergets sprickighet och vattenföring ofta betydelse.

Vid händelsen av borrning i sprickrikt berg skulle det eventuellt kunna leda till att återfyllnadsmaterialet vid återfyllningen rinner ut ur borrhålet. Eventuell erosion av återfyllningsmaterialet över tid går inte heller att utesluta, även om det inte behandlas i detta arbete. Ovanstående resonemang gör en geologisk modell över området där man avser återfylla viktig.

Vid borrning av energibrunnar skall det enligt normbrunn 07 (SGU 2008), uppföras ett brunnsprotokoll där den certifierade brunnborraren noterar och dokumenterar formationer och deras vattenföring under borrningen, vilket kan underlätta vid materialval. Man får även information om vilka brunnsnivåer som kan vara känsliga, samtidigt som det ger en referens om vart man skulle kunna kontrollera att återfyllningen är tät.

2 Fältförsök

Fältförsöket rör dokumenteringen vid återfyllning av en energibrunn med hjälp av stenhjöl i byn Burseryd i Småland. Dokumentationen vid återfyllningen har utförts mellan datumen 29/3 2012- 9/5 2012. Företaget som ansvarar för återfyllningen är Jannes Brunnborr-

ning AB. Min kontakt på företaget under försöket har varit företagets ägare Jan Berglund. Företaget har själva stått för återfyllningsmaterial och metod under denna undersökning.

Uppdraget har varit att dokumentera metod och material, samt utföra ett täthetstest för att undersöka stenmjölets tätande egenskaper. Det har även utförts ett experiment där jag låtit stenmjöl från återfyllningen sjunka ner genom en plastcylinder fylld med vatten. Experimentet avser att undersöka om separationsfenomen existerar. Experimentet är tänkt att simulera stenmjölets transport ner genom det vattenfyllda borrhålet mot borrhållsbotten.

Det har även utförts en kornstorleksanalys på stenmjölet för att få en korrekt kornstorleksgradering.

Geologi

Enligt SGU's kartgenerator finns det ingen tillgänglig jordartskarta över Burseryd. Dock har brunnsteknikern berättat att man vid borrning av energibrunnen innan berg nåtts stött på morän. Detta är troligt då området ligger ovanför högsta kustlinjen. Berggrunden i området består utav en granit (Bilaga E). Längst med Burseryd och i den återfyllda energibrunnen löper en ospecificerad deformationszon. Den ser dock inte ut att ha utbredning över området för energibrunnen. Sprickzonen kan dock breda ut sig och påverka sprickfrekvensen i området men behöver inte nödvändigtvis ha någon inverkan på energibrunnen som t.ex. ökad vattenföring. Det går dock inte att utesluta.

2.1 Material

Nedan beskrivs material, utrustning och metod som använts under dokumentationen av återfyllningen samt täthetsmätningarna i Burseryd.

Samtliga material och utrustning som använts under återfyllningen har Jannes brunnborrning AB valt och hanterat. Mitt jobb har varit att dokumentera själva arbetsgången och täthetsmätningarna. Mätningar och den nödvändiga utrustningen för fältförsöket har valts ut och modifierats i samtycke med Johan Barth, VD på Geotec.

Återfyllningsmetod

Återfyllningsmetoden fungerar enligt principen att man håller ner stenmjölet från ytan ner i borrhålet.

Metoden är inte en vedertagen metod, men används sporadiskt av en del entreprenörer. Även andra material förekommer när samma metodik används. Det kan vara bentonitpellets, borrkax och sand. Stenmjöl används gärna då det är lätt att tillgå, är billigt och att det har tätande egenskaper (Hjulström 2012).

Återfyllningsmetoden kräver ingen specifik utrustning som normalt består av spade, skottkärra och en vattenslang. Det gör även utrustningen för återfyllningen billig.

Material för täthetsmätningar.

Vid täthetsmätningarna har det använts två stycken



Foto. 2 .Siktstapel med tillhörande skakmaskin som används till kornstorleksanalyser (Foto av Jari Leskelä 2012)



Foto. 3. 50/50 maskinen vilken fördelar sediments kornstorlekar jämt i provet man skall analysera (Foto av Jari Leskelä 2012).

pvc-slangar med längderna 32 respektive 200 meter. De har perforerats med 6 mm hål de sista två metrarna.

Vid mätning av avsänkning över tid har mobilens tidtagarur använts.

Återfyllningsmaterial

Materialet som använts vid återfyllningen är stenmjöl. Stenmjöl bildas som restprodukt vid krossning av berg i bergtäkter där man bryter och producerar ballastmaterial för diverse byggprojekt. Materialet är en osorterad blandning av olika kornstorlekar vilka varierar mellan de olika typer av stenmjöl som finns på marknaden.

Materialet varierar även i sammansättning beroende på vilken typ av berg som stenmjölet har sitt ursprung ur. De företag som säljer stenmjöl erbjuder storleks varianter på 0-2 mm, 0-4 mm och 0-8 mm. men större fraktioner förekommer också. Detta innebär t.ex. för 0-4 mm att kornstorleken ligger i intervallet mellan de allra minsta lerpartiklarna till 4 mm korn. Det betyder att de tätande egenskaperna kommer att variera kraftigt beroende på vilken typ av stenmjöl som används (Hjulström 2012), men även hur förhållandet mellan de respektive kornstorlekarna ser ut.

Stenmjölet som använts vid denna återfyllning har en kornstorleksfördelning inom intervallet 0.0063-5,6 mm (se kornstorleksanalys)

Viktigt vid återfyllning med stenmjöl, och som det även lagts stor vikt vid är ifall det sker en separation av stenmjölet under återfyllningsprocessen.

Kornstorleksanalys

Vid analysen har det använts en siktstapel och skakmaskin (se foto 2). Stapeln används vid div. sediment-



Foto. 4. Slang med tillverkade hål för täthetsmätning av stenmjöl (Foto av Jari Leskelä 2012).

ologiska undersökningar inom forskningen, kvalitetskontroll av råmaterial mm. Den kan användas för både torr och våtsiktning. Silstapeln fungerar enligt principen att man håller materialet (i detta fall stenmjöl) över ett antal silar. Silarna är staplade ovanpå varandra där den grövsta silen ligger överst, med gradvis finmaskigare silar under. Stapeln skakas därefter i skakmaskinen, där materialet sorteras i sina respektive kornstorlekar via de olika silarna. Sedimenten från silarna vägs därefter. Sedan kan man antingen manuellt eller med datorprogram konstruera en kornstorlekskurva och få en översikt utav materialets kornstorleksfördelning. Innan sedimenten analyseras i siktstapeln kan provet blandas i en s.k. 50/50 maskin (se foto 3) vilken fördelar provets kornstorlekar jämt.

Typ	Diameter	Radie	Längd	Formel	Volym
Borrhål, 1 st (A)	115 mm	57,5mm	200m	$V = \pi \times r^2 \times h$	2,077m ³
Kollektorslang A 0-10 m, 2 st (B)	40 mm	20 mm	10m	$V = \pi \times r^2 \times h$	0,025m ³
Kollektorslang B 10-200m, 4 stycken (C)	32 mm	16 mm	190m	$V = \pi \times r^2 \times h$	0,61 m ³
Pvc-slang: 0-32m, 1 st (D)	16 mm	8 mm	32m	$V = \pi \times r^2 \times h$	0,0064 m ³
Pvc-slang: 0-200m, 1 st (E)	16 mm	8 mm	200m	$V = \pi \times r^2 \times h$	0,04 m ³
Total återfyllbar volym (V2)				$V2 = A - (B-C-D-E)$	1,3956 m ³ = ~ 1396 L
Volym använd stenmjöl (V1)					1670 m ³ = 1670 L
Återfylld volym (%)				$V1 / V2$	120%

Tabell. 1. Tabell med volymbereäkningar och resultat vid bestämning av återfylld och återfyllbar volym i borrhålet i Burseryd.

Separationsexperiment

Vid experimentet har en cylinder med diametern 144 mm och längden 1 meter använts (se foto 7A i resultatdelen). I cylindern sitter även en kollektortyngd monterad. Till experimentet har stensmjöl från fältförsöket i Burseryd använts. Vattnet till experimentet har varit kranvatten.

2.2 Metod

Följande avsnitt behandlar dokumenteringen av återfyllning i Burseryd. Det beskriver även metoden som använts för att utföra täthetsmätningen samt separationsexperimentet och kornstorleksanalysen. Under arbetets gång har alla steg fotograferats i den mån tid har funnits.

Vid återfyllning har följande dokumenterats.

- Vilken metod används vid återfyllningen?
- Vilket material har använts vid återfyllningen?
- Hur hanteras eventuella problem som stopp i borrhål under återfyllnaden?
- Hur lång tid tar en återfyllnad med vald metod?
- Krävs det någon speciell kompetens eller utrustning för metoden?
- Är metoden rimlig när det kommer till nerlagd tid för hela återfyllnaden?
- Klarar kollektorslangarna tyngden av stensmjölet?

Under återfyllningen har följande effekter studerats/mäts/beräknats.

- Har energibrunnen återfyllts totalt?
- Ger stensmjölet en acceptabel nivå av täthet?
- Hur förändras trycket i kollektorslangen under återfyllnad?

Metod för mätning av täthet

Mätning av täthet har utförts genom att vid installation av kollektorslangar fäst två oberoende av varandra mät-slangar med diametern 16 mm på kollektorslangen. Slangarna har över en 2 meters sträcka i slutet på varje slang försetts med små hål med diametern 6 mm vilka syftar till att mäta tätheten över den sträckan (se foto 4). Slangarna har fästs så att deras perforerade del hamnar på 32 respektive 200 m med en gemensam startpunkt vid ytan.

Tanken bakom mätmetoden är att om återfyllningen är tät, skall det vid påfyllnad av vatten i dessa slangar vid markytan inte ske någon avsänkning i slangarna. Återfyllnadsmaterialet skall då förhindra att vattnet i slangarna trycks ut i formationen.

Mätning av täthet

Under återfyllningen har jag vid 6 fältbesök utfört mätningar på återfyllnadsmaterialets tätande egenskaper enligt ovan beskrivna metod. Den har utförts genom att mäta avsänkningen i tidigare beskrivna pvc-slangar dels genom okulär bedömning samt mätning av avsänkning över tid.

Kollektortyck

Under återfyllnad har det gjorts mätningar på det tryck som återfyllningsmaterialet utövar på kollektorslangarna nere i borrhålet. Kollektorn sattes under ett arbetstryck (2.5 bar) innan återfyllningen påbörjades. Detta görs för att motverka det hydrostatiska tryck som vattenpelaren och senare återfyllningsmaterialet utövar på kollektorslangarna. Arbetstrycket erhöles genom att koppla på gårdens vattenslang på kollektorslangen, varefter fastighetens högsta vattentryck applicerades på kollektorslangen. (se Bilaga A).

Volymberäkningar borrhål

För att kunna uppskatta volymen stensmjöl som går att hålla ner i borrhålet har det gjorts en beräkning av den totala volym som finns tillgänglig att fylla i borrhålet. Beräkningarna har utgått från borrhålets diameter och djup varefter volymberäkningar gjorts. Därefter har den volym som utgörs av kollektorslangar samt pvc-slangar subtraherats bort från borrhålsvolymen för att få fram en volym som utgörs av tomt utrymme vilken är återfyllnadsbar (se tabell 1). Den återfyllbara volymen är viktig i sammanhanget då den vid avslutad återfyllning kan visa om återfyllnad har lyckats dvs. har allt ledigt utrymme i borrhål fyllts.

För att mäta mängden stensmjöl som förts ner i hålet har volymen av en fylld, struken skottkärra mäts upp och sedan har antalet skottkärror med stensmjöl som förts ner i hålet räknats. En procentandel av hur mycket stensmjöl som borrhålets fyllts med i relation till total återfyllningsbar volym har sedan beräknats genom formeln $V1/V2$, där $V1$ = volymen stensmjöl som använts vid återfyllning och där $V2$ = total återfyllbar volym.

Kornstorleksanalys - Stensmjöl

Vid analysen har ett prov av 0,25 kg stensmjöl siktats. Innan analysen har provet fördelats jämt i 50/50 maskinen för ett jämt analysresultat. Analysen utfördes genom att stensmjölprovet hålls ner i siktstapeln. Därefter sätts stapeln in i skakmaskinen där provet skakas i 15 min. Under tiden som provet skakas faller stensmjölets olika kornstorlekar genom 18 silar med gradvis finare siktstorlekar vilka ligger inom intervallet 22.4 - 0.063 mm.

Därefter har varje enskild kornstorlek från respektive sikt vägts och fått ett procentuellt värde av dess vikt i förhållande till det totala viktprovet.

Värdena läggs sedan in i ett Excel formulär baserat på GRADISTAT, ett kornstorleksanalys program som arbetar tillsammans med Microsoft Office Excel. Programmet konstruerar därefter en kornstorlekskurva samt statistik för provet. Statistiken kan sedan utvärderas med hjälp utav statistiktabeller från Folk and Ward (1957).

Densitetstest - Stensmjöl

Bestämning av densitet gjordes genom att väga upp 1 l av stensmjölet i ett tarerat kärl. Därefter har densiteten



Foto. 6. Brunnens utseende efter avslutad återfyllning (Foto av Jari Leskelä 2012).

beräknats genom formeln $\rho = m / V$ där ρ = enheten för densitet, m = massa och V = volym.

Separationsexperiment – Stenmjöl

Experimentet har utförts mellan den 7- 8 maj 2012 i syfte att simulera hur en återfyllning med stenmjöl ser ut nere i borrhålet. Det avser även att undersöka om det sker några s.k. separationsfenomen som nämns i andra arbeten (Hjulström 2012) Stenmjölet i experimentet är taget från samma stenmjöl som använts vid återfyllningen av energibrunnen i fältexperimentet.

Detta försök ger uppenbart inte en bild av separa-

Borrhåls diameter	Foderrörs diameter	Foderörs tjocklek	Foderrör längd	Grundvattenyta
115 mm	139,7 mm	5 mm	9 m	4 m

Tabell. 2. Brunnstekniska parametrar från brunnen i Burseryd.

tionen som sker i ett djupt borrhål, men kan ge en fingervisning av hur resultatet i energibrunnen i Burseryd kan se ut.

Cylindern har långsamt fått läcka längst ner, vilket har syftet att se om stenmjölet skapar ett impermeabelt lager som därmed tätar läckan.

Cylindern innehåller vid testet en kollektorvikt som vanligtvis återfinns längst ner i energibrunnar. Vikten har placerats i cylindern för att förstärka simulationen vid återfyllning av energibrunnar, vilka vid naturliga förhållanden förutom kollektortyngd, även innehåller kollektorslangar. Cylindern har fyllts med kranvatten till en höjd av 50 cm.

Halva mängden stenmjöl har hållits i stötvis, och den andra hälften har hållits i en jämn ström. Stötvis återfyllning motiveras med att återfyllning utfördes så i fältexperimentet pga. alla stopp i borrhålet. Detta fungerar även som ett sidotest och visar hur separationen blir vid olika metoder av nerhållning av stenmjöl-



Foto. 5A. Borrhål med installerad kollektorslang och slangar för täthetsmätning. Foto. 5B. Återfyllning dag 1 med vatten. Foto. 5C. Nedfösning av stenmjöl i borrhål med fötter. Foto. 5D. Stopp i borrhål under återfyllning. (Foto av Jari Leskelä 2012).

Kornstorlek	0,002	0,006	0,02	0,06	0,2	0,6	2	6	20	60	600	mm
	Fin-silt	Mellan-silt	Grov-silt	Fin-sand	Mellan-sand	Grov-sand	Fin-grus	Mellan-grus	Grov-grus			
Ler	Silt			Sand			Grus			Sten	Block	

Fig. 5. SGFs korngruppsskala i mm för olika typer av kornstorlekar enligt Svenska Geotekniska föreningen.

let.

Under tiden som stensmjölet fått sedimentera klart har även vattenavsänkningen i cylindern noterats. Experimentet avslutas med en okulär beskrivning och fotografering av eventuella separationsfenomen i cylindern.

2.3 Resultat

Följande avsnitt visar de data och resultat som erhållits från dokumenteringen vid fältförsöket i Burseryd. Fältförsökets data har bearbetats och resulterat i ett antal tabeller.

Det visar även resultaten från separationsexperimentet och siktninganalysen som gjorts på stensmjölet från fältförsöket.

Tabell 2 visar de brunnstekniska parametrarna som den återfyllda brunnen har.

Återfyllning

Bilaga A visar de parametrar som mäts under de dagarna som spenderats på platsen för fältförsöket. De dagar av återfyllningen som inte spenderats på platsen har borrhålet återfyllts och mängd stensmjöl noterats av ansvarig brunnstekniker på plats. Foto 5A visar borrhålet innan återfyllning påbörjades. I början av återfyllningen (dag 1) användes en vattenslang för att spola ner stensmjölet i hålet (se foto 5B).

Under resterande dagar av dokumentationen sker återfyllningen på ett uniformt sätt. Metoden som använts är att hålla ner stensmjölet i borrhålet från markytan genom att fösa stensmjölet över borrhålets öppning med hjälp utav spade och fötter (se foto 5C).

Vid återfyllningen sker det frekventa stopp i borrhålet. Det får effekten att borrhålet fylls upp till markytan med en blandning utav stensmjöl och vatten vilket omöjliggör vidare återfyllning (se foto 5D). Ansvarig brunnstekniker lämnar då platsen, för att återkomma ett antal timmar senare för fortsatt återfyllning om vatten sjunkit undan.

Efter ett antal dagar blir återfyllningsprocessen långdragen och långsam (se Bilaga A), med mycket små volymer av återfyllt stensmjöl pga. långvariga stopp i borrhålet. Stoppet i borrhålet försöker man motverka genom att sätta kollektorslangen i rörelse. Som utläses ur Bilaga A blir de dagliga volymerna av nedfört stensmjöl mindre ju längre återfyllningen fortskrider.

Under återfyllningens fyra sista veckor då de dagliga återfyllningsvolymerna är mycket små spenderas ingen tid på platsen. Vid sista mätningen är brunnen återfylld och därför kan ingen data från slutfasen av återfyllningen visas. När återfyllningen anses avslutad har det

gått 35 dagar sen den påbörjades (se foto 6).

Tätetsmätningar

Tätetsstestet syfte är att undersöka om stensmjölet skapar ett tätt återfyllningsmaterial, Stensmjölet skall då hindra den vattenpelare som finns i mätslangarna att tryckas ut genom de perforeringarna som finns i slangarnas sista två meter.

Tätetsmätningarna har sedan de startades vid återfyllningens början visat ett jämt vattenflöde från mätslangarna ut i borrhålet (se bilaga A).

När återfyllningen anses avslutad av ansvariga brunnstekniker utförs en sista avsänkningstest vilket visar en svag avsänkning i båda slangar. Innan vattenpåfyllnad av slangar för avsänkningstest utförs, noteras en avsänkning i båda mätslangarna vilket enligt företagets ägare har inträffat under de senaste 5 dagarna. Detta kan inte konfirmeras då det inte spenderats någon tid på platsen under återfyllningens slutfas eller tidpunkt för avslutad återfyllning.

Kollektorslangarnas tryck

Trycket i kollektorslangarna sattes initialt vid start av återfyllning (2.5 bar). Detta tryck ökade under återfyllningens första dag till 3.0 bar, för att gradvid sjunka under dagen ner till 2.6 bar. Trycket minskades sedan gradvid under följande dagar för att nå en nivå på 1.45 bar 6 dagar efter start av återfyllning. Kollektortrycket har därefter legat på en jämn nivå med variationer på 0.2 bar. Vid avslutande mätningar vid återfyllningens avslut noterades ett tryck på 0.8 bar. Kollektorslangens tryckförändringar utläses i detalj från bilaga A.

Återfyllningsvolym

Volymen stensmjöl som gått åt till återfyllningen under de olika återfyllningsdagarna går att utläsa i detalj från Bilaga A. En sammanställning ger en total volym av 1670 L stensmjöl som använts under återfyllningen. Enligt volymberäkningarna i tabell 2 är den totalt återfyllbara volymen i brunnen 1396 L. Det ger en återfylld volym av stensmjöl som motsvarar 120 % av borrhålets totala volym.

Kornstorleksanalys

Analysen visar att stensmjölets kornstorleksintervall ligger mellan 0,063 mm – 5.6 mm. Stensmjölet har en sorteringsgrad på 1.82 och ett medelvärde på 1.06 som enligt Folk and Ward (1957) Statistiska parametrar klassar stensmjölet som dåligt sorterat. Nämnvärt är att stensmjölet har en mycket hög procentuell andel av kornstorlekar inom sandintervallet (se bilaga B) med ~ 82 %, grushalt 14.06 %, silthalt 3.67 % och en lerhalt

på 0 %.

Analysen kan sammanfattas med att stensmjölet består av en grusig sand med en mindre del silt. Det fullständiga analysresultatet utläses ur bilaga B.

Densitetstest

Resultatet av densitetstestet visade att stensmjölets densiteten ligger på 1560 kg/m^3 .

Separationsexperiment stensmjöl

Experimentet hade som syfte att visa ifall stensmjöl uppvisar separationsfenomen vid återfyllning med tidigare beskriven metod. Som nämns i Joakim Hjulströms (2012) arbete är ett återfyllningsmedel med separationsegenskaper högst olämpligt att använda då det inte blir tät.

Experimentet har bekräftat den tidigare litteraturen, och visar tydliga separationsfenomen (se foto 7A). Cylindern uppvisar en tydlig uppdelning av grövre och

finare kornstorlekar (foto 7A), med flertalet linser av grova partiklar (Foto 7B). Denna uppdelning är ett återkommande fenomen genom hela cylindern, men minskar dock i magnitud längre upp i cylindern.

Längst upp i cylindern har det bildats ett 2 cm lager av finkorniga sediment (foto 7C). Avsänkingsmätningar på cylinderns vatteninnehåll visar att stensmjölet inte bildar ett tätande lager då vattnet sjunker undan. Det lager av finkorniga sediment som återfinns högst upp i cylindern hindrar inte vattnet ovan detta lager från att diffundera genom cylindern.

Dag två av experimentet har allt förutom det kapillärt bundna vattnet i botten av cylindern runnit ut. Det har även bildats torrsprickor (se foto 7D) i det översta lagret av finsediment, vilket är ett tecken på avsaknad av vatten.

Sammanfattningsvis visar experimentet att stensmjöl som hålls ner genom en pelare av vatten, kommer att utsättas för separationsfenomen. Stensmjölet kom-



Foto. 7A. Cylindern från experimentet som visar separationen. Foto. 7B. Sektion av cylindern som visar ett område med grövre sediment. Foto. 7C. Toppen av Cylindern som visar det finkorniga lager vilket bildats vid experimentet. Foto. 7D. Torrsprickor i de finsediment som bildats av separationen (Foto av Jari Leskelä 2012).



Foto. 8A. Aquaread AP-900 vilken använts vid brunnsdokumentering. Foto. 8B. Metallhåv vilken använts vid provtagning av borkkax. (Foto av Jari Leskelä 2012).

mer vidare inte bilda ett tätt lager vilket gäller för såväl de grövre, som de finare sektionerna bildade av separationen.

3 Borrning av energibrunn

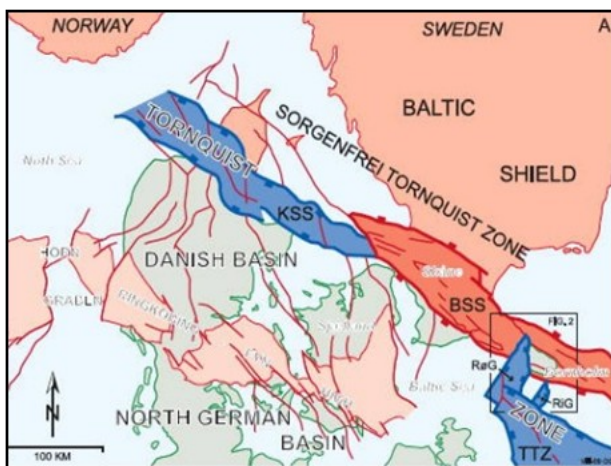


Fig. 6. Bearbetad Strukturkarta av Sorgenfri – Tornkvistzonen (Karta från <http://my.opera.com/nielsol/blog/nielsol/blog/tornquist-zone-bornholm>).

Arbetets andra huvudpunkt rör dokumenteringen vid

borrning av en energibrunn i Helsingborg. Den har utförts under en 18 timmarsperiod mellan den 13-14 april på kanongatan i Helsingborg.

Borrhålet är en av 20 energibrunnar som skall borras på platsen. Brunnarna skall vid färdigställandet återfyllas med ett bentonitbaserat material som heter Muoviterm. Vidare läsning om Muoviterm finns i bilaga E.

Dokumenteringen har för avsikt att finna de sektioner som vid återfyllning kan kontrolleras vid ett framtida täthetstest. Ansvarig brunnborrarentreprenör är Skanska energi värme & kyla, vilka jobbar på uppdrag utav Skanska vilka är huvudentreprenör. Företaget har själva stått för borrhutrusning och vald borrhått metod under fältförsöket.

Uppdraget har varit att dokumentera borrningen. Dokumenteringen har bestått av att ta vatten och borkkaxprov samt utförande av blåskapacitetsmätning och tidtagning av ROP (Rate Of Penetration) vid varje borrhått nivå.

Geologi Helsingborg

Den geologiska modellen i Helsingborg skiljer sig markant från övriga Sverige. Helsingborg ligger i sydvästra Skåne vilken är en gammal geologisk gräns kallad den Fennoskandiska gränssonen. Denna zon avskiljer den Fennoskandiska urbergsskölden (Baltic Shield) och ett sänkningsområde i sydväst, den s.k. danska sänkan (Danish Basin) och illustreras i figur 6.

Tornkvistzonen som är en del av denna gräns har varit mycket aktiv sedan senpaleozoisk tid, och har haft en stor inverkan på sydväst Skånes geologi (Rasmussen 06). Tornkvistzonen utgör gränsen mellan övriga Sveriges mestadels ytligt liggande urberg, och sydväst Skånes nedtryckta urberg. På grund av detta är berggrunden här överlagrad av de 545 Ma (miljoner år) och yngre fanerozoiska sedimentära bergarterna. Dessa överlagras i sin tur av tertiära avlagringar med en ålder av 55 Ma och yngre (Gierup et. al. 1999).

Det gör sammanställningen av en geologisk modell i området svårare. De övre sedimentära avlagringarna i området består utav omväxlande sand och lerstenar av varierande hårdhet.

I området finner man på olika djup den s.k. Kågerödsformationen. Den består av en övre lerstensformation och en undre sandstensformation. Den kännetecknas av en rödbrun-gråbrun lera med inslag av karbonater i dess nedre delar (Mikael Erlström pers, komm. 2012)

3.1 Material och utrustning

Följande avsnitt beskriver de material och den utrustning som kommit att användas under fältarbetets utförande.

Samtliga material och utrustning för borrningen av energibrunnen har borrentreprenören stått för. Mitt jobb har varit att dokumentera borrningen genom att provta och mäta relevanta fältdata.

Fältutrustning

Vid mätning av vattnets kemiska egenskaper har det använts en s.k. flödescell av märket Aquaread AP-900 (se foto 8A). Instrumentet används när man vill mäta en vätskas olika kemiska parametrar. Instrumentets mätsond förs ner i vattenprovet som därefter läser av ett antal värden.

Vid kaxprovtagning har det använts en kraftig metallhåv (se foto 8B) vilken filtrerar bort vatten och de mindre fraktionerna av det krossade berget. Vattenproverna till den kemiska analysen har tagits med ett plastkärl. För mätning av blåskapacitet har en tunna med volymen 165 l använts.

Borrutrustning

Vid borrning av energibrunnen har entreprenören använt en bormaskin av modell MC 450 av märket Comacchio.

Borrkronan som använts vid borrning av de kvartära avlagringarna är av modellen Atlas ringborrkrona. Till det sedimentära berget användes en stiftkrona av modellen DTH.

3.2 Metod

Följande avsnitt rör dokumenteringen av energibrunnsborrningen i Helsingborg. Det beskriver metoderna som använts vid provtagningen av fältdata. Under arbetsgång har alla steg fotograferats i den mån tid har funnits.

Vid loggning har följande mäts.

- Vattentemperatur (°C)
- Vattnets PH (vätejonsinnehåll)
- Elektrisk konduktivitet, EC (ms/m)
- Blåskapacitet (L/min)
- Kaxprov (krossat material från berget).
- Rate of penetration (ROP)

Mätdata har använts för att:

- Dokumentera de geologiska förhållandena i marken på platsen för borrningen.
- Lokalisera vattenförande lager, för utplacering av lämpliga områden till täthetsmätningarna.
- Utvärdering av salthalter i brunnen (EC), och dess eventuella påverkan på återfyllningsmaterial.
- Få ett underlag för att göra bedömningen om hur täthetsförsöket skall läggas upp

Borrning

Vid borstart så användes först Atlas ringborrkrona (se foto 9A) för att borra igenom de okonsoliderade kvartära avlagringarna. Under borrning av kvartära avlagringar drevs det ner foderrör i marken till en nivå där foderröret var nerborrat i minst två meter berg. Därefter byttes borr till den för ändamålet mer lämpliga borrkronan DTH (se foto 9B), vilken är effektiv vid



Foto. 9A. Atlas ringborrkrona vilken användes vid borrning av de kvartära avlagringarna. Foto. 9B. Borrkronan DTH (Down The Hole) som används vid borrning av de sedimentära avlagringarna (Foto av Jari Leskelä 2012).

borrning i sedimentära bergarter. Borrningen fortlöpte därefter tills eftertraktat borrhjup uppnåts.

Mätmetoder.

Följande metoder har använts vid mätning av relevanta brunnsvärden. Dessa kommer att ligga till grund för den framtida täthetskontroll som planeras i brunnen.

Nedan beskrivs metoden för insamling av respektive mätdata. Dessa har vidare bearbetats i Microsoft Excel för konstruktion av brunnsdiagram (Se resultatavsnitt). Jag beskriver även kort vad de olika parametrarna kan indikera vid brunnsloggningen.

Vattenkemiska parametrar

Från borrutrustningen löper en grov slang i vilken borkax och vatten från borrhålets botten trycks upp med hjälp utav tryckluft under borrningen. Slangen sitter fastkopplad till en container där den tömmer sitt innehåll (se foto 10 A). Det är härifrån som borkax och vattenprover tags under loggningen. Proverna har tagits med en plastkärl. Vattenanalysinstrumentets (Aquaread AP-900) mätsond har sedan förts ner i vattenkärlet för analys av vattnets parametrar.

PH

Oftast beror PH variationen på andelen sulfatjoner och organiskt material i bergarten och kan därför kopplas

till en skillnad i litologi. Leror innehåller generellt mer svalvel och organiskt material (Erlström, pers. komm. 2012).

Pga. ovanstående kan en PH-höjning indikera en övergång till en litologi liknande denna t.ex. lersten.

Elektrisk konduktivitet

En förändring av den elektriska konduktiviteten vid loggning av ett borrhål beror ofta på salthalten eller andra kemiska förändringar som relaterar till ledningsförmågan. Det kan också vara en skillnad orsakad mellan "torra" och vattenförande lager (Erlström, pers. komm 2012).

Temperatur

En temperatursänkning är en bra indikator på att man passerat ett lager med hög vattenföring t.ex. en vattenförande spricka eller porös sandsten mm.

Kaxprov

Kaxprov tags från ovan beskrivna flöde från brunnen. Provet har tagits med tidigare beskrivna metallhåv, för att sedan läggas i en märkt provpåse. Dessa har sedan analyserats okulärt och tvättats vid behov. Resultaten har sedan diskuterats vid ett besök på SGU's kontor i Lund där jag studerat områdets geologi samt talat med Mikael Erlström, berggrundsgeolog på SGU.

Blåskapacitet

I containern sitter det en pump fixerad på en viss nivå (se foto 10 B). Den pumpar vattnet via en serie av sammankopplade metallrör ut till en grävd damm (se foto 10 D).

Då brunnen ger olika mängd vatten vid olika nivåer under borringen fylls containern olika snabbt med vatten vilket gör att pumpen "sörplar" vatten i olika hastigheter. Denna egenskap gör att det går att mäta de olika brunnsnivåernas vattenföring. Det görs genom att lossa kopplingen (foto 10 C) som för vattnet från pumpen i Container till damm och mäta tiden det tar för pumpen att fylla en behållare av en viss volym, i detta arbete - en tunna med volymen 165 l.

ROP (Rate of penetration)

Rate of penetration förklaras som den tid det tar för bormaskinen att borra längden av en borrhåll, i detta fall 3 m.

Då olika material är mer eller mindre svåra att borra sig igenom, avspeglas det i borrens penetrationshastighet. Hastigheten kan ge en indikation om vilken typ av geologi som borrhåll borrar sig igenom under det angivna intervallet. Denna information är bra att ha vid korrelation med övriga mätdata om resultatet är svårtolkat.



Foto. 10A. Slangen varifrån vatten och borrhåll från brunnen bärds i på väg ut till containern där borrhåll och vattenprov tags från. Foto. 10B. Pumpen som för vattnet från container ut till reservoar. Foto. 10C. Koppling varifrån blåskapacitet mäts. Foto. 10D. Pumpens utlopp där brunnen vatten samlas i reservoaren (Foto av Jari Leskelä 2012).

Mätningen utförs genom att starta och stanna klockan vid start respektive stopp vid borring av borrhåll.

Loggningschema

Borrhållsloggningen har utförts efter ett fastlagt schema. Vid påbyggnad av ny borrhåll så klockas ROP. Samtidigt som borrhåll jobbar tags borrhållsprov från vattnet som går ut till containern med den avsedda håven. Kaxproven läggs i provpåse och ges ett provnr. Därefter tags vattenprov till den kemiska analysen från samma källa som kaxprov. Medans instrumentet analyserar vattnets PH, temperatur och elektriska konduktivitet klockas ROP om borrhåll nått avsett djup, varefter blåskapacitetstest utförs. När brunnen var färdigborrad skrevs de brunns tekniska parametrarna för den aktuella brunnen ner. De presenteras tillsammans med loggningsresultat i resultatdelen.

3.3 Resultat

Följande avsnitt behandlar de fältdata som erhållits från brunnsdokumenteringen i Helsingborg. Fältdata presenteras i form av ett brunnsdiagram (Bilaga C) och visar geologin som den uppfattas av borrhaxproven. Den presenteras tillsammans med ett antal grafer från de vattenkemiska parametrarna, ROP och blåskapaciteten. Figuren visar även de brunnstekniska parametrarna för brunnen. Brunnsdiagrammets olika parametrar presenteras även i bilaga D grafiskt tillsammans med de intressanta sektionerna i brunnen och utgör tillsammans en illustration av vart en framtida täthetsmätning skulle kunna utföras.

Borrhaxproven är vid provtagning en krossad blandning av den sektion som borren borrar sig igenom vid provtagningen. Proverna ger därför endast en generell bild av varje 3 meters sektion, följden blir att tolkade lagergränser inte är exakta utan en uppskattning. Då borrhaxproven uppvisar en starkt varierande lagerföljd med många små, oregelbundet förekommande lager av sandsten varvat med lersten, var det av grafiska och praktiska skäl bättre att sammanfoga större delar av lagerföljden.

Vid studien av borrhaxprov identifierades ett prov med små kolfragment. Vid studier av en kärnborringsundersökning från närliggande Köpinge där samma intervall finns representerat, identifieras ett antal kollager. Om provet med kolfragment hör till ett kollager går inte att utesluta, men inte heller att bekräfta och har därför inte tagits med i resultatet.

Grafen som illustrerar ROP visar vid 6 m nivån ett nollvärde vilket förklaras av problem vid foder-rörsneddrivningen där neddrivningstiden överskred 30 min. Nollvärdet passar därför grafiskt bättre in än det verkliga värdet.

4 Täthetskontroll och metod

Brunnssektioner av intresse samt motivering

Nedan presenteras de sektioner som jag har valt ut som intressanta vid en framtida täthetsmätning samt en motivering till mina val. Som tidigare nämnts är sektionernas vattenföring prioriterad även om de andra parametrarna diskuteras.

Sektion 1

Sektionen ligger på ett djup mellan 44-50 m. Vattenföringen får i detta område en kraftig ökning med ~ 225 l/min. Vattentemperaturen sjunker två grader under ett 10 m intervall, vilket också indikerar en vattenförande sektion. ROP sjunker även strax innan sektionen, vilket kan indikera en porösare sektion. Kaxprovet för den aktuella sektionen visar en mellanhård grå sandsten som längre ner växellagras av en porösare, ljusare sandsten och lersten. Båda sandstenarna har potential som vattenförande sektioner och den växellagrade lerstenen kan mycket väl bidra med spricksystem via svaghetszoner mellan de olika petrologierna.

Partikeldiameter (mm)	Hastighet (m/s)
5.6	2.708737567
4	1.934812548
2.8	1.354368783
2	0.967406274
1.4	0.677184392
1	0.483703137
0.71	0.343429227
0.5	0.241851568
0.355	0.171714614
0.25	0.120925784
0.18	0.087066565
0.125	0.060462892
0.09	0.043533282
0.063	0.030473298

Tabell 3. Tabell över stenhölets analyserade kornstorlekar samt deras enligt Stokes lag beräknade sjunkhastighet i 10 ° C vatten. Stenhölets densitet på 1.56 kg/l och en tyngdacceleration på 9.82 ms² samt dynamisk viskositet vid 10 ° C har använts vid beräkningarna.

Sektion 2

Sektionen ligger på ett djup mellan 60-70 m. Sektionen ligger i ett område med en kraftig vattenökning på över 300 l/min. Den förväntade temperatursänkningen associerad med ett högre vattenflöde är dock inte synlig även om höjningen av vattenföring här är kraftigare än i tidigare sektion. Konduktivitet och ROP ligger relativt jämn under sektionen och det kraftigt förhöjda PH kan eventuellt förklaras med petrologiskiftet mellan det sandstensdominerande övre lagret och det underliggande lerstenslagret. Potentiella svaghetszoner vid petrologiskiftet kan eventuellt förklara den höga vattenföringen. Sektionen är trots vissa motsägande värden av intresse pga. sin rika vattenföring.

Sektion 3

Sektionen ligger på ett djup av 128-134 m. Sektionen ligger i ett osäkert intervall av blåskapacitetsmätningar (se felkällor), men mätningarna visar trots det en ökning av vattenföring i området. ROP visar en lägre hastighet vilket talar om en mer solid svårborrad sektion. Kaxproven konfirmerar detta vilka visar att sektionen ligger mitt i ett petrologiskifte mellan en växellagrad siltsten/ sandsten/ lersten och en mycket mörk lersten. Då hela den växellagrade sektionen varierar i porositet och konsolideringsgrad är det troligt att om den förhöjda vattenföringen är korrekt, så beror den sannolikt på ett avsnitt av porösare sandsten inom sektionen.

Metodik, material och metod vid täthetsmätning

Följande avsnitt beskriver metoden och arbetsgången

som kan användas vid en framtida täthetsmätning av brunnen i Helsingborg. Själva täthetsmetodikerna utgår från sektion nr två då den står för den största vattenföringen och anses bäst ur metodiksynpunkt.

Att tätta sammanhängande vattenförande sektioner (akvifärer) är av mindre intresse då dessa redan innan brunnen borrades hade kontakt med varandra och vid en väl utförd energibrunnsinstallation inte skall skapa några problem. Målet vid en återfyllning är istället att förhindra vatten mellan separata akvifärer att få kontakt. Det är oftast i dessa fall som tidigare återfyllningar blivit aktuella i de fall där olägenheter väl uppstått.

Med ovanstående mål blir syftet med täthetsmätningen att undersöka ifall återfyllningsmaterialet klarar att isolera två akvifärer på olika djup från varandra.

Täthetsmetodikerna som utgår från ovanstående fakta samt det producerade brunnsdiagrammet avser att undersöka om återfyllningsmaterialet lyckas tätta brunnsavsnitten ovan och under sektion två. Återfyllningsmetoden som skall användas är tryckinjekteringsmetoden och återfyllningsmaterialet är Muoviterm.

Förutsättningar och material för lyckad täthetskontroll

- Närliggande brunn har hydraulisk kontakt med brunn som skall täthetsstestas.
- Pumputrustning för provpumpning.
- Installerade mätrör (PEM eller Metall) på de nivåer som skall mätas.
- Mätrör skall perforeras på de intervall som skall mätas på täthet.
- Luftpump till trycksättning av mätrör.
- Lod för vattennivåmätning.
- Återfyllningsmaterial (Muoviterm) och sand av finare grad.

Arbetsordning och teori

- Förbered grannbrunn till återfylld brunn för provpumpning för säkerställande av hydraulisk kontakt. Om kontakt finns skall vattennivån sjunka i båda brunnarna vid provpumpningen.
- Installation av mätrör på de nivåer som skall mätas på täthet. Detta görs genom att fästa rören på kollektorslangen så att de vid installationen av kollektorslangen hamnar på rätt nivå i brunnen. Rören placeras två meter ovan och två meter under sektion 2 i tätare sektioner av brunnen. Placeringen av rör i tätare sektioner motiveras med att man under mätning vill ha en så minimal påverkan som möjligt från andra sektioner under mätningen.
- Mätrör sätts under tryck vid markytan så att återfyllningsmaterialet under trycket som bildas i brunnen åker upp i rören.
- Brunn återfylls med muoviterm via tremiepipe upp till den nivå som utgör den undre gränsen av sektion 2.
- En bentonitmatta av bentonitpellets läggs ovan

muoviterm för ökad bärighet.

- Brunn fylls med grovsand upp till övre del av sektion 2.
- Återfyllning med Muoviterm via tremiepipe upp till ytan av borrhålet.
- När återfyllning anses färdig, sänks tryck på avsänkingsrören varefter de vattenfylls tills de är helt fyllda.
- Pumpning av grannbrunn startas för grundvattenavsänkning i borrhålet. Pumpning skapar en trycksänkning som fortplantas till det grusfyllda området i brunnen via sektion 2.
- Om återfyllningen vid brunnsens två mätrör under respektive ovanför sektion 2 inte har skapat ett vertikalt tätt lager, kommer tryckfallet i sektion 2 att påverka mätrören så att dess vatten läcker ut i borrhålet. Följande scenario kommer på markytan att noteras som en avsänkning i mätrören.

5 Diskussion och felkällor

Stenmjöl som återfyllningsprodukt

En del entreprenörer använder idag stenmjöl som återfyllningsmaterial. Stenmjöl är billigt och lättillgängligt då det bildas som restprodukt vid krossning av berg vid många bergtakter i landet.

Då en prisvänlig entreprenad ligger i allas intresse, ter det sig naturligt att ett så billigt återfyllningsmaterial som möjligt används.

Problemet med stenmjöl ligger i dess tätande egenskaper vid återfyllning med undersökt metod. Som tidigare litteratur tar upp (Hjulström 2012) kan återfyllning av stenmjöl med använd metod skapa separation. Separationsexperimentet som baserats på samma material som det vid återfyllningen i Burseryd, styrker tidigare litteratur (Hjulström 2012). Stenmjölet uppvisade en separation genom hela cylindern med en del synliga sektioner av grova partiklar bestående av grus och sand. Det lager av finsediment som bildades överst hindrade dessutom inte vattnet i cylindern från att diffundera ut trots att materialet var ansamlat i ett lager.

Vid fältförsöket i Burseryd uppvisade avsänkningstesterna avsänkning under hela testperioden. Avsänkningen indikerar att stenmjölet inte skapar ett tätt borrhål vilket skulle kunna förklaras av separation som i experimentet.

Vid sista fältmätningen observerades en svagare avsänkning än tidigare i mätrören. Mätningarna bekräftar dock att avsänkning sker vid färdigställd återfyllning.

Under arbetets gång har det tillsammans med brunnsteknikern tillika ägaren av företaget som ansvarar för återfyllningen diskuterats möjligheten för en sättning/komprimering av återfyllningsmaterialet över tid. Brunnsteknikern förklarar att det sker en kompaktion under och efter återfyllningen, vilket ger ett tätare material och därmed en förändrad avsänkning vid slutmätningarna. Resonemanget styrkes av den minskade

Bedömning av tillstånd, klorid (salt) i grundvatten				Bedömningsgrunder, grundvatten	
Klass	Benämning	Klorid (mg/l)	Beskrivning	Kloridhalt (mg/l)	Elektrisk konduktivitet (mS/m)
1	Låg halt	< 20		< 20	< 30
2	Måttlig halt	20-50		> 50	> 50
3	Relativt hög halt	50-100		> 100	> 70
4	Hög halt	100-300	Risk för korrosionsangrepp på ledningar	> 300	> 100
A 5	Mycket hög halt	> 300	Risk för smakförändringar	B	

Tabell 4A. Tabell med klassificering av kloridhalter i grundvatten samt en beskrivning av effekter halterna kan ha. Tabell 4B. Tabell med omvandlingsvärden från elektrisk konduktivitet (mS/m) till kloridhalt i grundvatten (mg/l) Tabeller från naturvårdsverket.se (2012)

avsänkningen vid testerna. Det skall dock tilläggas att jag inte medverkat under återfyllningens slutfas och har därför inte haft någon insyn i avsänkingsförändringen under denna period. Då den förändring som ägt rum mellan mätningarna mitt och slutfas är markant är det mer troligt att förutsättningarna för vattnet att sjunka undan i testerna har förändrats under återfyllningens slutfas. Då det är sannolikt att en separation har ägt rum i brunnen verkar det föga troligt att de grövre partiklarna i botten av brunnen kommer att komprimeras till en nivå där de bildar ett tätt lager enligt SGU's rekommendationer.

Ovanstående resonemang ang. stensmjölets tätande egenskaper styrks av kornstorleksanalysen. Analysen visar en sandfraktionsandel av 82 % med 14 % grus och en i sammanhanget liten andel finpartiklar. De sandfraktionerna som finns representerade i analysprovet, har alla olika permeabilitet vilka enligt SGF Notat 2:2005 ligger mellan $1 \cdot 10^{-1}$ - $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. En permeabilitetsberäkning (K-värdet) baserad på kornstorleksanalysen visar dessutom att permeabiliteten ligger under den acceptabla nivå som ställs av SGU. Det talar emot att stensmjöl av denna sort används som återfyllningsmaterial då nästan hela stensmjölprovets partikelstorlek ligger inom ett intervall med för hög permeabilitet. Därför är det inte troligt att sättning eller kompaktion kan täta brunnen till godkänd nivå på sikt.

Med utgång från Stokes lag som rör partiklars sjunkhastighet genom vatten, kommer stensmjölet vid återfyllning från markytan genomgå en separation. I tabell 3 visas mina beräknade sjunkhastigheter för de olika kornstorlekarna ur kornstorleksanalysen av stensmjölet. Den visar tydligt en skillnad i sjunkhastighet. Då kornen teoretiskt uppvisar skilda sjunkhastigheter och sträckan de skall färdas är den samma, blir resultatet att de grövre partiklarna hamnar i botten och de mindre högre upp i brunnen. Med utgång från den separation som skapades i vattenpelaren vid experimentet, bör separationen vid återfyllning av en 200 meter djup vattenfylld energibrunn bli väsentligt större.

Det finns även en ekonomisk aspekt i materialets lämplighet. Metoden är pga. det billigare återfyllningsmaterialet billigare per meter återfyllt hål. Dock ifrågasätter jag tiden det tar att återfylla en energibrunn med denna metod vilket måste läggas in i totalkostnaden.

Det är svårt att räkna ut en exakt kostnad för en

återfyllning med stensmjöl då själva materialet endast står för en mindre kostnad i sammanhanget. Enligt brunnsteknikern i Burseryd kostar en återfyllning liknande den som dokumenterats i Burseryd i snitt 5000-10000 kr per brunn. Av den kostnaden står stensmjölet för 1500-2000 kr och resterande kostnad ligger i arbetstimmar och transportkostnader till och från brunnen. Denna kostnad stiger vid ökande transportavstånd till borrhålet. Det kan jämföras med kostnaden för återfyllning av ett borrhål med en bentonitbaserad produkt liknande den som skall användas vid återfyllningen i Helsingborgs. Enligt Hallberg (pers. komm. 2012) kostar en sådan återfyllning 15000 kr per borrhål. Kostnaden beror i båda fallen naturligtvis på borrhålsdiameter vilket påverkar återfyllningsvolymen.

Resultaten från dokumenteringen visar en återfyllningsperiod på ungefär en månad med frekventa resor fram och tillbaka på daglig basis. Vid fältförsöket har avstånden legat på ca 5 km och därmed har transportkostnaderna varit låga. Vid jobb som utförs på längre avstånd blir dessa frekventa resor till borrhålet inte bara tidskrävande, utan kostar i form av arbetstimmar. Transportkostnader utgör även en faktor vilken måste läggas in i totalkostnaden.

Prismässigt har återfyllningen med stensmjöl en fördel med sitt lägre pris. Men när det kommer till kvalitén på återfyllningen som är den viktigaste faktorn, talar arbetets resultat mot stensmjöl som återfyllningsmaterial med aktuell återfyllningsmetodik. Studerade källor (Remund och Smith 1997, VDI 2001, Paul och Remund 1996, och Allan 1997) rekommenderar dessutom uteslutande återfyllning med tryckinjektering som den enda säkra metoden vid alla återfyllningssituationer då den bl.a. skapar ett homogent återfyllningsmaterial och eliminerar luftfickor mm.

Med ovan nämnd litteraturresultat i kombination med egna, dras slutsatsen att stensmjöls potential som fullgott återfyllningsmaterial med acceptabel täthet vid nuvarande återfyllningsmetodik inte fungerar tillfredsställande.

Vid samtal med brunnsteknikern har det framkommit att man på senare tid provat att pumpa ner en blandning av stensmjöl och vatten i andra brunnar vilket skall förkorta återfyllningsperioden signifikant. Hur denna metod faller ut i hänsyn till återfyllningskvalité och nerlagd tid ligger utanför detta arbetes syf-

te men kan ligga som grund för nya försök. På marknaden finns dessutom stenhjöl med mindre kornstorlekar och större mängd finmaterial. Det kan i kombination med en återfyllningsmetod liknande den rekommenderade tryckinjekteringsmetoden där separation minimeras, utgöra ett intressant fältförsök där en täthetskontroll liknande metodiken beskriven i detta arbete används.

Felkällor

Vid mätning av volymen stenhjöl som fördes ner i borrhålet under återfyllningen så användes inte strukna skottkärror som mått vid de första kärorna som fördes ner i borrhålet. Här fick en uppskattning av antal l som de första kärorna innehöll göras. Konsekvensen blir att den totala volymen av använt stenhjöl kan variera med 100-200 l beroende på hur fel uppskattningen har varit.

Enligt dokumenteringen av återfylld stenhjölsvolym överskreds den totalt återfyllbara volymen i borrhålet med 20 %. Det förklaras av brunnsteknikern som att stenhjöl vid återfyllning försvunnit ut i borrhålets sprickformationer. Att en sådan mängd stenhjöl försvinner ut i formationen verkar dock tveksamt, speciellt med tanke på stenhjölets kornstorleksintervall med merparten inom sandfraktionerna vilka inte sätts i suspension lika enkelt som finare partiklar. Volymfelet beror snarare på den mänskliga faktorn med felaktiga uppgifter om nerförd volym stenhjöl i borrhålet.

Dokumentation av borrhål Helsingborg

Dokumentationen av borrhålet har som avsikt att utforma en täthetsmätning på plats. Borrhålet som loggats avser att ge en generell bild av geologin i hela området där de 20 energibrunnarna skall borraras och ligga till grund för den täthetsmetodik som presenterats.

Vid brunnloggningen uppmättes en jämn elektrisk konduktivitet på ca 50 mS/m vid hela loggningen av den sedimentära berggrunden. Dock observerades en förhöjd elektrisk konduktivitet på 72 mS/m vid 30 meters djup. Detta värde motsvarar enligt naturvårdsverket hemsida (se tabell 7B) en kloridhalt på mer än 100 mg/l. Kloridhalten klassificeras enligt naturvårdsverkets hemsida (se tabell 7A) som en hög halt även om värdet är ett gränsvärde mellan relativ hög halt och hög halt.

Tidigare studier av Karnland (1997a) och Karnland et al (2006) visar att återfyllningsmaterial baserade på bentonit (en blandning av olika lermineral) som utsätts för saltvatten genomgår förändringar i form av minskat svälltryck. Svälltrycket i borrhålet beror på lerblandningens innehåll av svällande lermineral. Mineraler som montmorillonit vilket förekommer i olika mängder i lerblandningar och är det lermineral vilket sväller mest, har ett direkt samband med lerans svälltryck (Hjulström 2012). Ett högt svälltryck bidrar till återfyllningsmaterialets låga permeabilitet då trycket minskar materialets porositet (Karnland et al 2006).

En låg permeabilitet är av största vikt vid en återfyllning, och då Muoviterm är baserat på naturliga

lermineral (<http://www.muovitech.com>) skulle det eventuellt finnas en möjlighet att ett liknande scenario sker i detta fall. Dock finns det inga uppgifter om den ingående mineralsammansättningen i Muoviterm. Forskningen som gjorts på bentonit och salthalt är dessutom gjord i laboratoriemiljö där ren bentonit använts och salthalterna varit så höga som 6.1 M (Karnland 1997a). Detta gör jämförelsen mellan bentonit och saltvatten i laboratorieförsök och förloppet i ett borrhål svårt. En omvandling av brunnens toppvärde med en kloridhalt på ~100 mg/l till ett molvärde som använts i studierna är svårt att genomföra då kloridhalten bestäms av ett antal salter och varierar mellan olika vatten. Då vattnet inte analyserades på individuella klorider vid brunnloggningen är detta inte genomförbart.

Enligt Karnland et al (2006) visade resultaten dessutom att salthalten i sammanhanget hade en liten roll på svälltrycket om man jämför med effekten från typ av bentonit samt densitet. Resultaten visade att svälltryckets sänkning vid kontakt med saltvatten minskade vid en bentonitblandning med högre densitet. Då innehållet av svällande lermineral i Muoviterm är okänt, kan det inte dras några slutsatser ang. dess påverkan av ett grundvatten med en förhöjt kloridhalt som i fältförsöket i Helsingborg.

Felkällor

Vid nerdrivning utav foderör uppstod problem vilket fick konsekvensen att tidtagning utav ROP på en nivå uppgick till 30 min. Värdet speglar inte de generella tiderna vid ROP mätningarna. Värdet passade inte in i brunnendiagrammets grafik och layout och har därför fått ett nollvärde vilket i sammanhanget passade bättre.

Vid undersökningen av borrhålet så uppvisade proverna en mycket varierande lagerföljd med förändringar vid varje prov. Då borrhålet dessutom är en blandning av material från en 3 meters nivå så gör det osäkerheten än större. Vid rekonstruktionen av geologin var det därför nödvändigt att slå ihop delar av sektioner med likartad geologi.

Täthetsmetod och metodik

Täthetsmätningarna vid fältförsöken är båda metoder som utnyttjar billig och okomplicerad utrustning. Metoderna kan pga. den otekniska utrustningen dessutom appliceras vid många olika mätsituationer.

Mätmetodik som skulle utröna stenhjölets tätande egenskaper har visat sej fungera tillfredsställande. Mätningarna visade avsänkning under hela återfyllningsproceduren vilket visar att metoden inte uppvisar några problem relaterade till stopp i mättrör.

Syftet med en återfylld brunn är att det inte skall kunna transporteras något grundvatten mellan brunnens olika sektioner. För att kunna uppfylla detta krav skall återfyllningsmaterialet vara tätt. Det gör metodikens resultat lätta att tolka då ett tätt material inte kommer släppa igenom vattnet som finns i mättrören och därmed inte skapa någon avsänkning. Detta faktum gör metodiken än enklare att följa då det endast

krävs en okulär besiktning av mättrören för utvärdering av resultat.

Återfyllning och täthet

Vid återfyllning av ett borrhål är den viktigaste faktorn att borrhålet blir tätt. Utan ett tätt borrhål är trots allt återfyllningen syfte uppfyllt. Att återfyllningen tätar ett horisontellt vattenflöde mellan ett och samma vattenförande lager spelar mindre roll i sammanhanget då dessa kommer fortsätta att ha kontakt om man bortser från den del som utgör återfyllningsmaterial. Denna typ av tätning förhindrar dock en eventuell kontamination från ytliga föroreningar att nå zonen. Då tekniken vid tätning av foderrör i energibrunnar har förbättrats avsevärt föreligger det dock en minimal risk att detta skulle kunna skapa några problem. Desto viktigare är att återfyllningen tätar brunnens vertikala vattenrörelser. Dessa rörelser involverar ett vattenutbyte mellan tidigare från varandra avskilda lager. De få tillfällen när en återfyllning varit motiverad har det varit vid just sådana fall. Det höjer frågan om hur ofta det är nödvändigt att utföra en total återfyllning - från botten och upp till ytan. Om kontakten mellan två tidigare avskilda lager återfinns på 150 meters djup, och kontakten kan slutas med en återfyllning på denna nivå, varför skall återfyllningen då gå hela vägen upp till markytan? Då en återfyllning dessutom kostar mycket pengar utgör en total återfyllning ett ekonomiskt omotiverat ingrepp.

Ett återfyllt borrhål skall vara tätt. Kravet för acceptabel täthet ligger i nuläget på $1 \cdot 10^{-9}$ m/s (SGU). Har materialet den permeabiliteten eller en som t.ex. finsand kommer vatten oavsett att kunna röra sig genom materialet. Skillnaden mellan ett hög resp. lågpermeabelt material kommer vara tiden det tar för vattnet att röra sig mellan två angivna sträckor. Om en energibrunn skall vara i drift i hundra år vilket är det intervall som det beräknas kunna fungera tillfredsställande, ställs höga krav på återfyllningsmaterialet. Idag vet ingen hur materialet kommer att åldras i borrhålet då forskningen inom återfyllning dels inte fokuserat på detta, men dessutom har inga borrhål varit återfyllda under sådana tidsperioder. Ett återfyllt borrhål kan då eventuellt skapa falska säkerheter då det anses hålla tät men kanske inte gör det. Då långt ifrån alla borrhål som återfylls behöver återfyllas, kan varje återfyllningsfall istället klassas och dömas som det enskilda borrhål som det just är. Att återfyllningar utförs pga. okunskap och antaganden pga. tidigare fall gynnar ingen förutom företagen som tillverkar återfyllningsprodukterna och bör undvikas i största mån.

6 Slutsatser

Att ett återfyllt borrhål skapar ett tätt borrhål är viktigt. Kommunernas oro över öppna borrhål är till stor del beroende av deras okunskap i ämnet. Därför är arbeten av detta slag viktigt, dels för att skapa kunskap om vad

som fungerar och inte, men även för att lyfta frågan om återfyllning alltid behövs. Detta arbete har fastslagit att stenmjöl med nuvarande återfyllningsmetodik inte fungerar tillfredsställande enligt nuvarande täthetskrav. Arbetet har även gjort förarbetet till en framtida täthetsmetodik. Metoden som bygger på en liknande princip som den som utfördes vid täthetsmätningarna av stenmjölet talar för metoden, även om det kommer krävas flertalet fältförsök och eventuella modifieringar innan dess effektivitet och tillförlitlighet kan utvärderas.

7 Tack

Ett stort tack till min handledare Johan Barth, VD på Geotec för att han gav mej chansen att skriva detta arbete och för allt stöd och goda råd under arbetets gång. Jag vill även tacka min andra handledare Mikael Calner, Professor i berggrundsgeologi på lunds universitet för hans uppmuntrande ord och råd när stressen smugit sig på. Sist men absolut inte minst vill jag tacka min flickvän och sambo Therese Kvant för hennes fantastiska stöd, goda mat och tålmod när jag jobbat sena kvällar. Alla ni andra som inte är nämnda, ni vet vilka ni är och ert stort tack till er med såklart!

7 Referenser

Allan, M. L., 1997: Thermal conductivity of cementitious grouts for geothermal heat pumps. *Progress report FY 1997*. Brookhaven National Laboratory. 50 s.

Allan, M. L. och Philippacopoulos, A. J., 1998: Thermal conductivity of cementitious grouts for geothermal heat pumps. *Progress report FY 1998*. Brookhaven National Laboratory. 78 s.

Andersson, O., Barth, J., Hellström, G., Geoenergi-gruppen., 2009: Geoenergi - Underlagsrapport Vägval energi. Geotec – Svenska Borrentreprenörers Branschorganisation. 17 s

Barth, J., 2011. Samtal. VD Geotec

BAYER, P., BLUM, P. & HAEHNLEIN, S., 2010: International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and sustainable energy reviews* 14, 2611-2625

Deponering av avfall. Handbok 2004:2 med allmänna råd till förordningen (2001:512) om deponering av Avfall. 15 kap. 34 § miljöbalken (1998:808)

Erlström, M., 2012. Samtal. Berggrundsgeolog SGU.

Geotec., 2009: Värme och kyla från en miljövänlig källa - En informationsskrift om geoenergi från Svens-

ka Borrentreprenörers Branschorganisation.
<http://www.geotec.se>. 6 s.

Gierup, J., Kübler, L., Pamnert, M., Persson, M.,
Thunholm, B., Wahlgren, C.-H., Wikman, H., 1999:
Översiktsstudie av Skåne län (urbergsdelen) - Geolo-
giska förutsättningar. Sveriges Geologiska Undersök-
ning (SGU) ISSN 1402 – 3039

Hellström, G., 2002: Borehole heat exchangers state of
the art. *Energy conservation through energy storage.*
Annex 13. International Energy Agency. 76 s.

Hjulström, J., 2012: Återfyllning av borrhål i geoener-
gisystem: konventioner, metod och material. *Examens-*
arbeten i geologi vid Lunds universitet, Nr. 189. 29 s

Karnland, O., 1997a: Bentonite swelling pressure in
strong NaCl solutions. Correlation between model
calculation and experimentally determined data. SKB
TR-97-31. Svensk kärnbränslehantering AB. 30 s.

Karnland, O., Nilsson, U. och Olsson, S., 2006: Mine-
ralogy and sealing properties of various bentonites
and smectite-rich clay materials. SKB TR-06-30.
Svensk kärnbränslehantering AB. 117 s.

Miljöbalken et. al., 1998:808. 1999.

Muovitech 2012. Produktinfo Muoviterm.
<http://www.muovitech.com>
Hämtat 2012-05-12

Naturvårdsverket., 2011: Naturvårdsverkets handbok
2010:5 om vattenskyddsområde. ISSN 1650-2361.
ISBN 978-91-620-0170-4. 136 s.

Naturvårdsverket 2004. Sveriges miljömål.
[http://www.naturvardsverket.se/sv/Start/Sveriges-
miljomal/Ett-hallbart-samhalle/Hallbar-utveckling](http://www.naturvardsverket.se/sv/Start/Sveriges-
miljomal/Ett-hallbart-samhalle/Hallbar-utveckling)
Hämtat 2012-04-15

Paul, N. D. och Remund, C. P., 1997: Physical, ther-
mal, and hydraulic properties of bentonite-based
grouts. EPRI TR-109160. *Electric power research*
institute. 71 s.

Rasmussen, K., 2006: En provenansstudie av Kåge-
rödsformationen i NV Skåne – Tungmineral och petro-
grafi. *Examensarbeten i Geologi vid Lunds universitet*.
nr. 201. 21 s

Remund, C. P. och Smith, M. D., 1997: Grouting for
vertical geothermal heat pump systems. EPRI TR-
109169. *Electric power research institute och National*
Rural Electric Cooperative Association. 71s.

Risberg, G., 2011: Samtal. Sveriges Geologiska Un-
dersökning. Avdelningschef för mark och grundvatten.

Tucker, M. E., 2001: *Sedimentary petrology: An intro-*
duction to the origin of sedimentary rocks (third edi-
tion). Blackwell Publishing, Oxford. 262 s.

SGU., 2012: Berggrundskarta. Kartgeneratorm.
Hämtat 2012-05-31

SGU et. al., 2008: Normbrunn – 07, Att borra brunn
för energi och vatten – en vägledning. *Normförfarande*
vid utförande av vatten- och energibrunn. s 40.
<http://www.sgu.se>

Svenska Värmepumpföreningen (SVEP)., 2004: Svep-
fakta om energibrunn. 2 s

VDI, 2001: Thermal use of the underground – ground
source heat pump systems. *Association of German*
engineers (VDI). Rapport nr. 4640 del 2. 43 s.

8 Bilagor

Bilaga A

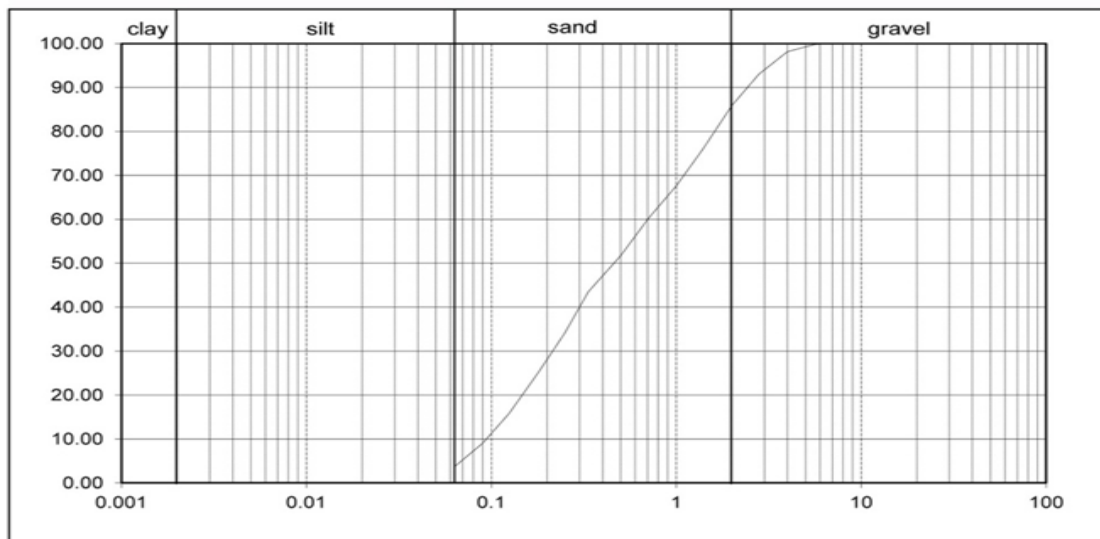
Datum/klockslag	Anteckningar mm	Kollektortryck	Avsänkningstest	Volym stenmjöl
Torsdag 29/3 (dag 1)	Grundvattenyta: 4 meter			
13:30	Återfyllning startar	2,5 bar		0 l
14:10	Kollektortryck ökar	3,0 bar		
14:30	Stopp i borrhål	2,8 bar		
15:20	Halvstopp i borrhål	2,7 bar		
16:00	Stopp slut, återfyllning återupptags	2,6 bar		
16.30	Stopp i borrhål, återfyllning avslutas för dagen. Avsänkningstest 200 m rör: (~1 cm/sek) 32 m rör ger vatten.	2,6 bar	Okulär mätning	~370 l
Fredag 30/3 (dag 2)	Vattenyta borrhål 1,8 m under foderör			
13:30	Återfyllning startar	2,0 bar		~370 l
13:35	Stopp i borrhål			
14:00	Avsänkningstest 200 m rör: (~2 cm/sek) 32 m rör ger vatten	2.0 bar	Okulär mätning	
15:00	Avsänkningstest borrhål: 0,09 cm/min	2.0 bar	Tidtagning	
16:00	Återfyllning avslutas pga. stopp i borrhål totalt ~50 l stenmjöl ner totalt dag 2	2.0 bar		~420 l
Söndag 1/4	Återfyllning när jag inte är på plats (~140 l)	-		~560 l
Måndag 2/4	Återfyllning när jag inte är på plats (~140 l)	-		~700 l
Tisdag 3/4 (dag 6)	Återfyllning av ~40 l innan jag är på plats. Vattenyta borrhål 15 cm under foderör	-		~740 l
09:30	Start återfyllning, stopp direkt (30 sek)	1.45 bar		
14:00	Avsänkningstest 200 m rör (~2 cm/sek) 32 m rör ger vatten	-	Okulär mätning	
14:11	stopp i hål mellan 09:30 tills nu, stopp direkt efter ~ 10 l	1,45 bar		
14:30	Avsänkning borrhål: (0,45 cm/ min)	-	Tidtagning	
14.3	Avsänkningstest 200 m rör (~1 cm/sek) 32 m rör ger vatten	1,5 bar	Okulär mätning	
Efter 15:00	~20 l stenmjöl ner i borrhål när jag inte är på plats	-		~770 l

Bilaga A

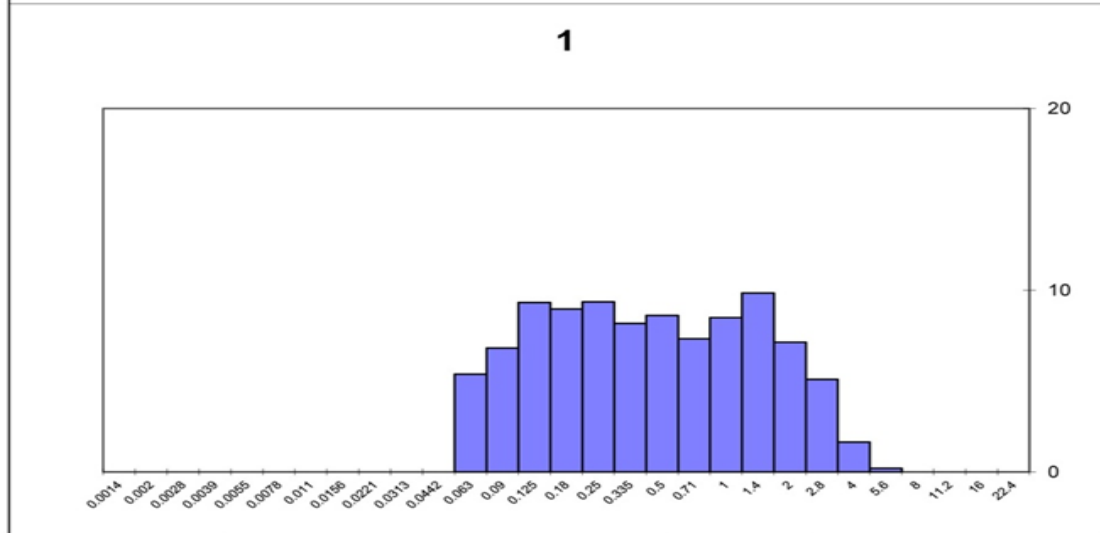
Datum/klockslag	Anteckningar mm	Kollektortryck	Avsänkningstest	Volym stenmjöl
onsdag 4/4	~90 l hålls i när jag inte är på plats	-		~860 l
Torsdag 5/4 (dag 8)	~ 80 l hålls i innan min ankomst			~940 l
	Vattenyta borrhål 10 cm under foderör			
09:30	Start återfyllning, Stopp direkt	1.4 bar		
10:20	Avsänkningstest 200 m rör: (~0.5cm/sek) 32 m rör ger vatten		Okulär mätning	
11:14	Avsänkning borrhål: (0,58 cm/min)		Tidtagning	
13:00	Återfyllning Avslutas pga. stopp i brunn stötvis nerfösning av stenmjöl ~ 10 l	1.4 bar		950 l
Tisdag 10/4 (dag 13)				
12:30	Avsänkningstest 200 m rör, (~0.5cm/sek) 32 m rör ger vatten	1,3 bar	Okulär mätning	1040l
Onsdag 9/5 (dag 42)				
09:45	Slutmätning av återfylld brunn. Avsänkningstest 200 m rör: (~1.7*10 ⁻⁴ cm/ sek) Avsänkningstest 32 m rör: (~1.1*10 ⁻⁴ cm/ sek)	0,8 bar	Okulär mätning	1670l

Bilaga A. Tabell med uppmätta värden från fältförsöket i Burseryd.

Bilaga B



1



Beräkningar [%]		Prov: 1	
grushalt	14.06		
sandhalt	82.27		
silthalt	3.67		
lerhalt	0.00		
Statistiska värden enligt Trask			
medelkornstorlek	0.66449808	d25	0.17894231
sorteringsgrad	2.75	d50	0.46619512
		d75	1.34835681
Statistiska parametrar enligt Folk & Ward			
Medianvärde	1.10	Phi05	-1.70251903
Medelvärde	1.06	Phi16	-0.91222318
Sortering	1.82	Phi25	-0.43120232
Skevhet	-0.02	Phi50	1.10099419
Kurtosis	0.78	Phi75	2.48243357
		Phi84	2.99026697
		Phi95	3.84269753

Bilaga B

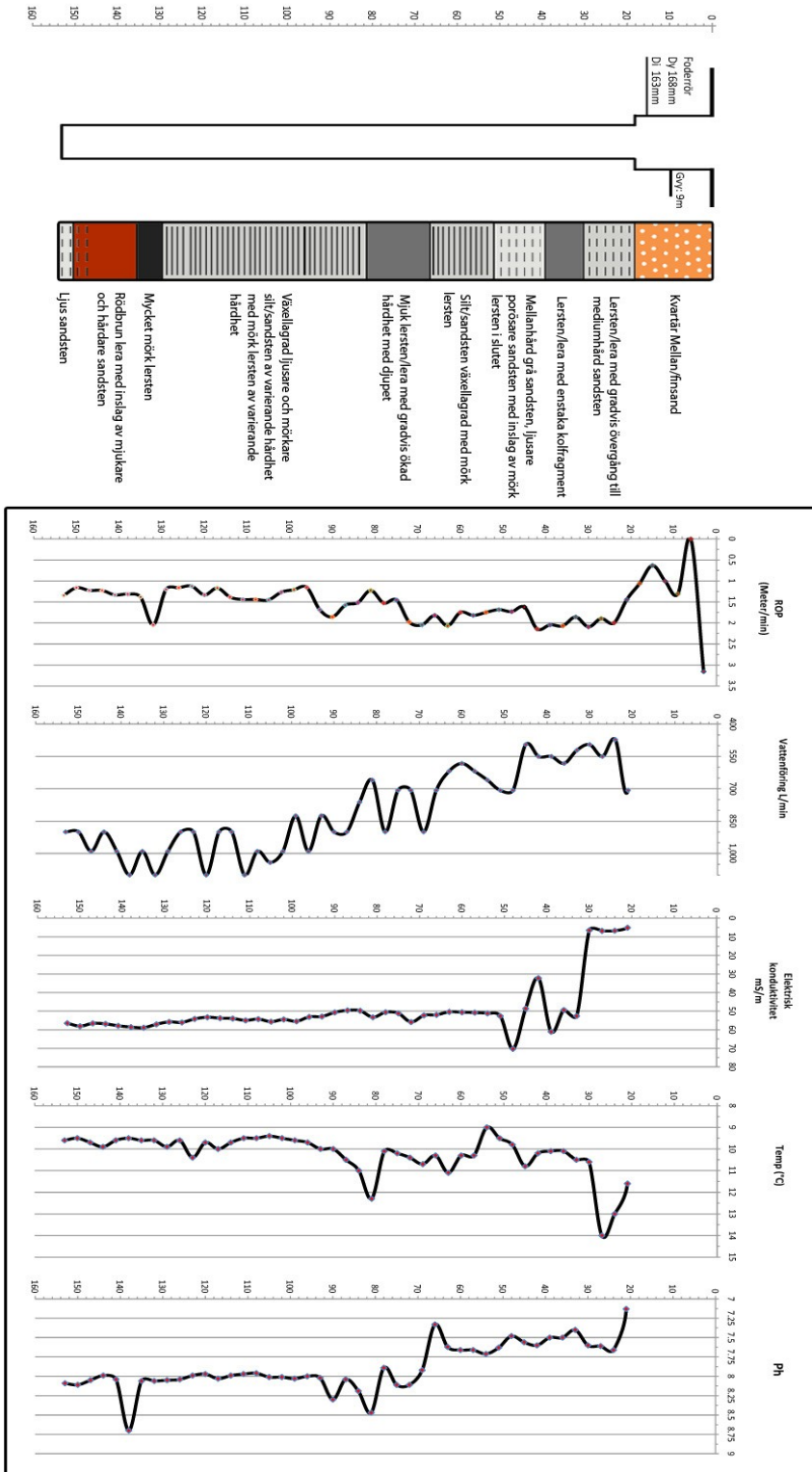
kornstorleksanalys

Provnummer	1				
vikt före tvätt [g]	252				
vikt efter tvätt [g]	252				
borttvättat material [g]	0				
kornstorlek d [mm]	vikt [g]	viktprocent	summa-% > d	summa-% < d	
22.4		0.00	0.00	100.00	
16		0.00	0.00	100.00	
11.2		0.00	0.00	100.00	
8		0.00	0.00	100.00	
5.6	0.5	0.20	0.20	99.80	
4	4.1	1.63	1.83	98.17	
2.8	12.8	5.10	6.93	93.07	
2	17.9	7.13	14.06	85.94	
1.4	24.7	9.84	23.90	76.10	
1	21.3	8.49	32.39	67.61	
0.71	18.4	7.33	39.72	60.28	
0.5	21.6	8.61	48.33	51.67	
0.355	20.5	8.17	56.49	43.51	
0.25	23.5	9.36	65.86	34.14	
0.18	22.5	8.96	74.82	25.18	
0.125	23.4	9.32	84.14	15.86	
0.09	17.1	6.81	90.96	9.04	
0.063	13.5	5.38	96.33	3.67	
siktboten	9.2				
borttvättat material	0				
material < 0,063	9.2				
summa	251				
differens	1				

Bilaga B. Tabeller och kurvor med resultaten från kornstorleksanalysen av stenmjölet från återfyllningen i Burseryd.

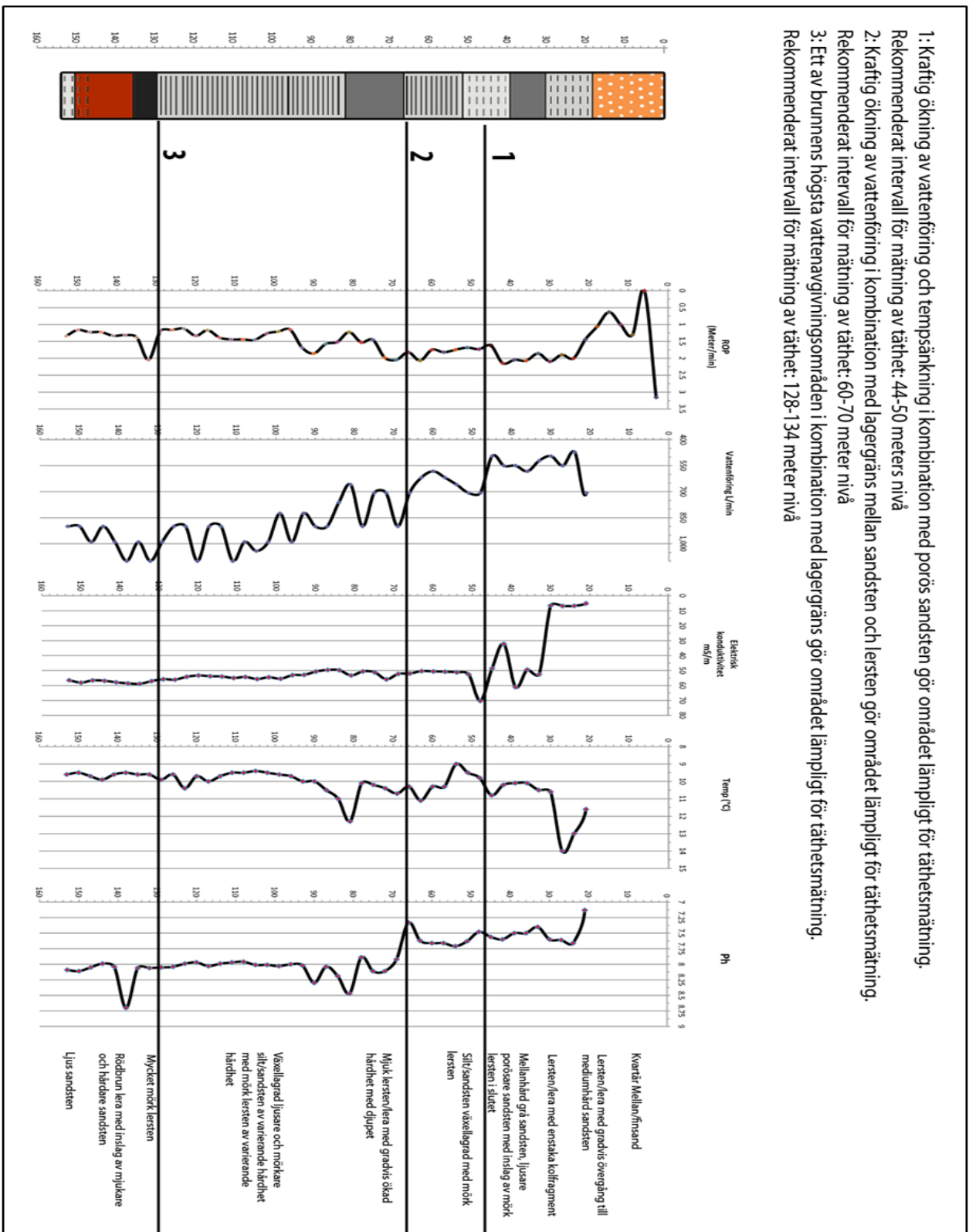
Bilaga C

Projektbenämning	Projekt nr	Lokal	Borrhål utfört	Djupskala
Examensarbete		Kanonngatan 2, Helsingborg	120413-120414	1:15
Borrenreprehör:	Skånska Energi Värme och Kyla	Geodokumentör:	Jari Leskelä	
Borrförman:	Dan Damborg	Datamanställning:	Jari Leskelä	
Borrutrustning:	Atlas/DTH			



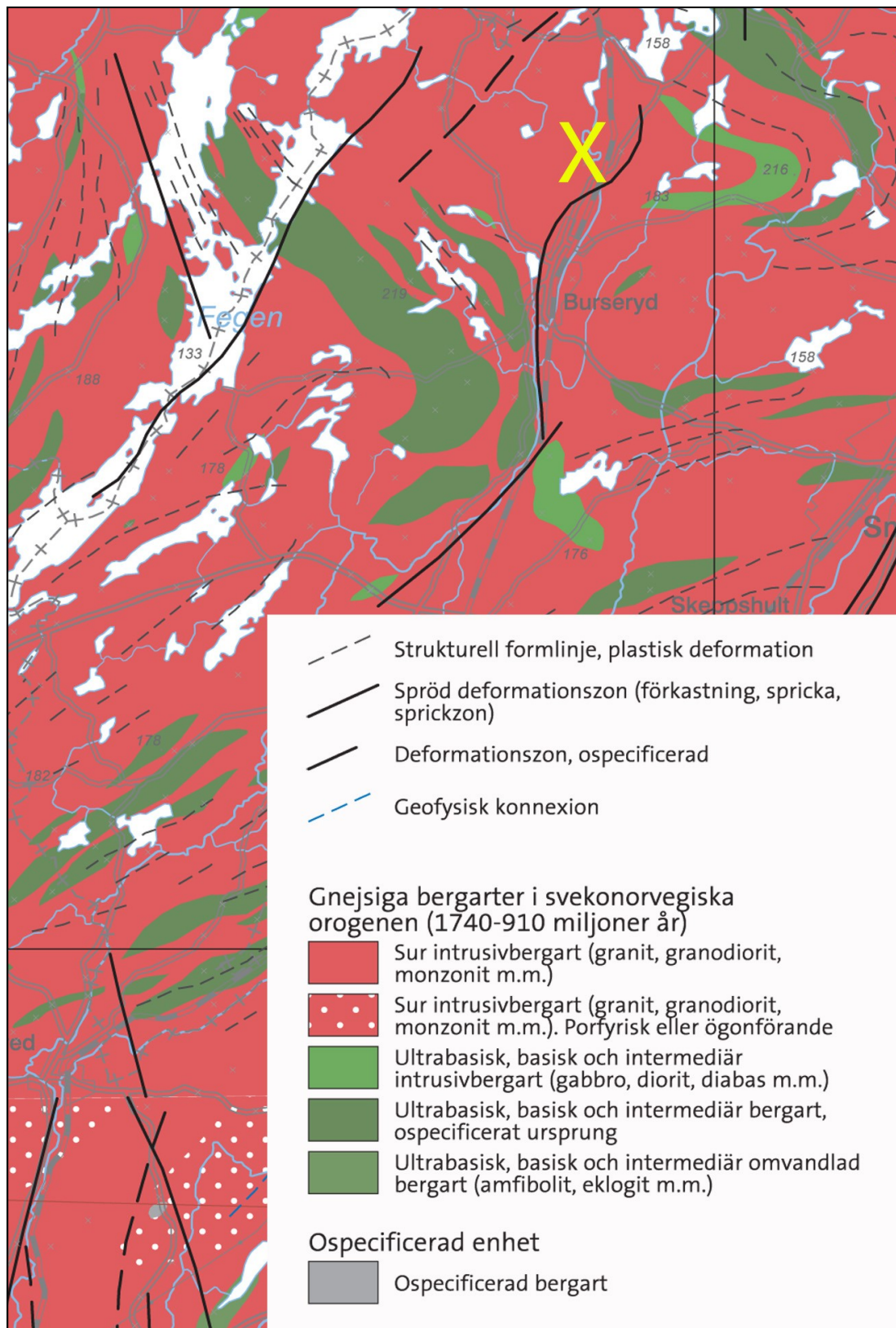
Bilaga C. Brunnediagram baserat på borrhax och vattenprover från brunnslagningen av energibrunnen i Helsingborg.

Bilaga D



Bilaga D. Brunnssdiagram baserat på borrkax och vattenprover från brunnsslogningen av energibrunnen i Helsingborg. Diagrammet har tre sektioner markerade vilka valdes ut till kontrollmetodiken av brunnen i Helsingborg.

Bilaga E



Bilaga E. Berggrundskarta över Burseryd där energibrunnen som återfylldes med stennjöl ligger. Brunnens ungefärliga läge är markerat med ett gult x på kartan. Kartan innehåller även en legend som visar områdets bergarter och sprickzoner. Bilden är en modifierad version av SGU's berggrundskarta från deras kartgenerator. [Www.sgu.se](http://www.sgu.se)

**Tidigare skrifter i serien
”Examensarbeten i Geologi vid Lunds
Universitet”:**

261. Lewerentz, Alexander, 2010: On the occurrence of baddeleyite in zircon in silica-saturated rocks. (15 hskp)
262. Eriksson, Magnus, 2010: The Ordovician Orthoceratite Limestone and the Blommiga Bladet hardground complex at Horns Udde, Öland. (15 hskp)
263. Lindskog, Anders, 2010: From red to grey and back again: A detailed study of the lower Kundan (Middle Ordovician) ‘Täljsten’ interval and its enclosing strata in Västergötland, Sweden. (15 hskp)
264. Rääf, Rebecka, 2010: Changes in beyrichiid ostracode faunas during the Late Silurian Lau Event on Gotland, Sweden. (30 hskp)
265. Petersson, Andreas, 2010: Zircon U-Pb, Hf and O isotope constraints on the growth versus recycling of continental crust in the Grenville orogen, Ohio, USA. (45 hskp)
266. Stenberg, Li, 2010: Geophysical and hydrogeological survey in a part of the Nhandugue River valley, Gorongosa National Park, Mozambique – Area 1 and 2. (45 hskp)
267. Andersen, Christine, 2010: Controls of seafloor depth on hydrothermal vent temperatures - prediction, observation & 2D finite element modeling. (45 hskp)
268. März, Nadine, 2010: When did the Kalahari craton form? Constraints from baddeleyite U-Pb geochronology and geo-chemistry of mafic intrusions in the Kaapvaal and Zimbabwe cratons. (45 hp)
269. Dyck, Brendan, 2010: Metamorphic rocks in a section across a Sveconorwegian eclogite-bearing deformation zone in Halland: characteristics and regional context. (15 hp)
270. McGimpsey, Ian, 2010: Petrology and litho-geochemistry of the host rocks to the Nautanen Cu-Au deposit, Gällivare area, northern Sweden. (45 hp)
271. Ulmius, Jan, 2010: Microspherules from the lowermost Ordovician in Scania, Sweden – affinity and taphonomy. (15 hp)
272. Andersson, Josefin, Hybertsen, Frida, 2010: Geologi i Helsingborgs kommun – en geoturistkarta med beskrivning. (15 hp)
273. Barth, Kilian, 2011: Late Weichselian glacial and geomorphological reconstruction of South-Western Scania, Sweden. (45 hp)
274. Mashramah, Yaser, 2011: Maturity of kerogen, petroleum generation and the application of fossils and organic matter for paleotemperature measurements. (45 hp)
275. Vang, Ina, 2011: Amphibolites, structures and metamorphism on Flekkerøy, south Norway. (45 hp)
276. Lindvall, Hanna, 2011: A multi-proxy study of a peat sequence on Nightingale Island, South Atlantic. (45 hp)
277. Bjerg, Benjamin, 2011: Metodik för att förhindra metanemissioner från avfallsdeponier, tillämpad vid Albäcksdeponin, Trelleborg. (30 hp)
278. Pettersson, Hanna, 2011: El Hicha – en studie av saltstäppsediment. (15 hskp)
279. Dyck, Brendan, 2011: A key fold structure within a Sveconorwegian eclogite-bearing deformation zone in Halland, southwestern Sweden: geometry and tectonic implications. (45 hp)
280. Hansson, Anton, 2011: Torvstratigrafisk studie av en trädstamshorisont i Viss mosse, centrala Skåne kring 4 000 - 3 000 cal BP med avseende på klimat- och vattenståndsförändringar. (15 hp)
281. Åkesson, Christine, 2011: Vegetationsutvecklingen i nordvästra Europa under Eem och Weichsel, samt en fallstudie av en submorän, organisk avlagring i Bellinga stenbrott, Skåne. (15 hp)
282. Silveira, Eduardo M., 2011: First precise U-Pb ages of mafic dykes from the São Francisco Craton. (45 hp)
283. Holm, Johanna, 2011: Geofysisk utvärdering av grundvattenskydd mellan väg 11 och Vombs vattenverk. (15 hp)
284. Löfgren, Anneli, 2011: Undersökning av geofysiska metoders användbarhet vid kontroll av den omättade zonen i en infiltrationsdamm vid Vombverket. (15 hp)
285. Grenholm, Mikael, 2011: Petrology of Birimian granitoids in southern Ghana - petrography and petrogenesis. (15 hp)
286. Thorbergsson, Gunnlaugur, 2011: A sedimentological study on the formation of a hummocky moraine at Törnåkra in Småland, southern Sweden. (45 hp)
287. Lindskog, Anders, 2011: A Russian record

- of a Middle Ordovician meteorite shower: Extraterrestrial chromite in Volkhovian-Kundun (lower Darriwilian) strata at Lynna River, St. Petersburg region. (45 hp)
288. Gren, Johan, 2011: Dental histology of Cretaceous mosasaurs (Reptilia, Squamata): incremental growth lines in dentine and implications for tooth replacement. (45 hp)
289. Cederberg, Julia, 2011: U-Pb baddelyit dateringar av basiska gångar längs Romeleåsen i Skåne och deras påverkan av plastisk deformation i Protoginzonen (15 hp)
290. Ning, Wenxing, 2011: Testing the hypothesis of a link between Earth's magnetic field and climate change: a case study from southern Sweden focusing on the 1st millennium BC. (45 hp)
291. Holm Östergaard, Sören, 2011: Hydrogeology and groundwater regime of the Stanford Aquifer, South Africa. (45 hp)
292. Tebi, Magnus Asiboh, 2011: Metamorphosed and partially molten hydrothermal alteration zones of the Akulleq glacier area, Paamiut gold province, South-West Greenland. (45 hp)
293. Lewerentz, Alexander, 2011: Experimental zircon alteration and baddeleyite formation in silica saturated systems: implications for dating hydrothermal events. (45 hp)
294. Flodhammar, Ingrid, 2011: Lövestads åsar: En isälvsavlagring bildad vid inlandsisens kant i Weichsels slutskede. (15 hp)
295. Liu, Tianzhuo, 2012: Exploring long-term trends in hypoxia (oxygen depletion) in Western Gotland Basin, the Baltic Sea. (45 hp)
296. Samer, Bou Daher, 2012: Lithofacies analysis and heterogeneity study of the subsurface Rhaetian–Pliensbachian sequence in SW Skåne and Denmark. (45 hp)
297. Riebe, My, 2012: Cosmic ray tracks in chondritic material with focus on silicate mineral inclusions in chromite. (45 hp)
298. Hjulström, Joakim, 2012: Återfyllning av borrhål i geoenergisystem: konventioner, metod och material. (15 hp)
299. Letellier, Mattias, 2012: A practical assessment of frequency electromagnetic inversion in a near surface geological environment. (15 hp)
300. Lindenbaum, Johan, 2012: Identification of sources of ammonium in groundwater using stable nitrogen and boron isotopes in Nam Du, Hanoi. (45 hp)
301. Andersson, Josefin, 2012: Karaktärisering av arsenikförorening i matjordsprofiler kring Klippans Läderfabrik. (45 hp)
302. Lumetzberger, Mikael, 2012: Hydrogeologisk kartläggning av infiltrationsvattentransport genom resistivitetsmätningar. (15 hp)
303. Martin, Ellinor, 2012: Fossil pigments and pigment organelles – colouration in deep time. (15 hp)
304. Rådman, Johan, 2012: Sällsynta jordartsmetaller i tungsand vid Haväng på Österlen. (15 hp)
305. Karlstedt, Filippa, 2012: Jämförande geokemisk studie med portabel XRF av obehandlade och sågade ytor, samt pulver av Karlshamnadiabas. (15 hp)
306. Lundberg, Frans, 2012: Den senkambriska alunskiffern i Västergötland – utbredning, mäktigheter och facietyper. (15 hp)
307. Thulin Olander, Henric, 2012: Hydrogeologisk kartering av grundvattenmagasinet Ekenäs-Kvarndammen, Jönköpings län. (15 hp)
308. Demirer, Kursad, 2012: U-Pb baddeleyite ages from mafic dyke swarms in Dharwar craton, India – links to an ancient supercontinent. (45 hp)
309. Leskelä, Jari, 2012: Loggning och återfyllning av borrhål – Praktiska försök och utveckling av täthetskontroll i fält. (15 hp)



LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen
Lunds universitet
Sölvegatan 12, 223 62 Lund