

Återfyllning av borrhål i geoenergisystem: konventioner, metod och material

Joakim Hjulström

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,
kandidatarbete, nr 298
(15 hp/ECTS credits)



Geologiska institutionen
Lunds universitet
2012

Återfyllning av borrhål i geoenergi- system: konventioner, metod och material

Kandidatarbete
Joakim Hjulström

Geologiska institutionen
Lunds universitet
2012

Innehållsförteckning

1	Introduktion	5
1.1	Borrteknik och borrhålet	6
1.2	Problemens omfattning	6
1.3	Materialkrav och täthet	6
2	Metod och material	7
2.1	Fyllningsmetoder	7
2.1.1	Slurry från ytan	8
2.1.2	Fast material från ytan	8
2.1.2.1	Stenmjöl	8
2.1.3	Tryckinjektering	9
2.2	Återfyllning med cementbaserade material	11
2.2.1	Ingredienser och effekt på materialen	11
2.2.2	Värmeavgivning	13
2.2.3	Kontaktförlust mellan material och kollektorslang	14
2.2.4	Frysning	15
2.2.5	Uttorkning	15
2.2.6	Miljöproblem	15
2.3	Återfyllning med bentonitbaserade material	16
2.3.1	Ingredienser och effekt på materialen	17
2.3.2	Frysning	18
2.3.3	Uttorkning	19
2.3.4	Saltvatten	19
2.3.5	Miljöproblem	20
3	Återfyllning och geoenergisystem	20
3.1	Kostnad att återfylla	20
3.1.1	Delvis återfyllt borrhål	20
3.2	Bucklingstryck, densitet och maximalt borrhålsdjup	21
3.3	Frysproblem i återfyllda borrhål	23
3.4	Val av metod och material	25
3.4.1	Material på marknaden	25
4	Slutsatser	27
5	Tack	28
6	Referenser	28

Återfyllning av borrhål i geoenergisystem: konventioner, metod och material

JOAKIM HJULSTRÖM

Hjulström, J., 2012: Återfyllning av borrhål i geoenergisystem: konventioner, metod och material. *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet*, Nr 298, 29 sid. 15 hp.

Sammanfattning: Ett geoenergisystem består av ett eller flera borrhål, energibrunnar, som via värmeväxlare är kopplade till en värmepump. I en del fall är det önskvärt att borrhålen återfylls. Detta görs för att förhindra spridning av föroreningar från ytan och mellan olika akvifärer som borrhålet kan kortsluta. Utomlands görs detta regelbundet och omfattande forskning har bedrivits på området. I Sverige saknar dock branschen klara riktlinjer och tillräcklig kunskap om hur och med vad det ska göras.

Den här litteraturstudien är en förstudie till en handledning om hur återfyllning ska ske. Syftet är att ge en bred överblick över forskningsläget och konventionerna främst i Sverige, USA och Tyskland med fokus på vilka material man använder sig av och varför, samt vilken teknik som används. Ett försök att utreda hur bentonit reagerar på frysning och på salt grundvatten har också gjorts.

Studien visar att när borrhål återfylls i Tyskland och USA görs det nästan uteslutande genom tryckinjektering nerifrån och upp via ett påfyllnadsrör som sänks ner tillsammans med kollektorslangarna. Utifrån den undersökta litteraturen har slutsatsen nåtts att det främst är cementbaserade och bentonitbaserade material med olika tillsatser som används utomlands. Tillsatserna förstärker bland annat materialens vidhäftning till kollektorslangen samt deras termiska konduktivitet, frystålighet och injekterbarhet.

De cementbaserade materialen stelnar generellt i borrhålet. Därmed förlorar de förmågan att följa kollektorslangen som drar ihop sig då köldbärandens temperatur sjunker när värme utvinns ur borrhålet. Detta ökar borrhålets permeabilitet och hindrar värmeöverföringen mellan formation och köldbärare vilket försämrar systemets funktion.

Den främsta svagheten hos de bentonitbaserade material är en dålig motståndskraft mot uttorkning som orsakar stora volymförluster och kraftig försämring av dess termiska konduktivitet. Dessutom har materialen ofta lägre termisk konduktivitet än de cementbaserade.

Baserat på litteraturen som studerats i den här undersökningen har inga definitiva slutsatser kunnat dras angående bentonitbaserade materials reaktion på nedfrysning och salt grundvatten. Vid val av material är det dock klart att hänsyn måste tas till den geologiska och hydrogeologiska miljön, samt vilka hot man vill skydda sig mot övervägas.

Nyckelord: Geoenergi, bergvärme, återfyllning, bentonit, borrhål, energibrunn.

Handledare: Johan Barth, Mikael Calner

Ämnesinriktning: Berggrundsgeologi

Joakim Hjulström, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige. E-post:

JoakimLH@hotmail.com

Grouting of boreholes in shallow geothermal energy systems: conventions, methods and materials

JOAKIM HJULSTRÖM

Hjulström, J., 2012: Grouting of boreholes in shallow geothermal energysystems: conventions, methods and materials. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 298, 29 pp. 15 hp (15 ECTS credits).

Abstract: A shallow geothermal energy system consists of one or several boreholes connected to a heat pump through borehole heat exchangers. In some circumstances it's desirable that the boreholes are grouted. This is carried out primarily to reduce the risk of contaminants being transported from the surface and between aquifers that the borehole penetrates. In the USA and Germany grouting is regularly performed and a substantial amount of research has been conducted on this topic. In Sweden the industry lacks clear guidelines and enough knowledge about how and with what to grout.

This literature study is an introductory investigation for a manual on how this should be done. Its purpose is to take a broad look at the current research state and conventions primarily in Sweden, Germany and the USA focusing on what materials and techniques are employed. An attempt at describing how bentonite is affected by freezing and saltwater has also been made.

When boreholes are filled in Germany and the USA it's almost exclusively done by pressure grouting through a tremie pipe from the bottom up. The pipe is lowered into the hole along with the borehole heat exchangers. The investigation concludes that cement- and bentonite based materials with additives are mainly used. The additives enhance, among other things, the materials' thermal conductivity, bond strength to the heat exchanger, resistance to freezing and pumpability.

A cement based grout generally hardens up into a solid material in the borehole. This prevents it from keeping a tight bond with the heat exchanger when the pipe contracts upon cooling during heat extraction from the borehole. This increases the hole's permeability and hinders the transfer of heat between formation and brine fluid which reduces the system's efficiency.

The primary weakness of bentonite based materials is their poor resistance to dehydration which causes large volume losses and a major reduction in thermal conductivity. In addition, they also generally have a lower thermal conductivity than the cement based grouts.

Based on the literature studied in this investigation no clear conclusion could be drawn about how a bentonite based grout reacts on freezing and saltwater. However, it is clear that both geological and hydrogeological factors, as well as the type of contaminant the borehole is to be sealed against, must be considered when choosing a grouting material.

Keywords: Shallow geothermal energy, grout, borehole, bentonite.

Joakim Hjulström, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden. E-mail: JoakimLH@hotmail.com

1 Introduktion

Ett geoenergisystem utvinner lagrad solenergi, förnyelsebar energi, direkt ur marken. Utvinningen kräver normalt el, men för varje kilowatt som förbrukas utvinns vanligtvis tre till fem för de små och enkla systemen. Större system kan ha betydligt högre värmefaktor. Väl på plats har systemen låg driftskostnad och kräver lite underhåll. Det är ett miljövänligt sätt att reducera samhällets energikostnader och geoenergin är på stark framfarsch i Sverige och globalt.

Sveriges slutliga energianvändning år 2009 uppgick enligt Energimyndigheten till 376 TWh. Av de 150 TWh som användes av bostäder och service gick 79 TWh till uppvärmning inklusive varmvatten. I denna siffra ingår dock inte den energi som geoenergin bidrar med. Endast den el som förbrukas vid utvinningen av energin inkluderas i statistiken. Officiella källor saknas alltså, men man brukar räkna att geoenergin står för minst 12 TWh (Barth 2011a) och alltså står för en väsentlig del av Sveriges uppvärmning.

I fig. 1 visas en principskiss på hur en typisk installation kan se ut i Sverige. En slang som vanligtvis tillverkas av polyeten (PEM 80) sänks ner i ett 100-250 meter djupt borrhål. Denna så kallade kollektor är en värmeväxlare, kopplad till en värmepump. Beroende på behov kan flera borrhål och kollektorer användas. I slangen cirkuleras en vätska som kallas köldbärare. Detta är oftast en fryskyddad blandning av etanol och vatten. Beroende på köldbärarens temperatur i relation till borrhålet tar den antingen upp eller lämnar värmeenergi till berget. Energiskillnaden kan sedan användas till uppvärmning eller komfortkyllning. Tekniken kan också användas till borrhålslager där många borrhål samverkar för att till exempel lagra spillvärme från industriella processer som sedan kan användas för uppvärmning under vintern. Sedan det sena 1970-talet har intensiv forskning lett till att tekniken effektiviserats och blivit väsentligt billigare i takt med att de här systemens bidrag till energimarknaden stadigt vuxit sig större (Spitler 2005). Cirka 400 000 system finns installerade i Sverige idag som därmed är bland de största användarna i världen (Barth 2011a).

I en del fall är det önskvärt att borrhålen återfylls med ett tätt material med hög termisk konduktivitet (värmeledningsförmåga). Detta görs för att förhindra spridning av föroreningar från ytan och mellan olika akvifärer (vattenförande lager) som borrhålet kan kortsluta. I vissa geologiska och hydrogeologiska miljöer behövs det även för att skapa en god kontakt för värmeöverföringen mellan kollektorslangarna och berget (Remund och Smith 1997). I Sverige saknas dock kunskap om återfyllning och branschen och föreskrivande myndigheter saknar ett tydligt regelverk för när och hur detta ska ske.

Sverige är inte unikt i att föreskrifter saknas för när och hur återfyllning ska ske. I en översiktlig studie över lagstiftningen i 60 olika länder världen över fann Bayer et al (2010) att många länder helt saknade regelverk och i de fall där ett sådant existerade var variat-

ionerna både i omfattning och i olika gränsvärden stor.

De senaste åren har det i Sverige från en del kommuner uttryckts en oro att dessa ingrepp i marken kan utgöra ett hot mot vattenkvaliteten i närliggande brunnar. Som en följd av detta ämnar Geotec, Svenska Borrentreprenörers Branschorganisation publicera en handledning om när, hur och med vad återfyllning av energibrunnar bör göras för att säkerställa en god dricksvattenkvalitet och välfungerande system. Det här examensarbetet är en förstudie till en sådan handledning och har utförts i samarbete med Geotec. Eftersom liknande handledningar finns publicerade bland annat i USA (Remund och Smith 1997) och i Tyskland (VDI 2001) samt eftersom omfattande forskning bedrivits där de senaste 20 åren utgörs arbetet till stor del av en litteraturstudie. Syftet är att ge en överblick över forskningsläget och konventionerna främst i Sverige, USA och Tyskland med fokus på vilka material som används och varför, samt hur man återfyller. En viktig del av arbetet är också att diskutera hur forskningsresultaten och de utländska tillvägagångssätten kan anpassas till svenska förhållanden. Dessutom undersöks en rad specifika frågor angående bentonit som återfyllningsmaterial.

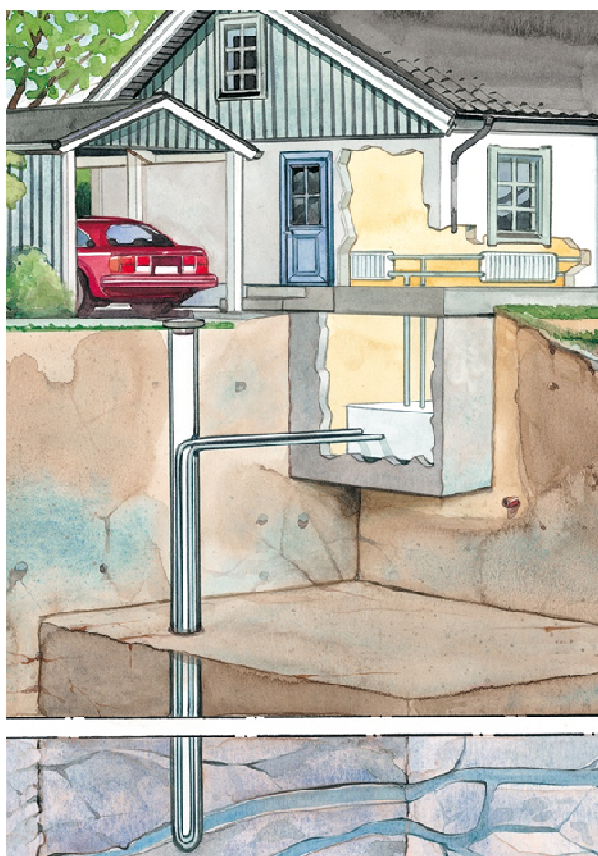


Fig. 1. Ett enkelt geoenergisystem med ett borrhål och kollektorslang som värmeväxlare kopplad till en värmepump. Bilden är omarbetad från Barth (2011a).

Följande frågeställningar utreds:

- ◆ Vad är innebär det att ett borrhål är tätt?
- ◆ Vilka material rekommenderas för återfyllning och på vilka grundval?
- ◆ Finns det en begränsning på brunnsdjup vid återfyllning?
- ◆ Vilken typ utrustning används?
- ◆ Vilka olika material finns på marknaden?
- ◆ Finns det nackdelar med de material som används?
- ◆ Vad finns det för mätningar som garanterar metodikens täthet. Går det att verifiera att det blir tätt?
- ◆ Vilken typ av teknik används och vilka begränsningar finns?
- ◆ Vid frysning – hur långt ut sträcker sig frysningen utanför borrhålet?
- ◆ Är det belagt att bentonit separerar vid upprepade frysningar?
- ◆ Bentonit – är det olika egenskaper på olika fabrikat?
- ◆ Bentonit och salt grundvatten – vad händer? Bibehålls de tätande egenskaperna?

1.1 Bortteknik och borrhålet

Ett svenskt geoenergisystem installeras i ett borrhål utfört enligt de riktlinjer som anges i normbrunn 07 (SGU et al 2008). Ett tätt foderrör som vanligtvis är gjort av stål förs ner tillsammans med borrhållutrustningen genom jordlagren två meter ner i fast berg. Området mellan berget och foderröret tätas innan resten av hålet borras. På så sätt avskämmas borrhålet från ytligt och i jordlagren förekommande grundvatten.

Den absolut vanligaste borrhållmetoden i Sverige och som numera är standard vid brunnsborrning är så kallad sänkhammarborrning. Tekniken bygger på att en oftast tryckluftdriven hammare slår på en stiftförsedd borrhållkrona. Hammaren är fäst strax ovanför borrhållkronan och sänks alltså med ner i hålet. Utrustningen roterar med en rotationsenhet, fäst på borrhållens mast. Borrhållkaxet, det krossade berg som borrhålls loss, blåses i regel upp med samma tryckluft som driver processen (Andersson 1981).

Det färdiga borrhålet tillåts i regel vara uppfyllt med naturligt grundvatten, vilket är en förutsättning för att energiutbytet ska kunna ske. Trots att vatten i sig har relativt låg termisk konduktivitet (värmeledningsförmåga) är det ett mycket effektivt transportmedium av termisk energi mellan den kringliggande formationen och köldbäraren i kollektorn. Detta beror bland annat på att konvektionsceller och densitetsberoende, vertikala vattenströmmar bildas i borrhålet. Dessa effekter märks tydligast då systemet används till kylning. Om borrhålet återfylls med ett fast material, till exempel bentonit eller cement, förhindras de gynnsamma rörelserna och värmeöverföringen blir sämre (Hellström 2002). Detta innebär att

man måste borra ett djupare hål för samma energiuttag.

1.2 Problemens omfattning

Det finns en rad faktorer som man måste ta hänsyn till vid all borring i mark varav de viktigaste, potentiella problemen som kan åtgärdas med återfyllning summeras här. I vissa områden finns det risk att stöta på salt grundvatten. Riskerna ökar med ökande djup. Om täta lager i marken genomborras kan grundvatten från olika akvifärer och med olika kemisk sammansättning blandas. Detta kan ha en negativ inverkan på vattenkvaliteten. Ibland kan även grundvattnet under ett tätt lager vara trycksatt, så kallat artesiskt grundvatten. Om en artesisk akvifär öppnas upp och dess trycknivå ligger över markytan kommer vatten stiga upp ur borrhålet. Av praktiska skäl är detta olämpligt på många platser. Om dessa tre faktorer orsakar problem är återfyllning en lösning (SGU et al 2008).

Föroreningsproblem i Sverige som har kunnat härledas till energibrunnar är dock litet och i antal handlar det om några enstaka fall per år (Barth, pers. komm. 2011). I regel rör det sig om en enskild brunn som förorenas då en energibrunn borras åt en närliggande fastighet. Vanligast är att borrhålet öppnat upp en ny transportväg för föroreningar som redan fanns i marken. Problemets frekvens har minskat i takt med att borrhållens utförande förbättrats de senaste decennierna (Risberg, pers. komm. 2011).

Risken att ett borrhål orsakar större skador föreligger främst då energibrunnar borras i vattenskyddsområden i anslutning till kommunala vattentäkter. Även där är riskerna små med nuvarande anläggningsteknik och om gällande regler följs. I det inre skyddsområdet råder idag förbud mot borring medan installation kan ske i det yttre efter att fallet granskats och ett särskilt tillstånd givits.

Även om man tror att energibrunnars påverkan på vattenkvaliteten är liten råder dock en viss osäkerhet. Enligt (Risberg, pers. komm. 2011) har 75 % av de svenska vattenbrunnarna för enskild vattenförsörjning någon gång under året en kvalitet som är otjänlig eller tjänlig med anmärkning. Skälen till detta är många och varierade och hur mycket energibrunnar bidrar till problemet är svårt att säga. Detta beror på att få vattennalyser finns att tillgå eftersom det sällan uppmärksammas om vattenkvaliteten försämras i dessa brunnar då vattnet inte dricks. Risberg menar också att om borrhållena endast orsakar en mindre påverkan är det möjligt att denna inte upptäcks. Ett annat problem som kan åtgärdas med återfyllning är det faktum att foderrören på lång sikt (100 år) inte kan anses vara korrosionsbeständiga (SGU et al 2008). Finns det risk att gamla rör börjar läcka kan energibrunnen återfyllas och fortsätta användas.

1.3 Materialkrav och täthet

Ett material som används för återfyllning av borrhål i geoenergisystem bör enligt amerikanska Environmen-

tal Protection Agency ha en permeabilitet som inte överstiger 10^{-9} m/s (Remund och Smith 1997). Permeabilitet är ett mått på hur genomsläppligt ett material är. Tillsammans med bland annat den hydrauliska gradienten och egenskaperna hos ämnet som strömmar genom materialet kan flödet beräknas.

Sveriges Geologiska Undersökning ansvarar för den här frågan i Sverige. Idag finns ingen officiell rekommendation från deras sida om hur hög permeabilitet som kan tillåtas hos materialen. Frågan diskuteras däremot, och hittills lutar man åt att den internationella standarden är rimlig att använda även här (Risberg, pers. komm. 2011).

Enligt Remund och Smith (1997) bör materialet dessutom:

- ◆ Ha så hög termisk konduktivitet som möjligt för att inte störa värmeöverföringen mellan köldbäraren och den kringliggande formationen.
- ◆ Inte förlora volym nere i borrhålet, på kort eller lång sikt.
- ◆ Behålla sina egenskaper över systemets livslängd.
- ◆ Vidhäfta mot kollektorslangarna och formationen för att undvika att luft eller vattenfyllda fickor och glapp bildas.

Förutom detta måste materialet enligt den tyska handledningen (VDI 2001) motstå frysning över vanliga driftstemperaturer. Driftstemperaturerna varierar beroende på var i världen man befinner sig vilket både beror på belastningsmönster och medeltemperatur i luften. Det är nämligen främst denna som styr temperaturerna i formationen på såhär ytliga djup. I fig. 2 kan man se hur marktemperaturen på 100 meters djup varierar i Sverige.

I södra Sverige och Tyskland är det fullt möjligt att dimensionera ett system så att frystemperaturer mycket sällan nås, medan man i norra Sverige ofta räknar med att hålen kommer frysa. Detta är sällan ett problem i vattenfyllda energibrunnar, trots att vattnet expanderar när det fryser. Anledningen är att expansionen i de allra flesta fall sker vertikalt i borrhålet och därmed inte utsätter kollektorn för tryck (Ahlström 2004).

Ett annat krav på materialet som varierar med borrhålets djup är dess densitet. Ett tungt material riskerar att tryckas ut i formationen av sin egen vikt. I vissa fall kan stora volymer förloras på detta sätt. Ett tungt material utsätter också kollektorslangarna för större påfrestning, något som diskuteras mer i stycke 3.2.

2 Metod och material

I följande stycken presenteras de tillvägagångssätt och de material som oftast används i USA och Tyskland. Det är inte säkert att konventionerna i dessa länder kan anammas i sin helhet. Både bortechniker, geologi, klimat och lagstiftning skiljer sig väsentligt åt mellan de

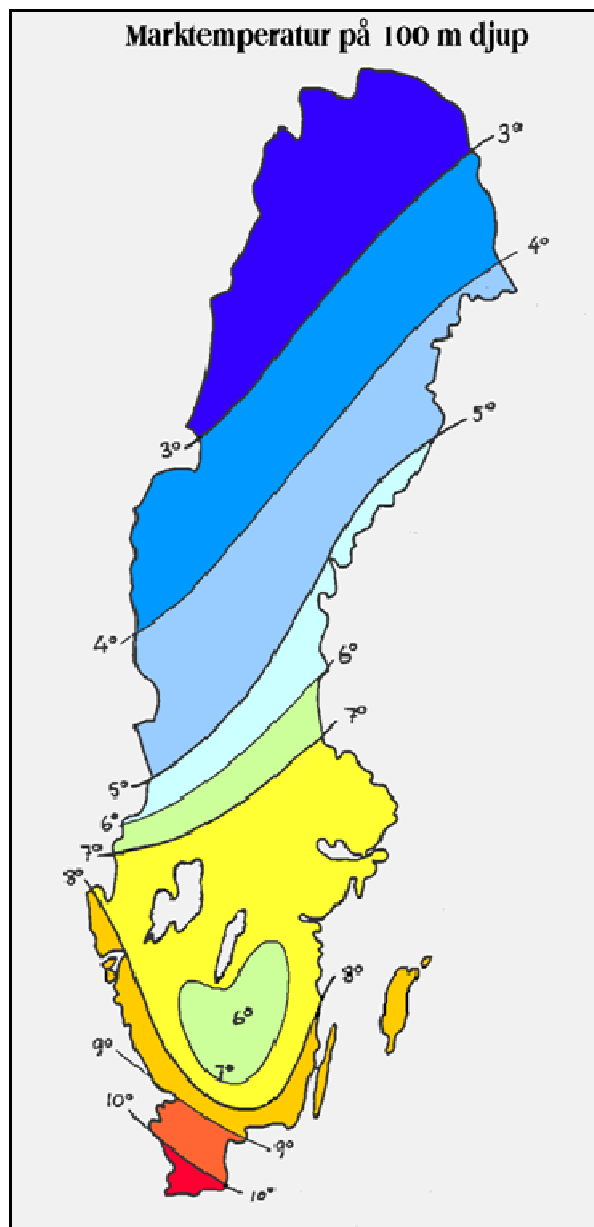


Fig. 2: Skiss över hur marktemperaturen varierar på 100 meters djup i Sverige. Bild hämtad från Barth (2011a).

här länderna och Sverige. En grundlig kartläggning av dessa skillnader för att tekniköverföringen ska kunna ske på bästa sätt är önskvärt, men har inte hunnits med i den här kandidatuppsatsen.

2.1 Fyllningsmetoder

När ett borrhål fylls med material vill man att det ska fylla ut hela hålet utan luftfickor eller hålrum och att blandningens sammansättning ska vara jämn längs hela hålets sträckning. Sammansättningen nere i borrhålet måste också vara samma som den blandning man tillrett på ytan. Enbart om detta uppnås säkerställs att återfyllningen blir tät och att materialet får de egenskaper man eftersträvat.

Det är också en fördel om metoden innebär så låga extra kostnader som möjligt. Metoder som inte kräver

extra utrustning på borrhålets plats och som kan uppnå ett fullgott resultat med ett billigare material och till lägre pris är värt att eftersträva.

2.1.1 Slurry uppifrån

En enkel och relativt billig metod som prövats är en slurry av önskvärd sammansättning framställs på markytan och därifrån hålls ner i borrhålet. Med slurry avses en tjockflytande vätska som håller blandningens fasta partiklar i suspension under fyllningsfas och i borrhålet. Enligt en amerikansk handledning i hur återfyllning ska ske (Remund och Smith 1997) finns flera problem med metoden. Naturligt grundvatten finns ofta i borrhålen då återfyllningen inleds. Om en slurry måste sjunka genom vattnet för att nå hålets botten kommer den spädas ut, dess bärförmåga minskas och grova partiklar separeras från blandningen. Dessutom finns risken att hinder och ojämnheter i borrhålsväggen eller hål som inte är helt lodräta orsakar igensättning innan slurryn nått botten eller att fickor bildas i materialet. Detta gör metoden osäker i ett torrt borrhål och olämplig i ett vattenfyllt.

2.1.2 Material Uppifrån

Även andra material kan hållas i uppifrån. Bentonitpellets används ofta, men även annat fast material såsom stenmjöl, borrhålskax eller sand förekommer i olika situationer eftersom de är väsentligt billigare än slurrys. Det kräver också mindre extra utrustning än andra metoder.

Paul och Remund (1997) testade metoden genom att bentonitpellets hölls ner i ett vattenfyllt rör. Det resulterande materialet bestod av 53 – 59 % bentonit och resten vatten, vilket är en högre andel än i de pumpbara blandningarna som diskuteras i detalj senare i texten. Detta innebär att materialets termiska konduktivitet är högre, mellan 0,76 – 1,02 W/mK.

I studien försökte man också tillsätta bland annat krossad kvartsit för att förstärka den termiska konduktiviteten ytterligare. Detta gav upphov till stora variationer i resultat, även mellan prover som hade samma sammansättning innan de hölls i. Med ökande mängd tillsats ökade även variationerna. Efter att proven studerats kunde man dra slutsatsen att detta berodde på att materialet inte var jämt fördelat i röret. Istället för en homogen blandning av sand och bentonit förekom partier av antingen den ena eller den andra ingrediensen. Den termiska konduktiviteten förstärktes fortfarande till ett medelvärde på hela 2,04 W/mK. Vid en sandhalt på mer än 50 % av vikten hos den färdiga produkten låg värmeöverföringsförmågan på mellan 1,53 – 2,38 W/mK med ett enskilt prov på hela 3,23 W/mK. Man visade alltså att det är möjligt att få en högre andel fast material och därmed högre värmeledningsförmåga hos återfyllningsmaterialet när man inte behövde oroa sig för pumpbarhet, men att resultatet blev mycket ojämnt. Inga permeabilitetstester utfördes på provena, men särskilt vid höga halter sand är det sannolikt att permeabiliteten begränsades av tillsatsens

kornstorlek snarare än bentonitens och därmed var hög.

Risken för igensättning innan materialet når botten är större med denna metod än med en slurry. Dessutom är borrhål betydligt djupare än det rör som fylldes i ovan nämnda studie. Sannolikt kommer det bidra till att problemen med separation förvärras.

Remund och Smith (1997) menar att det inte är realistiskt att använda enbart borrhålskax som återfyllning. För att bevara lagerföljdens täthet intakt måste materialet i så fall läggas tillbaka i samma ordning, och ha packats till samma densitet som det hade före borrhållning.

2.1.2.1 Stenmjöl

En variant av denna metod används av vissa entreprenörer i Sverige, där stenmjöl hålls ner från markytan. Stenmjöl består av den relativt osorterade, finaste fraktionen av krossat berg. Materialet sikts genom en sikt som i regel släpper igenom partiklar med kornstorlekar inom intervallen 0-2 eller 0-4 mm. Detta gör att materialets exakta sammansättning är obestämd. Det är stor skillnad på de tätande egenskaperna mellan partiklar inom dessa intervall. På grund av detta kan man inte veta vilka tätande egenskaper stenmjölet kommer ha. Dess termiska konduktivitet kommer också variera beroende på vilken bergart som har krossats. Att man inte kan vara säker på materialets sammansättning är en viktig invändning mot att det används.

Då det hålls ner i ett borrhål och får sjunka genom en 100-200 meter lång vattenpelare kommer blandningen separera. De grövsta partiklarna sedimenterar fort medan de finaste kan stanna i suspension under flera dygn. En partikels sedimentationshastighet genom en vattenpelare ges av Stokes lag enligt:

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

där:

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 2010)

Den dynamiska viskositeten för vatten vid 10°C är 0,0013077 Ns/m^2 (Fetter 2001) och densiteten nära 1000 kg/m^3 . För sfäriska kvartspartiklar som typiskt har en densitet på 2650 kg/m^3 (Nesse 2000) kommer detta ge en sjunkhastighet för olika kornstorlekar enligt diagrammet i fig. 3.

Spannet av olika sjunkhastigheter inom ett 0-2 mm stenmjöl är alltså stort. Om materialet tillsätts med en jämn takt är det rimligt att anta att borrhålets botten-skikt endast kommer bestå av de grövsta partiklarna, vilket i det här fallet är grovsand. Andelen finare partiklar kommer öka längre upp i borrhålet. Sannolikt

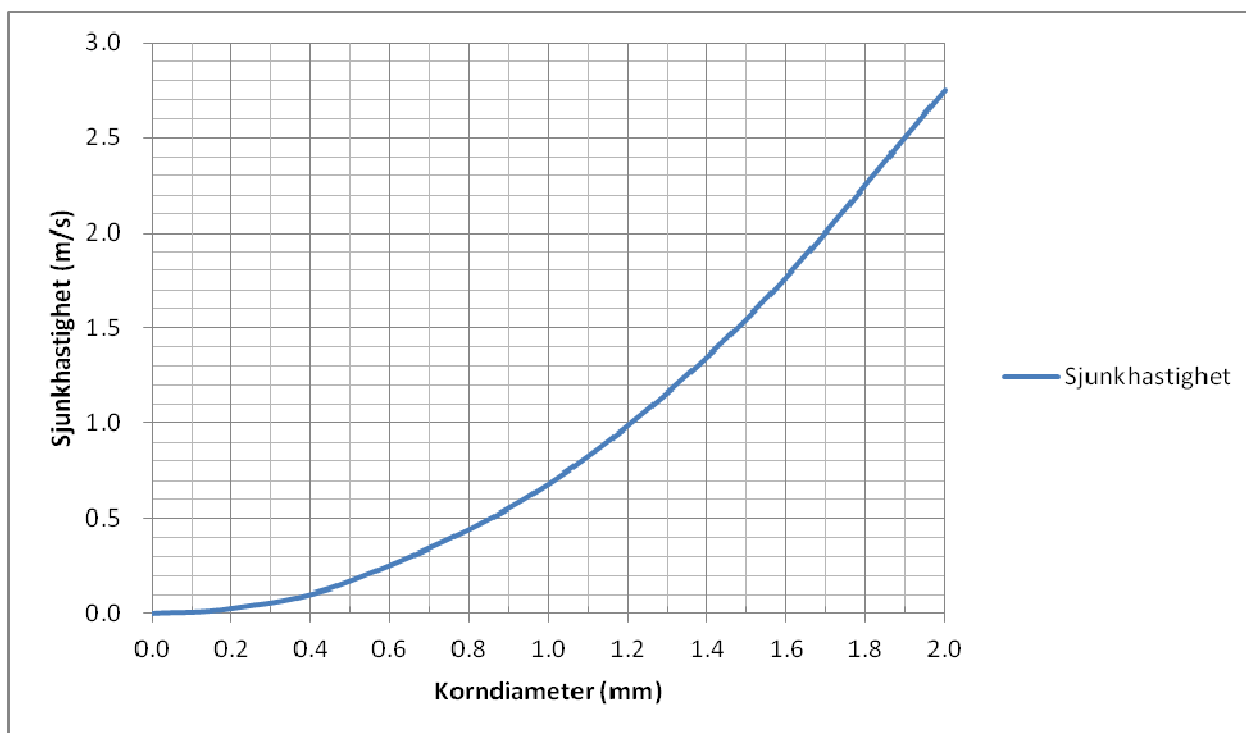


Fig. 3: Hastigheten (m/s) med vilken sfäriska kvartspartiklar ($\rho = 2,65$) av olika kornstorlek sjunker genom tiogradigt vatten enligt Stokes lag.

kommer majoriteten av borrhålet i bästa fall fyllas med siltig sand, som har en permeabilitet på omkring 10^{-7} - 10^{-5} m/s (Fetter 2001). Kornstorlekar enligt SGF finns i tabell 1.

Efter hand kommer en blandning av allt finare partiklar hunnit sedimentera, men det är först när lerfraktionen börjar avlagras som det finns chans att per-

Kornstorlekar enligt SGF		Storlek (mm)
Sand	Grovsand	0,6—2,0
	Mellansand	0,2—0,6
	Finsand	0,06—0,2
Silt	Grovsilt	0,02—0,06

Tabell 1: Kornstorlek i mm för olika benämningar enligt Svenska Geotekniska Föreningen.

meabilitetskravet på 10^{-9} m/s kommer kunna uppnås. Leror i naturlig miljö har i regel en permeabilitet på mellan 10^{-11} – 10^{-8} m/s. Lerpartiklar har en kornstorlek som understiger 0,002 mm. Enligt Stokes lag kommer den grövsta lerpartiklen falla genom borrhålet med en hastighet på $2,75 \cdot 10^{-6}$ m/s, eller ungefär en centimeter i timmen. Därmed kommer sannolikt endast borrhålets övre delar ha potentialen att uppnå en permeabilitet som understiger kravet.

Ett materials permeabilitet beror även på dess packning. Efter att stenmjölet sjunkit genom en 200 meter djup vattenpelare kommer materialet sannolikt inte vara särskilt hårt packat och kommer tendera att öka dess permeabilitet. Det här gäller särskilt borrhålets övre delar där mindre överlagrande vikt pressar

samma materialet.

Förutom dessa invändningar tillkommer dessutom samma problem som finns med de övriga fasta materialen. Att borrhålet riskerar att sättas igen innan materialet når botten och att det inte finns någon möjlighet att kontrollera återfyllningens kvalitet. På grund av de här anledningarna bedöms återfyllning med enbart stenmjöl från ytan vara mycket olämpligt.

2.1.3 Tryckinjektering

Den metod som enligt samtliga studerade källor (t.ex. Remund och Smith 1997, VDI 2001, Paul och Remund 1996, och Allan 1997) rekommenderas som den enda som fungerar i alla situationer är tryckinjektering via ett påfyllnadsrör (tremie pipe) från botten och uppåt med en pump. Övriga metoder utesluts.

Detta innebär att ett nytt krav på materialet måste tas med i beräkningen.

- ◆ Materialet måste också ha tillräckligt låg viskositet och vara tillräckligt finkornigt för att vara möjligt att pumpa ner i borrhålet.

I fig. 4 finns en illustration av hur metoden går till. Den bygger på att ett rör sänks ner i hålet tillsammans med kollektorn. En pump som klarar av att leverera tillräckligt högt tryck kopplas på. Hur högt tryck pumpen behöver kunna alstra beror på rördimension, borrhålsdjup och återfyllningsmaterialets egenskaper. Vilken typ av pump som används spelar också roll. Metoden utreds i detalj av Remund och Smith (1997), som bland annat redogör för flera typer av pumpar som

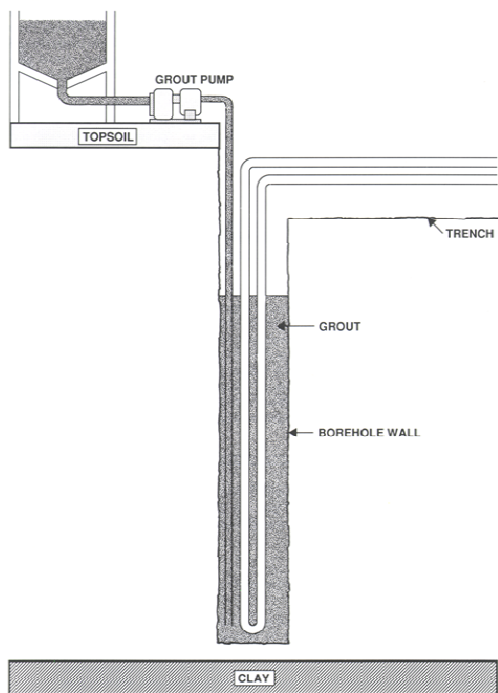


Fig. 4: Skiss av hur återfyllning med tryckinjektering genom ett påfyllnadsrör (tremie pipe) fungerar. Bilden är hämtad från Remund och Smith (1997).

fungerar samt hur stora tryck som behövs för olika kombinationer av rörstorlek, återfyllningsmaterial och djup.

En kolvpump kan användas både för bentonitbaserade och cementbaserade material och rekommenderas både av Allan och Philippacopoulos (1998) och Remund och Smith (1997). I fig. 5 visas en skiss på hur en sådan pump fungerar.

Kolven rör sig framåt, en ventil öppnas och vätska sugas in i kammaren bakom kolven. Den första ventilen stängs och den andra öppnas när kolven byter håll och vätskan trycks vidare.

Allan och Philippacopoulos (1998) rekommenderar

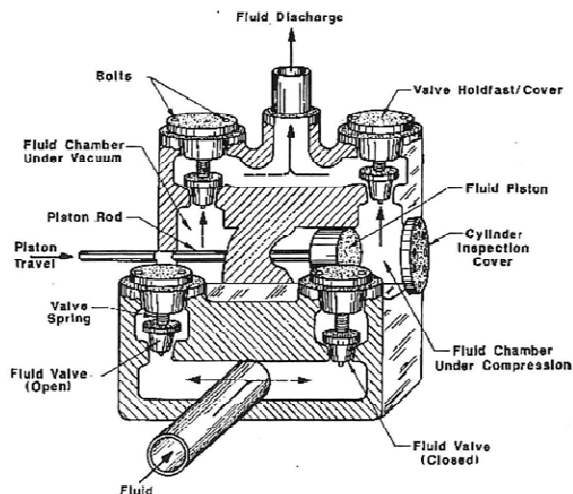


Fig. 5: Principskiss på hur en kolvpump fungerar. Bilden är hämtad från Remund och Smith (1997).

att ett cementbaserat material bör tillredas i en blandare och sedan överförs till en tank med omrörare där den hålls i rörelse för att förhindra att blandningen stelnar. Medan pumpning sker i den andra tanken kan en ny sats tillredas i den första. På detta sätt kan återfyllningen ske utan avbrott där igensättning av påfyllnadsröret riskeras.

I USA är konventionen att påfyllnadsröret successivt dras upp ur borrhålet. För att undvika luftbubblor och ojämnt material är det dock viktigt att rörets mynning hålls under fyllningsmaterialets yta under hela processen (Remund och Smith 1997). Den tyska handledningen (VDI 2001) rekommenderar endast att röret dras upp från borrhål som inte är djupare än 60 m. Vid större djup än så finns det risk att problem uppstår och man föreslår istället att rören också återfylls och lämnas kvar. I så fall bör minst två rör användas och hålet fyllas i sekvenser.

Injekteringsmetoden framställs i källorna som den



Fig. 6: Inspektion av material som pressas ut ur borrhålet under återfyllning från botten och upp. Bilden är hämtad från ett faktablad om produkten ThermoCem Plus som tillverkas av HeidelbergCement.

bästa av tre skäl. Man kan vara säker på att hela borrhålet fylls och att inga fickor bildas. När utrustningen väl är på plats är den snabb. Det går dessutom att inspektera den blandning som kommer upp när borrhålet är fullt.

Detta illustreras i fig. 6, där vattnet som pressas upp ur borrhålet leds ut genom ett rör. Först kommer endast vatten och sedan en blandning av återfyllningsmaterial och vatten. På den sista bilden är sammansättningen densamma som den man pumpar ner och man vet då att materialet är homogent genom hela borrhålet. Ingen av de andra metoderna ger denna säkerhet.

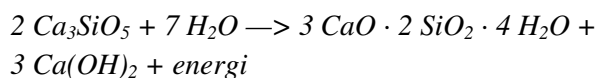
De största nackdelarna med metoden är att det krävs utrustning som annars inte är på plats, och att problem vid pumpning, såsom igensättning av rör eller för tidig stelning, kan förekomma beroende på vilket material som används. Flera välfungerande fältförsök har dock dokumenterats (Holloway et al 1999, Allan och Philippacopoulos 1998 och Remund och Smith 1997) och metoden används regelbundet vid återfyllning utomlands.

2.2 Återfyllning med cementbaserade material

Cement med eller utan tillsats av olika material är ett möjligt alternativ för återfyllning av borrhål som utretts intensivt i en flera studier (till exempel Allan och Philippacopoulos 1999 och Heiberger et al 1997). Materialet har låg permeabilitet, det är tillgängligt och dess egenskaper välkända. Med rätt tillsatser får ett cementbaserat återfyllningsmaterial hög termisk konduktivitet och tål både frysning (Allan och Philippacopoulos 1998) och uttorkning (Allan 1997). Dessutom är det möjligt att framställa pumpbara blandningar.

Det har dock en rad svagheter. För det första tenderar materialen att ha en relativt hög densitet 1800 – 2200 kg/m³ (Heiberger et al 1997), vilket kan ge upphov till höga tryck på kollektorslangen vid återfyllning med risk att denna skadas och att blandningen trycks ut i den omkringliggande formationen av sin egen vikt. Efter att ha stelnat är de dessutom fasta och kan inte följa och behålla kontakten med slangen då denna varierar i storlek beroende på köldbärartemperaturens skiftningar under året.

När cement blandas med vatten initieras en kemisk reaktion som kallas hydratisering. Enkelt uttryckt innebär det att vattenmolekylerna byggs in i de reagerande ämnena. Exemplet nedan visar den kemiska formeln för hydratisering av en av de vanligaste beståndsdelarna i cement: trikalciumpilikat (Heiberger et al 1997).



Det är en exoterm reaktion som alltså ger ifrån sig energi i form av värme, precis som hydratiseringen av de övriga ämnena som cement innehåller (Heiberger et al 1997). I samband med detta krymper även materi-

alet något.

I följande stycken diskuteras hur detta orsakar problem i geoenergisystem samt hur cement reagerar på uttorkning och frysning. De flesta av problemen kan minskas genom att justera vattencementtalet, vilket är andelen vatten mot cement (v/c), eller tillsätta olika ämnen. En förenklad sammanfattning av olika tillsatser och deras effekter på återfyllningsmaterialet finns i tabell 2, men tas också upp i detalj i följande stycken.

2.2.1 Ingredienser och effekt på materialen

Något som blir tydligt av tidigare forskning är att man med relativt små förändringar i vattenhalt, cementhalt och tillsatsmängd kan uppnå stora förändringar i återfyllningens egenskaper. En hög noggrannhet vid tillblandningen är därför nödvändig.

Cement

Cement består inte av ett enskilt ämne. Ämnena förekommer i olika proportioner i flera olika typer av cement med varierande egenskaper (Heiberger et al 1997). En utredning av dessa är dock bortom den här rapportens perspektiv, och med cement åsyftas i följande stycken, om inte annat anges, vanlig Portland cement.

Vatten

Vatten är kanske den självklaraste beståndsdel. Det tillsätts dels som reaktant för att cementen ska stelna och dels för att minska blandningens viskositet och göra den bland- och pumpbar (Allan 1997).

En för hög vattenhalt ger dock upphov till flera problem. Ju mer vatten som tillsätts desto sämre klarar blandningen av att hålla cementpartiklarna i suspension tills den stelnat. Cementpartiklarna och tunga tillsatser sjunker till botten och vatten pressas upp på ytan i ökande grad med ökande vattenhalt. Problemet illustreras i fig. 7.

Omfattande blödning eller separation, som detta

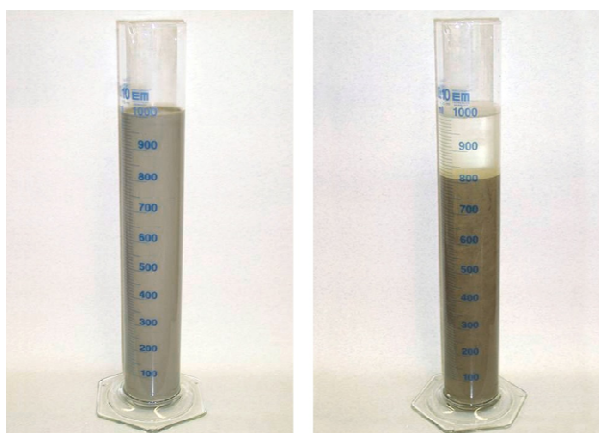


Fig. 7: Exempel på separation av cementbaserat återfyllningsmaterial. Bilden är hämtad från ett faktablad om produkten ThermoCem Plus som tillverkas av Heidelberg-Cement.

fenomen kallas, orsakar en ojämn kvalitet på återfyllningen och förändrade egenskaper (Allan och Philippacopoulos 1998).

En hög vattenhalt bidrar även till att cementen får hög porositet (Heiberger et al 1997). Detta ger den en sämre termisk konduktivitet och gör dessutom att en större del av denna går förlorad vid uttorkning då porerna fylls med luft istället för vatten (Allan 1997). Det gör även materialet mer känsligt för frysning (Emborg 2007).

En ökad vattenhalt ökar också cementens permeabilitet (Allan 1997), samt ökar volymförlusten under stelning (Heiberger et al 1997).

Av dessa anledningar vill man minimera återfyllningens vattenhalt i så hög grad som möjligt utan att den blir omöjlig att pumpa.

Mjukgörare

För att minimera mängden vatten i blandningen samtidigt som pumpbarheten blir tillräcklig kan en mjukgörande kemikalie tillsättas. Detta gör att materialets viskositet minskar och möjliggör därmed injektering av blandningar med lägre vattencementtal. I en studie av Allan (1997) testades mjukgöraren naftalensulfonat. Man lyckades minska vattencementtalet i en pumpbar blandning till 0,4. Detta gjorde att den färdiga produkten hade en högre termisk konduktivitet samt behöll en större del av denna vid uttorkning än material med högre vattenhalt. På grund av mjukgörarens egenskaper kunde endast en liten mängd tillsättas utan att problemen med volymförlust vid stelning och separation av blandningen ökade väsentligt.

Sand

Förutom vatten är det vanligt att tillsätta ballast i cementbaserade material. För återfyllning av borrhål är ett av de främsta skälen att förstärka den termiska konduktiviteten. Därför är sand med hög koncentration av mineral med hög konduktivitet bäst lämpad. Det är även viktigt att sanden inte innehåller skadliga ämnen eller mineral som kan reagera med cementen. Med en sandhalt på omkring 60 % av vikt kan värmeledningsförmågan höjas till cirka 2,5 W/mK medan blandningen fortfarande är pumpbar. Detta kan jämföras med ren cement som även med låg vattenhalt ligger mellan 0,8 och 1,1 W/mK (Allan 1997 och Heiberger et al 1997).

Ren kvartssand är det alternativ som både är relativt billigt, tillgängligt och samtidigt ger bra resultat. I studien av Heiberger et al (1997) jämförs ren kvartssand med sand med en lägre mineralogisk mognadsgrad och som alltså har en mer blandad sammansättning. Resultatet blev att blandningen med ren kvartssand hade cirka 25 % högre termisk konduktivitet när alla andra variabler var lika. Krossad kvartssand är ett annat lämpligt alternativ (Allan 1997).

Sanden bör vara finkornig eftersom grövre sandpartiklar kan orsaka problem vid pumpning. Detta bevisades efter försök av Allan (1997) där fyra typer av sand testades, varav endast en ansågs smidig att pumpa. Injekteringsproblemen gav upphov till en

ojämn sammansättning och fickor i det stelnade materialet vilket medförde en försämrad värmeledningsförmåga.

En hög sandhalt bidrar också till flera andra egenskaper hos återfyllningsmaterialet. Eftersom sandkornen ligger emot varandra i cementen och på så sätt håller materialet uppe förlorar det mindre volym vid stelning och uttorkning. Dessutom minskas återfyllningens värmeavgivning då den hydratiseras (Heiberger et al 1997), vilket diskuteras utförligt i stycke 2.2.2. Detta ger en bättre kontakt med kollektorn då cementblandningen stelnat i borrhålet. Förutom att gynna värmeöverföringen (Berndt och Philippacopoulos 2000) innebär det här att sand ger det färdiga systemet som helhet en lägre permeabilitet även om den ökar själva materialets permeabilitet (Allan och Philippacopoulos 1998).

Slutligen innebär en ökad andel sand att blandningens viskositet och densitet ökar (Allan 1997).

Flygaska

Flygaska uppvisar cementliknande egenskaper i det materialet stelnar vid tillsats av vatten. Detta gör att cement delvis kan ersättas av aska och på så sätt reducera värmen som avges vid hydratisering utan negativa konsekvenser på hållfasthet, permeabilitet och termisk konduktivitet. Askans kemiska egenskaper gör också att materialets motståndskraft mot sulfatrika grundvattnen ökar (Allan 1997). Nämnvärt är att det även finns särskilda typer av cement som i sig är resistent mot sulfatattack (Heiberger et al 1997). Askan är dock billig och minskar totalkostnaderna. Ett problem är att blandningens tendens att separera ökar med ökande askhalt, och eventuellt måste bentonit tillsättas för att förhindra detta (Allan 1997).

Användning av flygaska i byggmaterial har varit omdiskuterat eftersom askor från vissa källor kan innehålla höga halter av skadliga ämnen, främst tungmetaller. Denna problematik utreds i stycke 2.2.6.

Bentonit

Om blödning och separation av återfyllningsmaterialet är ett problem kan bentonit tillsättas för att binda vatten i blandningen och öka suspensionsförmågan (Allan 1997). En följd av detta är att en högre andel flygaska kan användas och att vattenhalten kan ökas utan att partiklar separerar från blandningen och faller till botten. Bentonit minskar också materialets permeabilitet (Heiberger et al 1997).

Bentonit har dessutom tidigare på grund av sina svällande egenskaper ansetts minska krympning när cement med höga vattenhalt stelnar, men Remund och Smith (1997) skriver att studier har visat att detta inte är effektivt. Man menar att detta sannolikt beror på att förekomsten av Ca^{2+} och OH^- i porvattnet hos cementen ger upphov kemiska förändringar hos bentoniten. Detta har undersökts av bland annat Karnland (1997b) vars resultat stöder påståendet att katjonsutbyte kan ske. I studien påverkades dock endast en liten del av bentonitprovets volym av lakvattnet.

Med ökande halter bentonit ökar blandningens viskositet. För höga halter orsakar problem vid pumpning. Andelen bentonit i cementbaserade återfyllningsmaterial brukar enligt Remund och Smith (1997) ligga mellan 2 och 8 % av vikt. I blandningen som Allan och Philippacopoulos (1999) tog fram inkluderades betydligt lägre halter, omkring 0,2 %. Detta just för att behålla pumpbarhet eftersom de blandningar man testade hade så låg vattenhalt, men även eftersom den termiska konduktiviteten minskar med ökande halt av bentonit.

Grafit

I moderna cementbaserade material tillsätts ibland grafit för att öka dess värmeledningsförmåga. Detta eftersom grafit har mycket högre termisk konduktivitet än kvartssand och dessutom gör materialet lättpumpat. Konduktiviteten varierar mycket men ligger typiskt i storleksordningen 80-240 W/mK. Materialet är dock dyrt. Det har inte funnits tid inom ramen för det här arbetet att utreda grafit mer i detalj.

2.2.2 Värmeavgivning

Som tidigare nämnts ger cement ifrån sig energi i form av värme då den hydratiseras. Detta kan orsaka problem i geoenergisystem eftersom hettan dels får kollektorslangen att svälla och dels försvagar slangens trycktålighet. Om slangens samtidigt utsätts för kraftigt tryck ökar denna försvagning risken för skador.

Ett annat problem som kan uppstå är då borrhålet svalnar och kollektorn drar ihop sig igen. Detta kan ge upphov till luckor mellan slang och återfyllning, vilket försämrar täthet och termisk konduktivitet. Problemet diskuteras mer ingående i nästa stycke.

Olika typer av cement hydratiseras olika snabbt och som ger ifrån sig olika mycket värmeenergi. I Heiberger et al (1997) visades att val av cement, cementens hydratiseringshastighet samt hur stor volym cement som får stelna omkring kollektorslangen avgör vilken maxtemperatur den utsätts för. Detta innebär att en större borrhålsdiameter, eller utfyllda hålrum från borrhållskollaps, kommer öka påfrestningen på kollektorn. Det rekommenderas inte att en standardkollektor hettas upp över 60°C eftersom den då riskerar att skadas (Heiberger et al 1997). Trycktåligheten börjar dock försvagas redan innan denna gräns nås.

Maxtemperaturen kan enkelt minskas genom att blanda ut cementen med mer vatten eller sand och därmed minska cementhalten. Man skulle även minska värmen ytterligare genom att öka vattenhalten ännu mer och tillsätta bentonit för att förhindra att blandningen separerar, men av skäl som diskuterats i tidigare stycken är detta inte att rekommendera för återfyllning av borrhål.

I studien av Heiberger et al (1997) gjordes flera mätningar av hur mycket temperaturen kan förväntas öka i borrhålet. I syfte att få fram ett maximalt, teoretiskt möjligt värde fick ett prov av cement med mycket snabb hydratiseringshastighet stelna i en isolerad behållare. Provet hade ett vattencementtal på 0,561. Pro-

Tillsats	Termisk konduktivitet	Permeabilitet	Värmeavgivning	Viskositet	Förlust av termisk konduktivitet vid uttorkning	Frystålighet	Separation	Krympning vid stelning	Sulfatrestens
Sand	Ökar	Liten påverkan upp till 50 % av vikt	Minskar	Ökar	Minskar	Ökar	-	Minskar	-
Vatten	Minskar	Ökar	Minskar	Minskar	Ökar	Minskar	Ökar	Ökar	-
Mjukgörare	-	-	-	Minskar	Minskar	-	Ökar	Ökar	-
Bentonit	Minskar	Minskar	-	Ökar	-	-	Minskar	Minskar marginellt	-
Flygaska	Liten påverkan	Liten påverkan	Minskar	Liten påverkan	-	-	Ökar	-	Ökar

Tabell 2: Förenklad sammanfattning av hur vissa tillsatser påverkar viktiga egenskaper hos ett cementbaserat återfyllningsmaterial.

vet i behållaren ökade med 90,4°C, men det ska understrykas att detta inte är under realistiska förhållanden eftersom ett borrhål är mycket långt ifrån isolerat, även i en formation med dålig värmeledningsförmåga. Det understryker dock vikten av cementval och en medvetenhet om problematiken.

I samma studie prövade man även en annan blandning under mer naturliga förhållanden. En ren cementblandning med ett vattencementtal på 0,461 fylldes i ett konstruerat borrhål med 165 mm (6.5 in) i diameter. "Formationen" bestod av sand med en termisk konduktivitet på 1,64 W/mK. En högre värmeledningsförmåga hos formationen ger en lägre maxtemperatur. Här uppmättes en temperaturökning på omkring 28°C. Beräkningar visade att samma material under isolerade förhållanden skulle ha ökat med cirka 93°C.

Studien kom fram till att tillsats av sand var mycket effektivt för att sänka värmeavgivningen. Beräkningar visade att en blandning med 60 % sand och vanlig portland cement med ett vattencementtal på 0,6 i en isolerad behållare skulle öka med 29,6°C. Om samma mönster kan följas som för den rena cementen, skulle detta innebära att temperaturen i ett normalt borrhål knappast skulle stiga mer än maximalt 10°C med denna blandning.

Slutsatsen av undersökningen var att hydratiseringsenergin endast kan utgöra ett problem under mycket extrema förhållanden eller vid stora inrasningar i borrhålet. Fig. 8 visar resultatet av beräkningar som gjorts om sambandet mellan temperaturökning i borrhålet och borrhålsdiameter. Detta gäller både den borrade diametern och eventuella inrasningar. Typ 1 cement är vanlig portland cement. Bilden illustrerar hur mycket temperaturen kan stiga lokalt där borrhå-

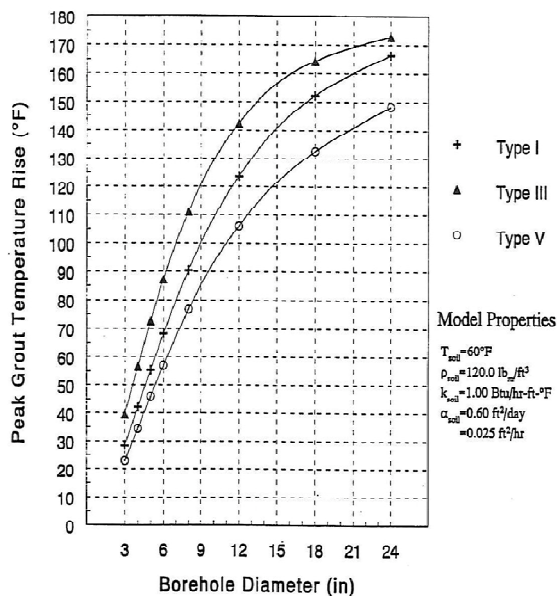


Fig. 8: De beräknade värdena för hur topptemperaturen i mitten av borrhålet stiger med ökande borrhålsdiameter för olika cementtyper. Bilden är hämtad från Heiberger et al (1997).

lets vägg rasat in och fyllts med cement.

2.2.3 Kontaktförlust mellan återfyllningsmaterial och kollektorslang

Ren cement och cement med tillsatser har mycket låg permeabilitet. Det rör sig om värden i storleksordningen $10^{-12} - 10^{-11}$ m/s. Efter studier av Allan (1997) och Allan och Philippacopoulos (1998) kunde man dock visa att permeabiliteten hos cement med och utan tillsatser gjuten kring en kollektorslang ökade. Man drog slutsatsen att detta berodde på osammanhängande hålrum och dålig kontakt mellan återfyllningsmaterialet och kollektorslangen.

I den första studien (Allan 1997) uppmättes glappet vid rumstemperatur, samma som vid gjutningstillfället. De observerade förändringarna hade där uppkommit till följd av volymförlust och värmeavgivning då cementen torkade. De här mikrostrukturerna var för ren cement 0,050 till 0,30 mm breda och för blandning av cement, sand och mjukgörare 0,025 till 0,075 mm (Allan 1997, Allan och Philippacopoulos 1998).

Påverkan på permeabilitet var försumbar eftersom systemet fortfarande understeg kravet på 10^{-9} m/s. För rena cementblandningar ökade permeabiliteten till mellan $1,5 * 10^{-11}$ och $4 * 10^{-11}$ m/s. I blandningarna där sand tillsatts skedde endast små förändringar på grund av den förbättrade kontakten med kollektorn.

I den andra studien (Allan och Philippacopoulos 1998) testades materialens funktion då köldbärarvätska av olika temperatur cirkulerades i slangarna. Vid varma temperaturer, 21°C och 35°C, uppgick permeabiliteten för ren cement med ett vattencementtal på 0,6 gjuten kring en kollektorslang till mellan $2,37 * 10^{-8}$ och $7,48 * 10^{-8}$ m/s. Vid en temperatur på 1°C, då slangen drar ihop sig, ökade permeabiliteten för systemet till $5,10 * 10^{-7}$ m/s. Detta är 510 gånger större än rekommendationen på 10^{-9} m/s.

Testerna på cement med ett vattencementtal på 0,55, 60 % sand av vikt och mjukgörare visade att för 21°C, och 35°C var permeabiliteten $1,93 * 10^{-9}$ och $5,37 * 10^{-10}$ m/s. Vid 1°C var värdet $1,57 * 10^{-7}$ m/s, och således är värdet lägre än för ren cement även om också denna blandning översteg gränsvärdet vid låga köldbärartemperaturer. I senare studier uppmättes medelvärden för materialets permeabilitet över flera cykler av temperaturförändringar mellan 35 och 3°C över cirka 100 dagar till $6,7 * 10^{-9}$ m/s för ren cement och $2,9 * 10^{-9}$ m/s för ett återfyllt rör med kollektorslangar (Allan och Philippacopoulos 1999).

Resultaten stämmer överens med liknande försök av Heiberger et al (1997). Här prövades flera typer av cement, bland annat en typ som sväller något under stelning, utan att få nämnvärt förbättrade resultat.

Kontaktförlust minskar också värmeöverföringen till kollektorslangen. Detta gäller både hålrum mellan både formationen, återfyllningen och slangen. Överföringen modellerades av Allan och Philippacopoulos (2000), som kom fram till att den minskar. Slutsatsen av detta är att materialet inte kan upprätthålla en tät kontakt med kollektorslangarna över hela året.

2.2.4 Frysning

Då vatten fryser i porerna hos cementbaserade material expanderar det och utövar ett tryck på materialet. Trycket kan vara tillräckligt stort för att orsaka allvarliga skador på cementen. Det som avgör sårbarheten mot frysning är bland annat pormängd, porstorlek, vattenmättnadsgrad och förekomsten av eventuella mikrosprickor från tidigare stresstillfällen (Emborg et al 2007). Mättnadsgraden styrs av materialets permeabilitet och markförhållanden. För att öka fryståligheten kan man minska vattencementtalet (Allan och Philippacopoulos 1998), eller tillsätta en luftporbildande ingrediens som skapar luftfyllda porer i den färdiga cementen. Om frysning sker kan dessa porer uppta expansionstrycket utan att cementen riskerar att skadas (Emborg et al 2007). Detta sker dock på bekostnad av materialets termiska konduktivitet som minskar kraftigt (Allan och Philippacopoulos 1998).

Porstorleken har betydelse eftersom vattnet i små porer kräver lägre temperaturer för att frysa jämfört med det i stora. Den frysbara vattenmängden vid en viss temperatur är alltså ofta mindre än den totala vattenhalten i cementen (Emborg et al 2007). I tabell 3 finns en tabell över porstorlekens inverkan på frystem-

Frystemperatur (°C)	Por diameter (µm)
- 2	0,127
- 6	0,044
- 10	0,027
- 15	0,019

Tabell 3: Temperaturen då porvattnet i betong fryser i porer med minskande storlek. Omarbetad från Emborg et al (2007).

peratur. Allan och Philippacopoulos (1998) testade fryståligheten hos en cementblandning med 60 % sand, mjukgörare och vattencementtal på 0,55. Block av cement fick stelna i 28 dagar. Därefter utsattes de för 300 cykler av frysning och tining. Materialet uppvisade endast ytliga skador. Ett av proverna hade också gjutits kring ett kollektorror för att simulera ett verkligt system. Efter frys- tiningscyklerna var glappet mellan röret och cementen i det närmaste oförändrat vilket bekräftades genom test av kontaktstyrka. Efter att ett luftporbildande medel tillsatts kunde man efter samma antal fryscyklar se ännu mindre skador. Så länge vattencementtalet hålls så långt som möjligt går alltså att framställa välfungerande cementblandningar som tål frysning utan att skadas.

En mycket viktig reservation angående frystålighet är att cement inte når sin fulla styrka förrän efter lång tid. Det rekommenderas att cementen får stelna under en månads tid innan den utsätts för påfrestningar. Om blandningen utsätts för frysning innan dess riskerar materialet att skadas och att mikrosprickor bildas i materialet som ger en sämre framtida hållfasthet.

Hur frysning av vatten i glappen som uppstår mellan cement och kollektor slang påverkar systemet har

inte utretts i den här undersökningen, men skulle potentiellt kunna ge upphov till problem.

2.2.5 Uttorkning

Uttorkning orsakar små volymförluster hos cement som kan uppgå till 0,5 % av totalvolymen (Allan 1997). Detta kan bidra till viss försämring av kontakten med kollektor slangen.

Allan och Philippacopoulos (1999) jämförde hur den termiska konduktiviteten förändrades vid uttorkning av ett cementbaserat återfyllningsmaterial med 60 % sand och cementvattental på 0,55, ren cement, ren bentonit och termiskt förstärkt bentonit. Slutsatsen var att det termiskt förstärkta cementbaserade materialet i långt större utsträckning behöll sin termiska konduktivitet trots uttorkning. Konduktivitetsminskningen hos olika material sammanfattas av Allan och Philippacopoulos (2008).

2.2.6 Miljöproblem

Att använda flygaska i betong och cement har varit kontroversiellt. Motståndarna menar att skadliga ämnen som fanns i det man förbränt koncentreras i askan och att potentiellt mycket höga halter av dessa ämnen kan förekomma i vissa askor. Det verkar dock finnas en konsensus bland forskare att avfallet förvaras lika säkert eller säkrare när det är bundet i cementen än i en deponi. Metallernas lakbarhet minskar i regel på grund av det höga pH-värdet inuti cementen och materialets låga permeabilitet hindrar genomströmning av vatten. Det finns dessutom material som efter förbränning inte ger askor med höga halter av farliga ämnen. Väsentliga energibesparingar som gynnar miljön kan även göras eftersom en mindre mängd energi-krävande cement förbrukas. En god sammanfattning av forskningsläget om flygaska i betong och cement ges av Gonzáles (2009).

I Sverige regleras användning av flygaska i betong enligt SS-EN 450. Flygaska från avfallsförbränning får inte användas utan endast rester från kolförbränning som genomgått rening.

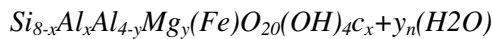
Allan (1997) analyserade lakbarheten av skadliga ämnen hos cementbaserade återfyllningsmaterial med flygaska. En cementblandning med vattencementtal på 0,6 och 60 % sand av vikt visade vid lakteter att pH-värdet på det genomströmmande vattnet höjdes. I testets inledningsskede låg pH-värdet på 10,80, och efter 28 dagar hade det sjunkit till 10,36. De tungmetaller som lakades från blandningen låg samtliga långt under riktvärden uppsatta både av amerikanska Environmental Protection Agency och svenska Naturvårdsverket. Mängden urlakade tungmetaller förändrades inte nämnvärt efter tillsats av 40 % klass F flygaska. Klass F innebär att askan bildas vid förbränning av bituminöst kol eller antracit (Allan 1997). Eftersom flygaskan ersatt cement minskade påverkan på pH-värdet. Vattnets pH-värde ökar på grund urlakning av Ca(OH)₂, men effekten minskar över tiden.

Naftalensulfonat, mjukgöraren som användes i

försöken av Allan (1997), är enligt rapporten naturligt nedbrytbar och dess hälsofarlighet är låg. Detta stämmer väl överens med den information som finns på EU:s kemikalieinspektion ECHA:s hemsida (CAS nummer: 68153-01-5).

2.3 Återfyllning med bentonitbaserade material

Den geologiska termen bentonit åsyftar en naturligt förekommande lera som bildas genom vittring av vulkanisk aska. Den består i regel till största delen av lermineralet montmorillonit. Det här mineralet är ett skiktisilikat som tillhör smektitgruppen. Dess kemiska formel är:



Där: $x < y$ och $0,4 < x + y < 1,2$.

sen långsammare (Lund och Remund 1996). Detta görs för att man i fält ska hinna injektera blandningen i borrhålet innan den blivit för trögflytande. Eftersom bentonitbaserade material inte stelnar på samma sätt som cementbaserade är de generellt mer flexibla i borrhålet. Detta innebär att de kan upprätthålla en tät kontakt med kollektorslangen trots dess termiska expansion och kontraktion vilket gynnar både tätningsförmåga och termisk konduktivitet (Remund och Smith 1997).

Effekterna av montmorillonitens vattenupptag är kända, men exakt vilka mekanismer som ligger bakom det är omdiskuterat. En mängd olika teorier och modeller har lagts fram som i varierande grad stämmer överens med olika försök. Några av dem diskuteras till exempel av Karnland (1997). En utredning av dessa är dock långt bortom det här arbetets omfattning och nedanstående text kommer därför hålla sig till en modell som stämt väl överens med majoriteten av artik-

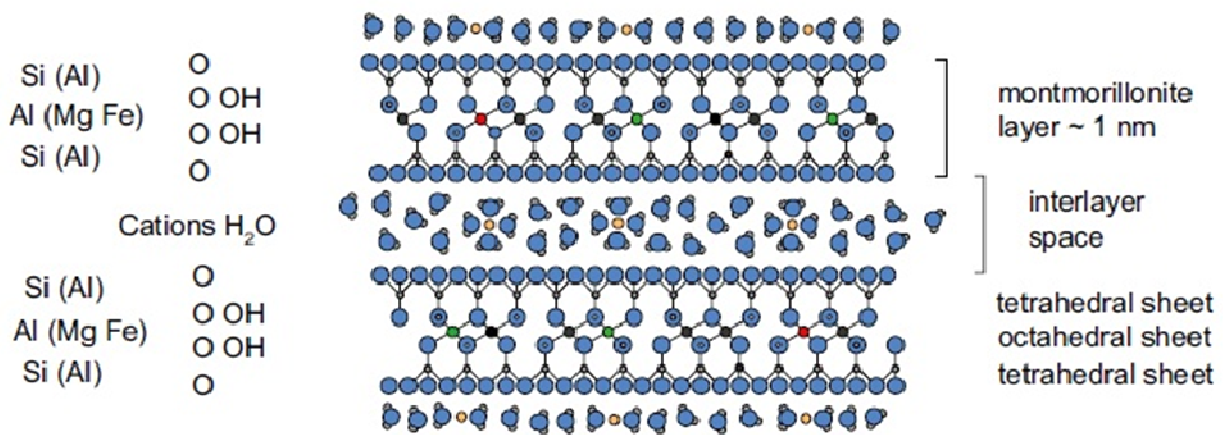


Fig. 9: Skiss av montmorillonitens kristallstruktur med vattenmolekyler mellan skikten. Bilden är hämtat från Karnland et al (2006).

I fig. 9 finns en principskiss över mineralets komplicerade kristallstruktur. Denna gör det möjligt för vattenmolekyler att ta sig in mellan skikten. Detta får ämnet att svälla många gånger sin egen volym, upp till 15 gånger vid normal vattenkemi (Remund och Smith 1997). Begränsas montmorillonitens expansion kommer den fylla ut alla porutrymmen i materialet och utöva ett kraftigt svälltryck på behållaren. Trycket kan i extremfall, om leran är mycket hårt packad, uppgå till omkring 10 MPa (Karnland et al 2006). Tack vare de här exceptionella svällegenskaperna kan bentonitlera bilda en vattentät och flexibel barriär samt i en blandning med hög andel vatten bilda tixotropiska vätskor. Detta innebär att vätskan stelnar när den inte är i rörelse men återfår sin låga viskositet då den stressas. Materialet används bland annat vid grundläggning av deponier och avfallsförvaring, samt i borrhälskor för att stabilisera borrhålsväggarna och förhindra att material sedimenterar (Remund och Smith 1997).

Vid användning som återfyllning av borrhål blandas leran i regel med vatten och andra ingredienser. Eventuellt tillsätts också ämnen som gör svällproces-

larna som citeras.

Mycket förenklat bygger teorin på att de olika skikten i montmorillonitens kristallsystem är negativt laddade. De måste därför balanseras av positivt laddade katjoner som lägger sig mellan dessa. Oftast rör det sig om natrium eller kalcium. Eftersom vatten kan infiltrera mellan lagren bildas där något som liknar en lösning av vatten och de fasta katjonerna. Lösningen står i kontakt med resten av vattnet omkring kristallerna och en koncentrationsskillnad uppkommer. När lösningar med olika koncentration sätts i kontakt med varandra kommer ett utbyte genom diffusion av lösta joner och flöde av vatten ske tills jämvikt uppnåtts. Eftersom katjonerna är en del av kristallstrukturen kan de inte förflytta sig utan jämvikten uppnås genom att vatten flödar in mellan lagren i montmorilloniten. Därmed sväller leran. Begränsas expansionen kommer samma kraft som får vattnet att röra sig in i mineralet utöva ett svälltryck (Karnland et al 2006).

En hel del forskning har gjorts på bentonit, men endast en mycket liten del är direkt fokuserad på dess användning som återfyllningsmaterial i energibrunnar.

På grund av detta måste vissa av resonemangen som förs nedan delvis betraktas som spekulativa. De förutsätter till exempel att vätskan som befinner sig mellan montmorillonitens skikt står i direkt kontakt med det övriga vattnet i borrhålet. Därmed kommer det hydrostatiska trycket inte påverka bentonitens svällförmåga eller verka komprimerande på bentoniten. I majoriteten av källorna tas heller inte detta tryck med som en faktor.

I följande kapitel kommer jag utreda hur de vanligaste tillsatserna påverkar ett bentonitbaserat återfyllningsmaterial samt hur materialet reagerar på salthaltigt grundvatten, frysning och uttorkning.

2.3.1 Ingredienser och effekt på materialen

Bentonit

Bentonit är en term som kan innefatta leror med relativt stora skillnader i egenskaper och sammansättning. Karnland et al (2006) studerade sammansättningen hos femton bentoniter och bentonitiska leror från olika områden i världen. Montmorillonithalten varierade mellan 30 och 80 % av vikten. De övriga procenten utgörs oftast av kvarts, fältspater, muskovit, kalcit och andra svällande eller icke svällande lermineraller. I studien kunde man också visa att det finns skillnader i mineralinnehåll till och med inom samma täktområde (Karnland et al 2006). Detta beror sannolikt på lokala variationer i substrat, avsättningsmiljö och vattenkemi på olika djup inom täktområdet. Resultaten styrks också av Lund och Remund (1993) som testade nio amerikanska, kommersiella återfyllningsmaterial. Samtliga produkter bestod av bentonit från de stora täktområdena i Wyoming, USA, varav vissa med tillsatta kemikalier. Trots den identiska källan varierade montmorillonithalten mellan 75 och 90 % av vikten torrsbstans.

I ett bentonitbaserat återfyllningsmaterial betyder en ökad bentonithalt generellt en högre viskositet och mer svårpumpad blandning, en lägre permeabilitet i det färdiga materialet och en minskad krympning vid uttorkning. Den termiska konduktiviteten ökar om bentoniten ersätter vatten, men minskar om den ersätts av sand (Paul och Remund 1997).

Montmorillonithalten i bentoniten som används har sannolikt betydelse för återfyllningsmaterialets funktion. Det finns en direkt relation mellan den och lerans svällförmåga. En högre halt av mineralet ger ett större svälltryck då leran kommer i kontakt med vatten. Leran kommer expandera åt det håll där det finns lägst mottryck. I en sluten behållare innebär en ökning av montmorillonithalten ett ökat tryck mot behållarens väggar, en minskning av materialets porositet och därmed även dess permeabilitet (Karnland et al 2006).

Hur dessa mekanismer fungerar i ett borrhål fyllt med bentonit-slurry har inte undersökts i det källmaterial som studerats i den här rapporten. Sannolikt kommer en hög koncentration av montmorillonit i bentoniten innebära att en mindre mängd lera behövs för att uppnå samma viskositet. Permeabiliteten påverkas antagligen mer av kornstorleksfördelningen och lerhal-

ten i bentoniten än av mängden montmorillonit av skäl som diskuteras senare i texten.

Vatten

Vattenhalt påverkar i flera avseenden ett bentonitbaserat material på samma sätt som ett cementbaserat. En ökad halt minskar till exempel dess viskositet.

Mekanismerna bakom bentonitens vattenupptag skiljer sig dock från cementens, och därför är det vissa skillnader på dess påverkan. Eftersom vatten suges in mellan lagren i montmorilloniten kommer en större del av återfyllningsmaterialets totalvolym bestå av vattenmolekyler. Därmed kommer materialet också dra ihop sig mer om det torkas ut. I försök av Paul och Remund (1997) fann man att en blandning med 84,7 % vatten av vikt förlorade över 50 % av sin volym, medan om vattenhalten minskades till 70 % minskade förlusten till 40 %.

Genom att öka andelen fast material i materialet minskas mängden vatten som kan förloras vid uttorkning.

Vattenhalten kan dock inte minskas hur mycket som helst utan att materialets pumpbarhet går förlorad. I samma studie av Paul och Remund undersökte man hur hög vattenhalt som är nödvändig. De rena bentonitmaterialen krävde som minst mellan 70 och 82 viktprocent vatten för olika produkter. Med 30 % tillsatt sand i samma produkter krävdes mellan 46 och 56,5 % vatten och med 60 % sand mellan 28 och 34 %. Att mängden vatten som behövs för att få fram en pumpbar blandning minskade trots att andelen fasta partiklar ökar beror på att man minskade bentonithalten med ökande sandhalt. För varje produkt fann man att vattenhalten endast kunde varieras mellan 1-3 procentenheter innan pumpbarheten förlorades. Frånsteg från detta intervall gav antingen för lös konsistens där det fasta materialet föll ur suspension, eller för tjock vilket gjorde blandningen omöjlig att pumpa.

Med 28 % vatten förlorade materialet endast omkring 5 % av sin volym. Sanden i sig bidrar även till att minska volymförlusten ytterligare eftersom den bildar en struktur av korn som stöttar materialet (Paul och Remund 1997).

Eftersom vatten har lägre termisk konduktivitet än bentonit kommer en ökad vattenhalt ge en lägre värmeledningsförmåga. En högre vattenhalt ökar också materialets permeabilitet (Paul och Remund 1997).

Det är mycket viktigt att det vatten som används vid tillredning av slurryn är rent. I handledningen av Remund och Smith (1997) rekommenderas kranvatten eller en drickbar kvalitet.

Sand

Förutom att minska andelen vatten i materialet innebär en tillsats av sand en betydande ökning av den termiska konduktiviteten. Lund och Remund (1993) tog fram en användbar blandning som hade 1,65 W/mK, vilket är dubbelt så hög värmeledningsförmåga som ren bentonit. De kom fram till att kvartsit eller ren kvartssand gav störst ökning och att den maximala

mängden som kunde tillsättas utan att blandningen förlorade sin pumpbarhet var cirka 50 % av vikt.

Att blanda i sand ökar blandningens medelkornstorlek. Det innebär dock inte nödvändigtvis en ökning av permeabiliteten. Detta visades i den senare studien av Paul och Remund (1997) som kom fram till att det var först vid tillsatser över 50 % som permeabiliteten började påverkas negativt. Porutrymmena mellan sandkornen fylls av lerpartiklar eller blir suspenderade i en bentonitgel och den effektiva porositeten förändras därmed inte särskilt mycket.

I rapporten redovisas försök på nio olika kommersiella återfyllningsmaterial. Efter tillsats av 40 % sand av vikt levde fem produkter upp till kravet täthetskravet på 10^{-9} m/s.

Tillsats av sand ökar blandningens viskositet om det ersätter vatten men minskar den om den ersätter bentonit. Det ökar dessutom blandningens densitet.

Cement

Bentonitblandningar kan förstärkas med cement. Enligt den tyska handledning om hur geoenergisystem ska konstrueras (VDI 2001) gör en tillsats av 10 – 25 % cement att återfyllningsmaterialet blir frostbeständigt ner till -15°C . Det rekommenderas att man använder cement utblandad med en stor andel malt slagg, så kallad HOZ. Slaggen påverkar cementen på liknande sätt som flygaska, vilket diskuterades i stycke 2.2.1. För hög andel cement gör dock att materialet stelnar och förlorar sina plastiska egenskaper. Cementen har en mycket liten effekt på den termiska konduktiviteten (Paul och Remund 1997).

Det har ifrågasatts om cement kan användas tillsammans med bentonit eftersom den skulle ha en negativ effekt på bentonitens svällförmåga på grund av sin pH-höjande effekt och sitt innehåll av Ca^{2+} - och OH^{-} - joner (Remund och Smith 1997). I en studie av Karnland et al (2005) kunde man dock visa att till och med i kontakt med mättade lösningar av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ påverkades bentoniten mycket lite. Sannolikt krävs omfattande kontakt med lakvatten för att få en märkbar effekt, till exempel då bentonit tillsätts i ett cementbaserat material.

2.3.2 Frysning

Om bentonit utsätts för temperaturer under fryspunkten finns det risk att vatten som absorberats av mineralen kan frysa, expandera och därmed förändra materialets egenskaper eller omfördela återfyllningsmaterialet. En av frågorna den här rapporten försöker besvara är hur bentonit reagerar på frysning. På grund av bristande källmaterial behandlar stycket nedan främst ren bentonit och vatten.

Svälltryck och frystemperatur

Det finns faktorer som påverkar vid vilken temperatur bentonit fryser. I laborieförsök kunde Birgersson et al (2010) visa att is inte bildas i leran förrän vid en specifik temperatur. Man fann att fryspunkten är direkt relaterad till bentonitens svälltryck vid 0°C där ett högt

svälltryck ger lägre frystemperatur. Svälltrycket avgörs av koncentrationen av montmorillonit inom en viss volym och en hög koncentration kan uppnås genom att packa bentoniten innan vatten tillsätts. När temperaturen sjunker under 0°C börjar svälltrycket gradvis avta tills bentoniten fryser. Detta sker när svälltrycket reducerats till 0 Pa. De här processerna är dock långsamma. I försöket föll svälltrycket gradvis under 80 dagar innan det försvunnit helt.

Ett högt svälltryck kan dock bara uppkomma om bentonitens volymexpansion begränsas, annars resulterar det i en ökad volym. I försöket packades torra bentonitprover till en hög densitet och utövade då ett svälltryck på omkring 7-8 MPa (cirka 70-80 bar) när de sattes i kontakt med vatten. Bentoniten hade då en fryspunkt på cirka -6°C . Proverna med lägre densitet gav upphov till ett mindre svälltryck och en högre fryspunkt.

Det är inte helt självklart hur dessa resultat ska översättas till de förhållanden som råder i en bentonit-slurry som fyller ett borrhål. En konventionell blandning, med enbart bentonit och vatten, har en densitet som sällan överstiger 1200 kg/m³. Andelen vatten är minst 70 % (Paul och Remund 1997) och mängden bentonit är därför endast 360 kg/m³. Blandningen tillreds på ytan och pumpas sedan ner i borrhålet. I kommersiella produkter finns dessutom ibland kemikalier iblandade som ska fördröja bentonitens vattenupptag tills den är på plats i borrhålet. Dessa ingrediensers potentiella effekter i det här sammanhanget har inte inkluderats i diskussionen.

Koncentrationen av montmorillonit är med andra ord många gånger lägre i en slurry än i laborieförsöken som tas upp här. Ett borrhål är knappast heller en sluten volym där leran stängs in och kan utöva höga svälltryck, utan expansionsutrymme finns i regel i form av sprickor och ojämnheter i borrhålsväggen, eller vertikalt i borrhålet. Det maximala svälltryck som kommer kunna utövas av montmorilloniten längst ner i borrhålet är endast den överlagrande vikten från bentoniten, minus den upplyftande kraften från vattnet i borrhålet.

Detta innebär sannolikt att endast ett mycket litet svälltryck kan förekomma i ett borrhål fyllt med bentonit-slurry. Antagligen kommer detta tryck vara för lågt för att influera fryspunkten och bentoniten kommer troligen att börja frysa redan då temperaturen i borrhålet understiger cirka 0°C .

Ytkrafter

Ytterligare en faktor påverkar bentonitens frysning. På grund av lermineralens ytkrafter kommer inte allt vatten frysa på en gång när fryspunkten nås. En ökande andel vatten fryser med sjunkande temperatur (Emborg et al 2007). I tabell 4 visas andelen ofrusat vatten som finns kvar i en lera med specifik yta på 600 m²/g och en vattenhalt på 37 % med densiteten 1800 kg/m³. Specifik yta är den totala partikelytan per massaenhet torrt material. Provet i tabellen har en bentonithalt på 1120 kg/m³ vilket ger en total yta av ler-

Temperatur (°C)	Ofruset vatten (%)
- 1	44
- 2	37
- 5	29
- 10	24

Tabell 4: Andelen ofruset vatten vid olika temperaturer hos en lera med specifik yta på 600 m²/g. Tabellen är omarbetat från Emborg et al 2007.

partiklar på 6,72 * 10⁸ m²/m³. Den bentonit-slurry som nämndes ovan skulle ha en bentonithalt på 360 kg/m³ och, förutsatt att den har samma specifika yta, en partikel-yta på 2,16 * 10⁸ m²/m³. Blandningen kommer alltså ha färre lerpartiklar och därmed mindre partikel-yta per kubikmeter som vatten kan interagera med. I en sådan slurry kommer det därför en större andel vatten vara fruset vid varje temperatursteg än vad som visas i tabellen. Hur mycket är dock svårt att säga och behöver undersökas i försök.

Effekt av frysning på materialet

I ett borrhål har bentoniten antagligen fått expandera mer eller mindre ohämmat i motsats till i en sluten behållare. Detta borde innebära att en förlust av svällförmågan då temperaturen understiger 0°C resulterar i att montmorilloniten drar ihop sig. Detta leder till att vatten frisätts, att materialets viskositet minskar och permeabilitet ökar. Potentiellt skulle det kunna gynna att islinser bildas i borrhålet, något som annars är osannolikt på grund av materialets låga hydrauliska konduktivitet (Birgersson et al 2010). Eventuellt är detta något som borde undersökas i framtiden.

I försöket av Birgersson et al (2010) kunde man visa att svällförmågan hos små, packade prover av bentonit inte påverkas av frysning. Processen var till 100 % reversibel och samma svälltryck alstrades av bentoniten före och efter frysning för en viss temperatur. Man kunde också visa att kontakt med salthaltigt grundvatten inte resulterar i en höjning av bentonitens fryspunkt, trots att dess svällförmåga minskar.

Det går inte att utesluta att bentonit skulle kunna sedimentera i borrhålet då temperaturen närmar sig fryspunkten, blandningens viskositet minskar och kanske förlorar den bärförmågan. Problem skulle också kunna uppstå vid tining. Ytterligare forskning krävs för att utreda detta.

2.3.3 Uttorkning

Ett av de största problemen med bentonitbaserade material är deras höga vattenhalt. Den gör återfyllningsmaterialet mycket känsligt för uttorkning. Detta kan ske i områden med torra markförhållanden och djupa grundvattennivåer, vilket är ovanligt i Sverige. Problemen förvärras då varm vätska cirkuleras i kollektorerna (Remund and Smith 1997). Försök av Paul och Remund (1997) visade att ren bentonit kan förlora upp till 50 % av den volym den hade i borrhålet före

uttorkning. Detta gör att materialet spricker upp, blir betydligt mer permeabelt och förlorar mycket av sin termiska konduktivitet. Tillsats av sand gav en kraftig minskning av volymförlusten. Efter att ha blandat i 10 – 60 % sand uppgick volymförlusten till 5,9 – 37 % där ökande sandhalt gav en minskande volymförlust. Problemen med uppsprickning och minskningen av den termiska konduktiviteten kvarstår dock (Allan och Philippacopoulos 1998). Värmeledningsförmågan hos ren bentonit minskar från cirka 0,8 W/mK till 0,4 W/mK och för bentonit förstärkt med sand från 1,46 W/mK till 0,5 W/mK (Allan och Philippacopoulos 1999).

Givetvis förstör detta också materialets tätande egenskaper. Volymförlusten är dock reversibel om tillräckligt mycket vatten tillförs, till exempel via nederbörd eller höjda grundvattennivåer (Remund och Smith 1997).

2.3.4 Saltvatten

I djupa borrhål i områden som någon gång legat under högsta kustlinjen är det risk att stöta på relikt havsvatten. I vissa geologiska formationer kan även salt lösas ut i vattnet vilket naturligt ger en ökad mängd lösta salter ju längre vattnet transporterats. Det har ifrågasatts hur en bentonitåterfyllning påverkas av kontakt med salthaltigt vatten. Detta har studerats i laboratorium bland annat av Karnland (1997a) och Karnland et al (2006).

Båda studierna grundade sig på att mäta svälltrycket hos ren bentonit i en sluten behållare. Karnland (1997a) prövade hur lerans svälltryck förändrades vid kontakt med mättad lösning av NaCl (6,1 M). Man nådde slutsatsen att saltvattnet minskade svälltrycket markant, men att dess påverkan kunde motverkas av en ökad densitet hos bentoniten i behållaren. Lera och vatten med en densitet på 2000 kg/m³ utövade ett svälltryck på 6 MPa i en sluten behållare. När den utsattes för den mättade saltlösningen minskade svälltrycket till 2 – 2,5 MPa. Man beräknade också att svälltrycket helt skulle försvinna om bentonitblandningens densitet understeg 1800 kg/m³ och utsattes för en mättad saltlösning. Eftersom montmorillonithalten varierar hos olika bentoniter kommer denna gräns variera mellan olika prover. Leran som prövades hade dock god kvalitet med hög montmorillonithalt.

I den senare studien av Karnland et al (2006) baserades försöken istället på torrdensitet. Man jämförde femton olika bentoniter och bentonitiska leror från olika delar av världen. Proverna packades till olika densitet i en volym på 4,8 cm³, vattenmättades och utsattes sedan för saltlösningar med koncentrationerna 0,1, 0,3, 1,0 och 3,0 M. Som referens har vanligt havsvatten i regel en salthalt i storleksordningen 0,6 M. Efter försöket torkades proverna och vattenkvot bestämdes för att kunna avgöra hur stor mängd bentonit som funnits i behållaren.

Även här uppmättes ett mycket tydligt samband mellan ett minskande svälltryck och en ökande salt-

halt. I försöket testades också salthaltens påverkan på materialets permeabilitet. Resultaten i det här försöket visar att densitet och typ av bentonit spelade långt större roll för vattenledningsförmågan än vattnets salthalt. Det ska dock betänkas att ett väsentligt svälltryck upprätthölls även vid höga salthalter under försöken, eftersom bentonitproverna var så hårt packade. Proverna med lägre densitet, och därmed lägre svälltryck, påverkades mer av en ökande salthalt. Bentonitens torrdensitet varierade i experimentet mellan 440 och 1770 kg/m³.

En typisk slurry innehåller, som tidigare nämnt, cirka 360 kg/m³ bentonit. En i sammanhanget låg andel, vars expansion dessutom inte begränsats utan fått nå sin maximala storlek. Sannolikt förekommer endast ett mycket litet svälltryck i borrhålet. Samma reservationer gäller i det här resonemanget som i stycket om frysning.

Enligt Karnland et al (2006) som diskuterades tidigare, kommer kontakt med saltvatten göra att montmorilloniten förlorar en del av sin svällförmåga. Man kunde också visa att förlusten var fullständigt reversibel och att samma svälltryck alstrades från leran när salthalten sjönk igen. I en slurry där montmorilloniten fått svälla ut till sin fulla kapacitet kommer detta antagligen innebära att leran drar ihop sig. I så fall pressas vatten ut ur kristallstrukturen, vilket ger blandningen en minskad viskositet. Om detta stämmer finns risken att blandningen förlorar sin bärförmåga och att fasta partiklar sedimenterar.

Resonemanget stöds av det faktum att en viskositeten hos bentonit-slurrys ökar under sättningsfasen allt eftersom de tar upp vatten (Remund och Smith 1997). Förhållandet mellan salthalt och viskositet bekräftas också av studier av bentonitsuspensioners reologi (Abu-Jdayil 2010 och Kelessidis 2008), men där ges en annan förklaring till hur fenomenet uppkommer. I försöken av Abu-Jdayil (2010) testades hur bentonit-suspensioner med en högsta bentonithalt på 10 % reagerade på NaCl-lösning med koncentrationer på 0,02 – 0,20 M. Man nådde slutsatsen att suspensionens viskositet minskade med ökande salthalt. Effekten på viskositeten minskade med ökande andel bentonit. De tixotropa egenskaperna påverkas också på samma sätt som viskositeten (Kelessidis 2008).

Paul och Remund (1997) fann att permeabiliteten hos bentonitbaserade återfyllningsmaterial minskade med tiden under upp till 80 timmar efter blandning. Detta antogs bero på att hydratiseringsprocessen fortgår under denna tidsperiod och att lerpartiklarna sväller och successivt täpper igen porutrymmen i materialet. Därmed är det sannolikt att en minskad svällförmåga hos montmorilloniten orsakad av kontakt med salt grundvatten kommer innebära att återfyllningsmaterialet får en ökad permeabilitet.

I studien av Abu-Jdayil (2010) blandades saltet ner i bentonit-slurryn och effekten kunde mätas efter kort tid. Detta är med stor sannolikhet inte analogt med hur reaktionen kommer bli i ett geoenergisystem. Hur snabbt saltvatten kan tränga in i och påverka ett åter-

fyllningsmaterial med låg hydraulisk konduktivitet i ett borrhål och hur stor påverkan det kan få är osäkert. Detta är något som behöver studeras under förhållanden som är mer lika de som råder i ett borrhål.

2.3.5 Miljöproblem

Ingen nämnvärd miljöpåverkan kan förväntas från det naturliga materialet bentonit. Eftersom det är en vitt-ringsprodukt har mobila ämnen sannolikt redan lakats ur i stor utsträckning. De mineralogiska studierna som genomfördes av Karnland (2006) visade att inga av proverna innehöll höga halter av skadliga ämnen.

Vid industriell framställning av återfyllningsmaterial och slurrys kan tillsatta kemikalier förekomma för att förändra bentonitens egenskaper. Deras eventuella miljöpåverkan har inte utretts i den här rapporten.

3. Återfyllning och geoenergisystem

Hittills har resultaten av en undersökning av de vanligaste återfyllningsmaterialen och olika problem som kan uppstå med dem presenterats i den här rapporten. En återfyllning för med sig både positiva och negativa saker jämfört med att låta borrhålet vara uppfyllt med vatten. Den viktigaste fördelen är kanske att ett återfyllt borrhål inte riskerar att sprida föroreningar.

3.1 Kostnad att återfylla

Det medför dock en kraftigt ökad kostnad för material och arbete. Själva borrhningen kostar omkring 50 000kr eller 250 – 400kr/meter (Andersson 2011). Att återfylla ett borrhål med en diameter på 165 mm, ett djup på 100-250 meter fyllt med en enkel kollektorslang med en yttre diameter på 40 mm kräver i storleksordningen 7000 – 18500 liter material. För en dyr, högpresterande, cementbaserad produkt innebär detta, bara för materialet, ett kostnadstillskott på mellan 16 300 och 43 200 kr. Att återfylla borrhålet medför alltså en signifikant ökning av systemets installationskostnad.

Till exempel i vissa områden i USA är det vanligt med mycket djupa grundvattennivåer eller torrlagda hål. Eftersom luft har extremt dålig termisk konduktivitet behövs under dessa omständigheter någon form av återfyllning för att systemet ska kunna fungera. I delvis vattenfyllda hål kan återfyllning också få en gynnsam effekt på systemens prestanda. Sådana förhållanden är dock mycket sällsynta i Sverige, och återfyllning kommer därmed i de allra flesta fall minska borrhålets effektivitet. Detta måste kompenseras med ett djupare borrhål vilket ökar kostnaden än mer.

Ur ekonomisk synvinkel är fullständig återfyllning av energibrunnar mycket ogynnsamt och kan medföra att en del entreprenader inte kan utföras.

3.1.1 Delvis återfyllt borrhål

För att säkerställa att utsläpp från ytan inte riskerar att orsaka skada ska borrhålets övre delar alltid tätas av

mot ytan och de övre jordlagren (Remund och Smith 1997). I Sverige uppnås detta med foderrör (SGU et al 2008).

De ekonomiska problem som diskuterades ovan innebär att alternativa lösningar blir mycket attraktiva. Den extra läckagerisk som ett borrhål kan utgöra kommer av att man av nödvändighet ibland borrar igenom naturliga, tätande marklager som avgränsar akvifärer. Så länge dessa lager återställs, till exempel genom att återfylla hålet har markförhållandena i de flesta fall inte förändrats nämnvärt. I vissa situationer är det tänkbart att ett likvärdigt skydd kan uppnås till exempel genom att bara fylla delar av borrhålet.

Handlar det om föroreningar som flyter ovanpå grundvattnet, till exempel av typen LNAPL, icke vattenlösliga vätskor som är lättare än vatten, såsom till exempel olja, tillför kanske inte en fullständig återfyllning något som inte redan åstadkoms av foderröret och ett tätslutande lock. När det gäller djupt liggande saltvatten är det inte orimligt att endast borrhålets nedre delar behöver tätas upp till den översta akvifärens nederkant. Så länge hela resterande borrhålet är borrar i samma akvifär och energibrunnen tätas upp till det lager som naturligt avgränsar den saltvattenförande formationen bör inte en återfyllning även av resten av borrhålet fylla något syfte. Däremot ökar det kostnaderna för entreprenaden. Hur lämpliga sådana här lösningar är beror dock helt på de lokala geologiska och

hydrogeologiska förutsättningarna, vilken typ av förorening som ska avvärjas och vilken typ av objekt som ska skyddas. Dessa faktorer måste utredas grundligt innan ett beslut tas och lösningarna kommer sannolikt behöva skraddarsys för varje fall.

Remund och Smith (1997) diskuterar ett fåtal situationer där man menar att en fullständig återfyllning är onödig och liknande alternativa lösningar är möjliga. Detta eftersom borrhålets hydrogeologiska påverkan inte förändras av att hela borrhålet fylls under de omständigheterna. Om hela borrhålet är i en torr, porös formation utan grundvattenföring finns ingen risk att akvifärer korskontamineras. Om hela borrhålet är i samma akvifär och grundvattnet där är stillastående förändrar inte borrhålet de hydrogeologiska förhållandena. Om hålet är borrar i en tät bergart med mycket litet grundvattenflöde fungerar berget i sig som en tätning. I dessa tre fall rekommenderas att borrhålet övre delar tätas och resten fylls med ett material med så bra värmeledningsförmåga som möjligt eller lämnas vattenfyllt.

3.2 Bucklingstryck, densitet och maximalt borrhålsdjup

En av den här rapportens frågeställningar var om det fanns någon begränsning på hur djupa hål som kunde återfyllas. Den begränsande faktorn är sannolikt kollektorsslängarnas tryckbeständighet, det så kallade

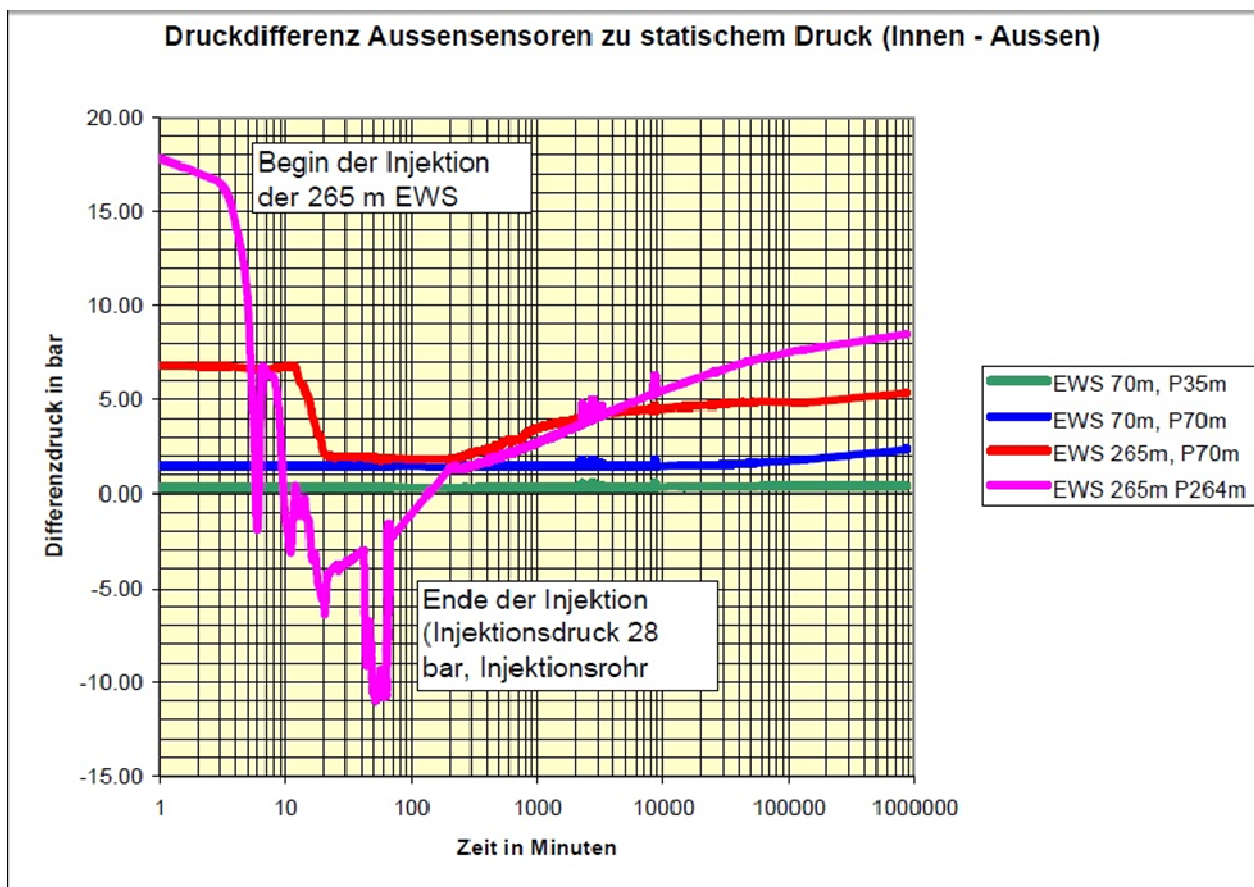


Fig. 9: Diagram över tryckskillnaderna inuti kollektorsslängarna och utanför då ett återfyllningsmaterial injekteras i borrhålet. Hämtat från Rohner et al (2001).

bucklingstrycket. Det är den trycknivå som slangarna kan utsättas för innan de börjar deformeras. Slangarna tål större belastning inifrån än utifrån. Hur hög belastning de tål beror dels på vilket material de är gjorda av och dels deras tjocklek i förhållande till omkrets. En standardslang som används i vattenfyllda borrhål görs av PE80-material och kan ha en diameter på omkring 40 mm samt en vägg tjocklek på 2,4 mm (SDR 17). Denna slang motstår momentant ett yttre tryck på omkring 200kPa (2 bar) innan den deformeras. Om den belastas under lång tid tål den mindre, cirka 100 kPa (1 bar). Detta kan jämföras med en slang som är anpassad för återfyllda borrhål och har 3,7 mm tjocka väggar (SDR 11). Denna tål momentant cirka 600 kPa (6 bars tryck) och en långtidsbelastning på 400 kPa (4 bar) utifrån. Dess inre tryckåtlighet ligger på 1,6 MPa (16 bar) (Geotec et al 2005).

Ett yttre hydrostatiskt övertryck uppkommer om vätskan i borrhålet har högre densitet än köldbäraren som cirkuleras i kollektorerna. Eftersom köldbäraren normalt har nästan samma densitet som vatten blir densitetsskillanden i vattenfyllda borrhål liten. Därmed blir övertrycket litet även i djupa borrhål. Med en köldbärare bestående av vatten och 30 % av volymen etanol blir tryckökningen cirka 0,6 kPa/m. De olika återfyllningsmaterialen har en densitet på mellan 1100 – 2200 kg/m³. Variationerna är alltså stora men samtliga material är betydligt tyngre än vatten. Detta innebär att slangarnas bucklingstryck kan nås redan i grundare hål.

Återfyllningsmaterialen är i regel endast flytande under själva injekteringsfasen och stelnar sedan i olika utsträckning med tiden. Sannolikt innebär detta att de högsta hydrostatiska trycken som materialen utövar på

slangarna uppstår medan borrhålet fylls. I takt med att de stelnar minskar trycket. De material som stelnar fullständigt kommer troligtvis till slut inte utöva något tryck alls, särskilt de cementbaserade som drar ihop sig något. Om borrhålet före återfyllning var vattenfyllt kommer trycket plana ut på samma nivå som om det vore vattenfyllt. Detta beror på att cementen inte är helt tät utan att vatten kommer sippra genom materialet och forma en vattenpelare i samma höjd som om cementen inte vore där. De material som efter stelning fortfarande är plastiska, exempelvis bentonit, kommer sannolikt fortsätta att utöva ett visst tryck. Hur stor del av trycket som försvinner vid stelning beror på flera fysikaliska faktorer. En utredning av dessa för de många olika återfyllningsmaterial som finns skulle vara mycket omfattande och ligger bortom det här arbetets perspektiv. Principerna bakom resonemanget stöds dock av fältförsöket av Rohner et al (2001). Resultaten från en del av detta visas i fig. 9.

I försöket som illustreras i diagrammet kunde man visa att det yttre trycket steg med 2,8 MPa (28 bar) då materialet injekterades i ett 265 meter djupt borrhål. Stigningen avtog långsamt tills nettoförändringen var cirka 1,0 MPa (10 bar).

Vad det här betyder i sammanhanget är att det inte enbart är återfyllningsmaterialets densitet i förhållande till slangarnas yttre tryckåtlighet som sätter gränserna för det maximala borrhålsdjupet. Så länge den maximala, momentana påfrestningen på kollektorslangen klaras av är det snarare det slutliga trycket som återfyllningen utövar efter den har stelnat som är begränsande. En elegant metod för att uppnå detta presenteras av Rohner et al (2001). Genom att fylla slangarna med vatten eller köldbärare och försluta dem kan de inte

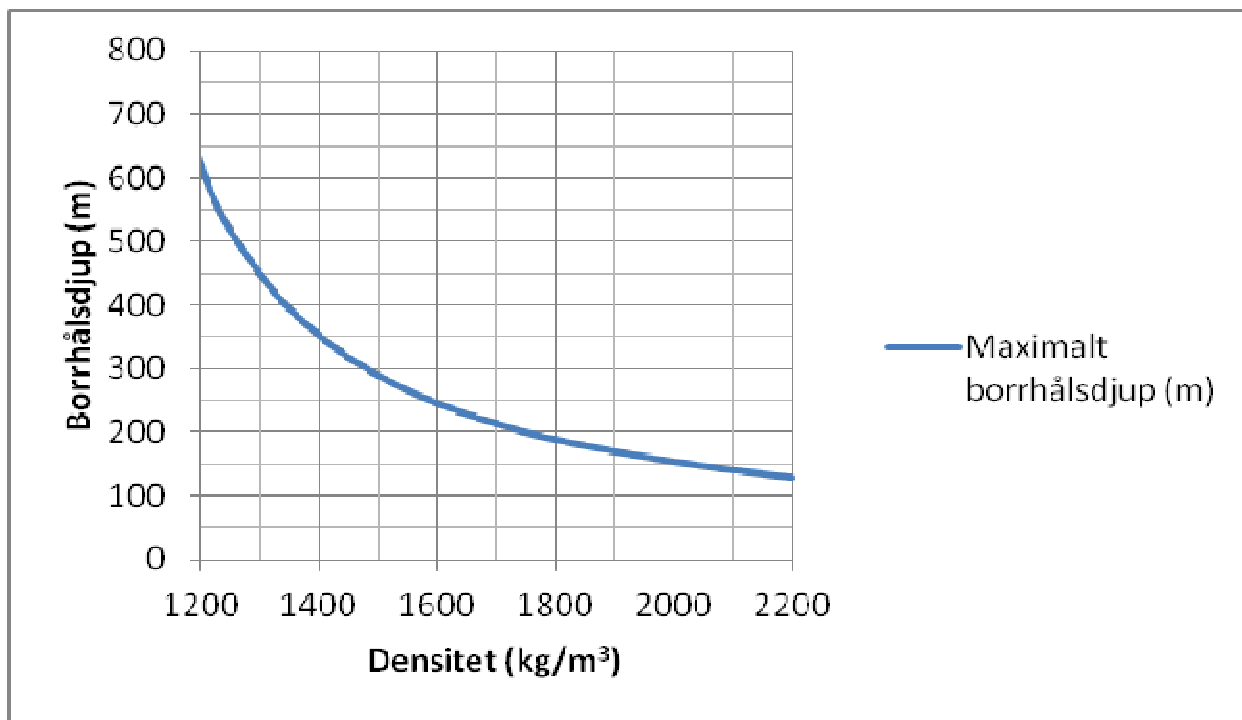


Fig. 10: Det teoretiskt maximala borrhålsdjupet som går att återfylla med ett material av en viss densitet, utan att trycket överstiger kollektorslangens inre bucklingstryck på 1,6 MPa (16 bar).

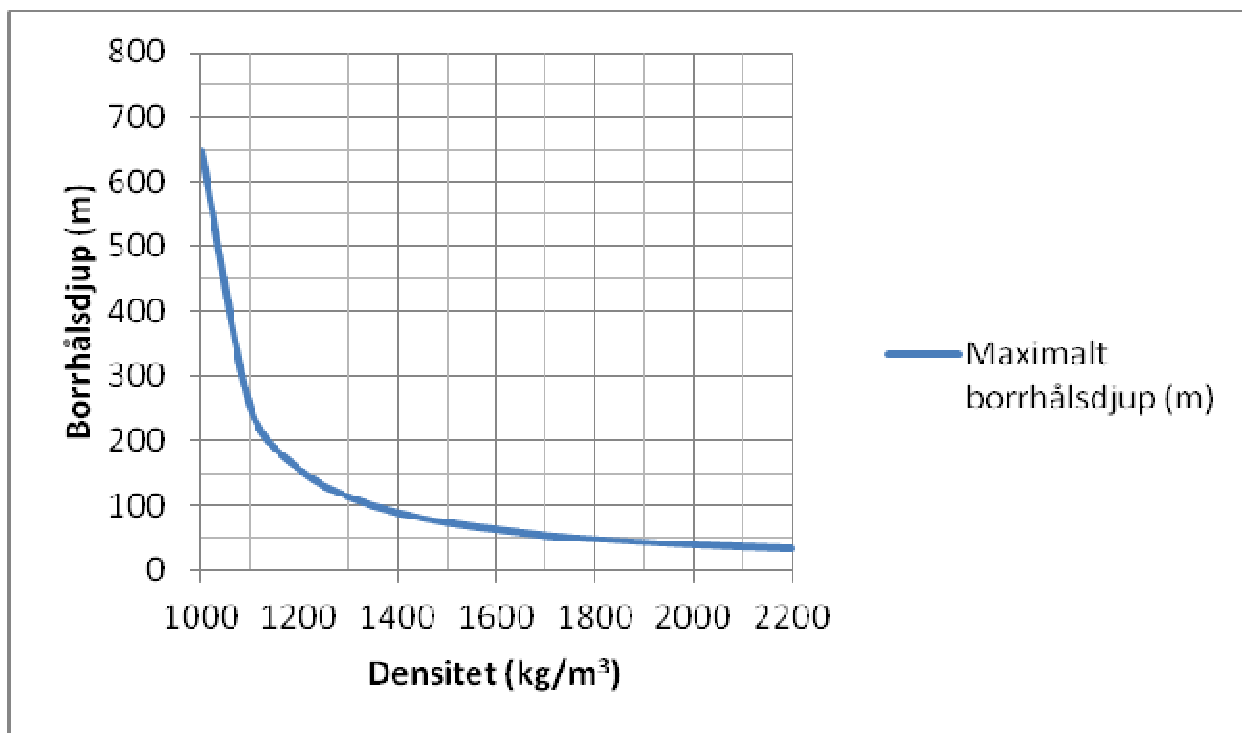


Fig. 11: Det teoretiskt maximala borrhålsdjupet för att det yttre övertrycket inte ska överstiga 0,4 MPa (4 bar) vid olika densitet hos återfyllningsmaterialet.

komprimeras, förutsatt att förslutningen är tät och tål trycket. En annan metod är att trycksätta slangarna under återfyllningen. Båda metoderna har samma begränsning, att det övertryck som bildas i slangarna till skillnad från ett hydrostatiskt tryck verkar lika mycket över hela slangen. Ett inre övertryck på 1,6 MPa (16 bar) längst ner i borrhålet kommer medföra ett lika stort tryck längst upp där inget yttre hydrostatiskt mottryck finns. Detta innebär att det är slangarnas inre trycktålighet som avgör det maxdjupet förutsatt att materialets tryckutövning minskar till nivåer som kollektorslangen tål när det är dags att bryta förslutningen och koppla ihop systemet.

Det tryck som förslutningen samt den del av slangen som är ovanför återfyllningsmaterialet belastas med är lika stor som skillnaden i hydrostatiskt tryck mellan vätskan inne i röret och det tryck som utövas utifrån längst ner i borrhålet. En kollektorslang anpassad för återfyllda borrhål tål ett inre tryck på omkring 1,6 MPa (16 bar) utan att ta skada. I fig. 10 illustreras det maximala djupet som det är praktiskt möjligt att återfylla med material av varierande densitet utan att trycket inuti slangarna överstiger denna nivå.

Detta förutsätter dels att slangen tål 1,6 MPa (16 bars) inre tryck, att förslutningen håller och att köldbäraren består av vatten utblandat med 30 volymprocent etanol. Framför allt förutsätter detta att återfyllningsmaterialet stelnar mer eller mindre fullständigt och utövar ett mindre tryck med tiden. Hur mycket det minskar beror på vilket material som används. För ett material som fortsätter att belasta kollektorslangen på lång sikt kommer den begränsande faktorn enligt ovanstående teori istället vara slangarnas yttre trycktå-

lighet. I fig. 11 illustreras det maximala djupet som går att fylla om återfyllningsmaterialet fortsätter att utöva sitt initiala tryck och alltså inte får överstiga kollektorns yttre bucklingstryck på 400 kPa (4 bar).

De två figurerna visar extremvärdena för det maximala borrhålsdjupet. Gränserna för material som stelnar helt och upphör att utöva ett tryck på kollektorslangarna, samt för ett material som inte stelnar alls utan fortsätter utöva hela sitt tryck. Sanningen ligger antagligen någonstans mellan dessa och varierar för olika typer av material. Syftet med graferna är att åskådliggöra principerna. Beräkningarna tar inte hänsyn till det tryck som utövas av anläggningen under drift.

3.3 Frysproblem i återfyllda borrhål

Tidigare diskussion om frysning har varit centrerad kring hur det påverkar materialets täthet. Om vatten eller återfyllningsmaterial fryser i borrhålet har det förekommit att kollektorslangarna kläms ihop och skadas då vattnet expanderar. Vattenfyllda borrhål fryser i regel från toppen och neråt. Detta gör att isen oftast kan expandera vertikalt i borrhålet, vilket inte riskerar att skada kollektorn. Endast om vatten som stängts in mellan ispartier fryser tvingas dess expansion in mot kollektorslangarna (Ahlström 2004). I dessa sällsynta fall kan skador uppkomma på systemet eller dess funktion försämrats.

Hur detta påverkas av att borrhålet är återfyllt är osäkert och få dokumenterade fältförsök har funnits att tillgå. Å ena sidan begränsas vattenflödet och vattentillgången i borrhålet. Det är till exempel känt att siltiga jordarter är benägna att orsaka tjälskador eftersom

Belastungsdiagramm Beginn der Eisbildung

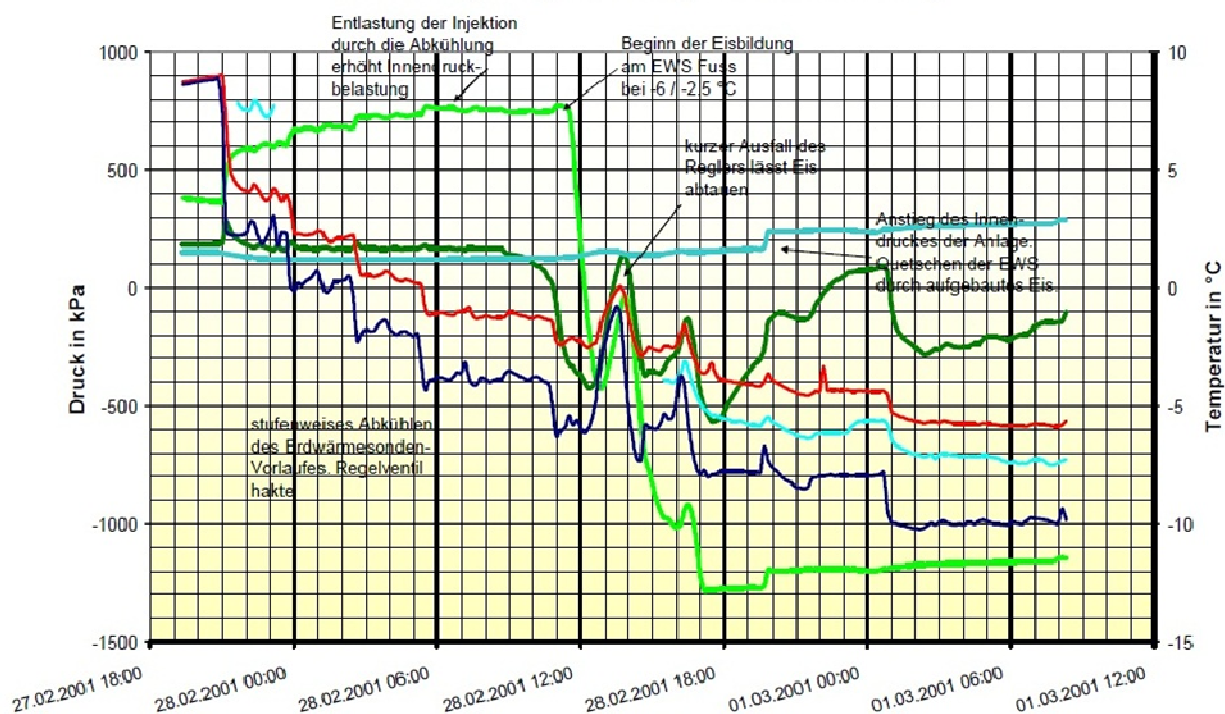


Fig. 12: Skillnaden mellan det yttre och det inre tryck som utövas på kollektorslangen under frysning av återfyllningsmaterialet i borrhålet. Hämtat från Rohner et al (2001).

de kombinerar en hög kapillär stighöjd med relativt hög permeabilitet. Leriga jordarter har alltför låg permeabilitet för att omfattande isbildning ska kunna ske. Å andra sidan är det tänkbart att materialet i sig stänger in vatten och tvingar isens expansion in mot slangarna. I ett fältförsök av Rohner (2001) fylldes två borrhål, 70 och 265 m djupa, med ett material som bestod av 8,5 % bentonit, 17 % cement och 74,5 % vatten. Om den här blandningen är plastisk eller stelnar i borrhålet diskuteras inte i rapporten. För att undersöka hur ett återfyllt system reagerar på frysning kylde den ingående köldbäraren till stegvist ner till -10°C . Denna del av försöket illustreras i fig. 12. Under normala förhållanden förekommer inte såhär låga temperaturer i borrhålet utan endast under grav överbelastning eller som en följd av ett feldimensionerat system. Återfyllningsmaterialet frös i borrhålet då ingående temperatur i slangarna var -6°C och utkommande $-2,5^{\circ}\text{C}$, vilket är den mörkröda och den mörkblåa linjen i diagrammet. Det resulterade i en kraftig ökning av det yttre trycket på kollektorslangen på 2,1 MPa (21 bar), vilket visas av den ljusgröna linjen. Eftersom slangarna före frysning hade ett högre inre tryck än yttre resulterade ökningen i ett yttre övertryck på 1,3 MPa (13 bar). Detta är betydligt mer än vad majoriteten av kollektorslangarna som används idag tål, och även i försöket deformerades slangarna nere i hålet.

I samma rapport testades även hur systemet reagerar på en chockfrysning. Den ingående temperaturen sänktes plötsligt från $+10^{\circ}\text{C}$ till -13°C . Den kalla vätskan cirkulerades i ungefär 5 minuter. Detta får kollektorslangen att dra ihop sig. I försöket ledde detta till att

det inre trycket i slangarna steg till med 400 kPa (4 bar) vilket sannolikt beror på att återfyllningsmaterialet, som ju utövar ett yttre mottryck, inte hinner följa med slangens snabba volymförändring. Detta bekräftar det som tagits upp tidigare i arbetet om att vissa material inte kan behålla kontakten med slangarna.

Spridning av frysning utanför borrhålet

Hur långt en eventuell frysning riskerar att spridas utanför borrhålet beror på flera variabler. Den mängd värmeenergi som hämtas upp ur borrhålet av köldbäraren driver frysningen. Hur snabbt utvinningen sker och under hur lång tid spelar givetvis också roll. En hög belastning under kort tid ökar risken för att frysning ska ske nära borrhålet medan en överbelastning över många år gynnar att isbildningen sprider sig. Den termiska konduktiviteten hos formationen och materialet som omger kollektorslangarna påverkar också. En hög konduktivitet innebär att värmeenergin som utvinns hämtas från ett större område. Temperatursänkningen blir alltså lägre, men påverkan kan märkas längre bort från borrhålet. En låg termisk konduktivitet innebär motsatsen, att samma energi hämtas i närheten av borrhålet och att temperatursänkningen blir större över ett mindre område. Grundvattnets rörelser bidrar också till att sprida temperatursänkningen över ett större område.

Man kan alltså förvänta sig variationer i frysningens utbredning mellan olika återfyllningsmaterial och platser, men även beroende på belastningsmönster och dimensionering av varje specifikt system. Förhållan-

dena har delvis utretts av Berndt och Philippacopoulos (2000) som modellerade effekten på hur värmeöverföringen mellan formationen och köldbäraren förändrades då glapp uppstod mellan slangarna och återfyllningsmaterialet. Att ange ett avstånd för hur långt utanför borrhålet frysningen kan sprida sig är svårt, men sannolikt är det litet. Det har inte funnits tid till någon ytterligare utredning av den här frågan i denna studie.

3.4 Val av metod och material

Den återfyllningsmetod som bör användas i de allra flesta situationer är, som framgår tidigare i texten, tryckinjektering. Andra metoder där återfyllningsmaterial hålls ner från ytan kan enligt Remund och Smith (1997) endast användas i extremt grunda borrhål.

Det material som har gått igenom i den här rapporten är ren cement, ren bentonit och olika tillsatser för att förstärka dessa.

Den rena cementen visade sig vara relativt olämplig att använda som återfyllning. Betydligt bättre material finns att tillgå. Med ren cement får systemet som helhet en hög permeabilitet på grund av att materialet inte kan upprätthålla en tät kontakt med kollektorslangen när den expanderar och drar ihop sig med svängande temperaturer. Små glapp bildas därför där vatten kan sippra igenom. Detta registrerades bland annat av Allan och Philippacopoulos (1998).

Den rena cementen ger ifrån sig relativt höga temperaturer då den stelnar, vilket tillfälligt kan försvaga kollektorernas trycktålighet. Temperaturen får dessutom slangarna att svälla och putta undan den stelnde cementen vilket kan bidra till glapp då temperaturen gått ner. För att undvika skador på kollektorn bör den aldrig upphetas över 60°C i borrhålet (Heiberger et al 1997). Risken att temperaturen skulle nå så högt i ett borrhål är mycket liten och skulle endast kunna inträffa i en formation med låg termisk konduktivitet vid kraftiga inras i borrhålet.

Cementen har dessutom medioker frystålighet om den termiska konduktiviteten samtidigt ska maximeras och materialet riskerar att skadas permanent av nedfrysning. Slutligen har ren cement en relativt dåligt värmeledningsförmåga vilket försämrar energisystemets effektivitet.

Med tillsatser kan cementens egenskaper förändras i hög utsträckning och de materialets problem överkommas. Med tillsats av sand minskar glappbildningen och problemen med värmeavgivning. Fryståligheten och den termiska konduktiviteten ökar. Värmeavgivningen kan också reduceras genom att välja en annan typ av cement. Cementbaserade material används i hög utsträckning som återfyllning.

Ren bentonit kan ge ett tätt borrhål. Leran håller sig plastisk och sluter tätt emot kollektorn. Den är dock mycket känslig för uttorkning som orsakar en kraftig volymförlust och uppsprickning av materialet. Det har dessutom dålig termisk konduktivitet.

Det finns mycket som tyder på att kontakt med ett

salthaltigt grundvatten kan försämra bentonitens tätande egenskaper, men i vilken omfattning är osäkert. Främst på grund av dess dåliga termiska konduktivitet är ren bentonit ett olämpligt material att använda vid återfyllning.

Med tillsatser kan värmeledningsförmågan ökas till acceptabla nivåer. Det sker dock på bekostnad av permeabiliteten. De bentonitbaserade materialen tenderar att ligga strax under gränsvärdet på 10^{-9} m/s, men systemen som helhet är tätare än med de cementbaserade.

Materialen tål sannolikt frysning men hur stora påfrestningar som drabbar kollektorslangen när de fryser har inte utretts.

Remund och Smith (1997) rekommenderar att bentonitbaserade material, eller andra som kan upprätthålla en tät kontakt med kollektorslangen, används i alla fall där det är möjligt. I områden med varierande eller djupt liggande grundvattennivåer är ett termiskt förstärkt cementbaserat material bättre än ett bentonitbaserat. Detsamma gäller i formationer med kraftiga grundvattenflöden eftersom bentoniten riskerar att eroderas bort. Om borrhålet innehåller vatten med hög salthalt måste bentonit, enligt det material som undersökts i den här studien, ses som osäkert. Fältförsök behöver utföras för att pröva hur bentonit i ett borrhål reagerar på saltvatten. Ett säkrare val är där ett cementbaserat material.

I okonsoliderade och permeabla formationer riskerar tunga, lättflytande vätskor att tryckas ut i formationen vid injektering och av sin egen vikt. Här är ett material en slurry med låg densitet eller ett med hög viskositet och som stelnar snabbt lämpligt. Om hela borrhålet är borrarat i samma akvifär och denna är mycket permeabel är det i vissa fall mer praktiskt att fylla hålet med fin sand och täta ytskiktet (VDI 2001).

För att undvika frysning i borrhålet samtidigt som blandningen hålls plastisk rekommenderar VDI (2001) att en blandning med 30 % sand, 10 % bentonit, 10 % cement och vatten eller en med 25 % bentonit, 25 % cement och vatten används som standard. Cementen ska vara så kallad HOZ-cement, vilket innebär cement utblandad med slagg. I den här studien har dock inte blandningens termiska konduktivitet eller känslighet mot uttorkning undersökts. Dessa faktorer diskuteras heller inte i verket som rekommenderar blandningen.

3.4.1 Material på marknaden

Idag finns en stor mängd kommersiella produkter tillgängliga med olika egenskaper och komposition. Vilka ingredienser de innehåller är ofta hemligt och det har därför inte varit möjligt att utreda dem i det här arbetet. I tabell 5 på nästa sida finns samlat ett axplock av de många produkter som tillverkas i USA, Tyskland och Norden och deras egenskaper så som de anges av tillverkarna. Sannolikt innehåller vissa av dessa kommersiella blandningar tillsatser som inte diskuterats i det här arbetet, till exempel grafit eller olika syntetiska substanser.

Ursprung och produkt	Tillverkare	Densitet (kg/)	Termisk konduktivitet (W/mK)	Permeabilitet (m/s)	Övrigt
USA					
Benseal med EZ-mud	Baroid	1140	0,74	$1,2 \cdot 10^{-10}$	Bentonitbas. Plastisk i borrhålet. Tillsats för att fördröja hydratisering.
Benseal med Aquagrout	Baroid	1150	0,68	$1,5 \cdot 10^{-10}$	Bentonitbas. Plastisk i borrhålet.
Mix 111	Öppet recept	2180	2,42	$1,6 \cdot 10^{-12}$	Cementbas. Stelnar i borrhålet. Tillsats av mjukgörare för att öka pumpbarheten.
BH 20 (Black Hills)	GeoPro, Inc.	1034	0,68	$<1 \cdot 10^{-9}$	Bentonit. Plastisk i borrhålet.
TG Select (Thermal Grout)	GeoPro, Inc.	1639	2,04	$<6,9 \cdot 10^{-10}$	Bentonitbas med tillsats av kisel-sand.
High TC geothermal grout	CETCO	1812	2,05	$<8,4 \cdot 10^{-10}$	Bentonitbas. Tillsats av sand.
Tyskland					
Stüwatherm	Stüwa	1700	2,0	-	Lerbas, tillsats av 8,8 % cement.
GeoTherm plus 1.0	GWE	1540	1,0	$<10^{-10}$	Stelnar i borrhålet utan att krympa. Frystålig.
GeoTherm 2.0	GWE	1480	2,0	$5 \cdot 10^{-10}$	Stelnar i borrhålet utan att krympa. Frystålig.
Thermoseal	GWE	Ca 1100	2,5	10^{-11}	Termiskt förstärkta pellets med lerbas. Densitet varierar beroende på packning. Företaget rekommenderar tryckinjektering nerifrån och upp.
ThermoCem light	Heidelberg-Cement	1460	1,0	$1 \cdot 10^{-10}$	Cementbas. Fryståligt.
ThermoCem Plus	Heidelberg-Cement	1460	2,0	$<1 \cdot 10^{-10}$	Innehåller svällande lermineral, ingen kvartssand. Fryståligt. Materialet har låg värmeavgivning
HDG Thermo	HDG Umweltechnik	1790	> 2,0	$<1 \cdot 10^{-9}$	Cementbas. Tillsats av sand och bentonit.
Norden					
Muoviterm	Muovitech	1650	2,0	-	Bas av naturliga lermineral.
DantoGran	Dantonit	-	-	$<10^{-12}$	Kornformig bentonit. Finns flera storlekar. Rekommenderas för försegling av gamla brunnar.
DantoPlug	Dantonit	1100	-	$<10^{-10}$	Pellets av bentonit. Rekommenderas för pluggning av borrhål.

Tabell 5: Ett urval av produkter från USA, Tyskland och Norden med tätande och termiska egenskaper såsom de anges av tillverkarna.

4. Slutsatser

Den här litteraturstudien har syftat till att utreda frågeställningarna som presenterades i introduktionen. Vilka material bör användas för att återfylla borrhål i geoenergisystem, varför och vilka styrkor och svagheter har de olika materialen? Finns det en begränsning på brunnsdjup vid återfyllning? Vilken typ av teknik och utrustning används idag för att fylla borrhål? Hur reagerar bentonit på saltvatten och frysning och hur långt utanför borrhålet sträcker sig eventuell isbildning? Finns det olika egenskaper på olika bentonitprodukter?

Följande slutsatser har kunnat dras utifrån litteraturen som undersökts:

- ◆ Återfyllning med ren cement rekommenderas ej på grund av att materialet:
 - Stelnar fullständigt i borrhålet. Detta bidrar till att återfyllningsmaterialet inte kan upprätthålla en tät kontakt med kollektorslangen då den drar ihop sig när värme hämtas ur borrhålet och temperaturen sjunker. Resultatet blir både sämre tätning och värmeöverföring mellan formation och köldbärare.
 - Krymper när det stelnar.
 - Ger ifrån sig värme när det stelnar vilket i vissa undantagsfall kan ge upphov till problem.
 - Har relativt låg termisk konduktivitet.
 - Har relativt dålig frystålighet om inte ett luftporbildande ämne tillsätts. I så fall minskar materialets termiska konduktivitet kraftigt.
- ◆ Återfyllning med ren bentonit rekommenderas ej på grund av att materialet:
 - Har låg termisk konduktivitet.
 - Är mycket känsligt för uttorkning
- ◆ Med rätt tillsatser i lämpliga proportioner kan de flesta av materialens svagheter överkommas och är då lämpliga att användas vid återfyllning.
- ◆ Vilken typ av, kvaliteten på, och proportionerna mellan ingredienserna är avgörande för återfyllningsmaterialets funktion och blandningarna är mycket känsliga för förändringar i recept. Detta gäller i synnerhet vattenhalt.
- ◆ Cementbaserade material behåller i många fall, även med tillsatser, svagheten att de inte bibehåller en tät kontakt med kollektorslangen i ett kallt borrhål.
- ◆ Bentonit från olika återförsäljare kan variera

betydligt i komposition och egenskaper.

- ◆ Förändringar av egenskaperna hos bentonit till följd av frysning, uttorkning eller kontakt med salthaltigt vatten har visat sig vara helt reversibla och självläkande i laboratorieförsök. Detta kan dock sannolikt inte rakt av appliceras på ett återfyllningsmaterial i ett borrhål. Om materialet till följd av dessa processer omfördelas i borrhålet, till exempel vid separation av fast material och vatten, kommer förändringen antagligen vara bestående.
- ◆ Skador på cementbaserade material från frysning och uttorkning är bestående. Är vattententantalet lågt tål de dock omfattande belastning från dessa krafter utan att skador uppstår.
- ◆ Ett borrhål bör återfyllas med tryckinjektering från botten och upp.
- ◆ Bentonitbaserade eller plastiska material är att föredra om de geologiska och hydrogeologiska förhållandena tillåter eftersom de ger en mer tillförlitlig tätning och en stabil värmeöverföring över hela året. Detta förutsätter att återfyllningen inte skadas av frysning eller saltvatten.
- ◆ Cementbaserade eller stela, icke uttorkningskänsliga material bör användas: då borrhålet helt eller till stor del riskerar att torrläggas; då erosion till följd av kraftiga grundvattenflöden riskeras; samt eventuellt då grundvattnet i hålet har hög salthalt.
- ◆ Att återfylla borrhålet innebär en signifikant ökning av systemets installationskostnad.

Följande har också uppmärksamats:

- ◆ Under vissa förutsättningar kan sannolikt ett fullgott skydd uppnås utan att hela borrhålet behöver återfyllas, vilket innebär en lägre installationskostnad.
- ◆ Risken för separation av bentonitblandningar vid frysning, tining och vid kontakt med saltvatten bör undersökas.
- ◆ Inget slutgiltigt svar kan ges utifrån de texter som studerats i det här arbetet om ett bentonitbaserat återfyllningsmaterial kan användas i områden med salthaltigt grundvatten. Försök bör utföras för att utreda detta.
- ◆ Ytterligare fältförsök bör utföras för att reda ut hur system återfyllda med olika material reagerar på frysning. Hur långt utanför borrhålet frysningsen riskerar att sprida sig behöver också utredas.

5. Tack

Tack till båda mina handledare, Johan Barth och Mikael Calner, för värdefulla råd och mycket uppmuntran. Speciellt till Johan för att jag överhuvudtaget fick chansen att bidra till det här projektet. Mest av allt vill jag tacka min blivande fru, Denise, för sitt stora tålamod med min arbetsiver och det ofantliga stöd hon ger mig. Utan henne hade det här arbetet aldrig blivit skrivet.

6. Referenser

- Abu-Jdayil, B., 2010: Rheology of sodium and calcium bentonite-water dispersions: Effects of electrolytes and aging time. *International journal of mineral processing* 98, S. 208 – 213.
- Ahlström, A-K. 2004. Bergvärmeanläggningar där frysning i borrhål orsakar hopklämda kollektorslangar. Luleå tekniska universitet. 54 s.
- 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., 2000: Materials characterization of superplasticized cement-sand grout. *Cement and concrete research* 30, S. 927 – 942.
- Allan, M. L. och Kavanaugh, S. P., 1999a: Testing of thermally enhanced cement ground heat exchanger grouts. *Ashrae Transactions Symposia*, S. 446 – 450. CH-99-2-2.
- Allan, M.L. och Kavanaugh, S. P., 1999b: Thermal conductivity of cementitious grouts and impact on heat exchanger length design for ground source heat pumps. *HVAC&R Research* 5:2, S. 85-95.
- 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.
- Allan, M. L. och Philippacopoulos, A. J., 1999: *Properties and performance of cementbased grout for geothermal heat pump applications: Final report FY 1999*. Brookhaven national laboratory. 53 s.
- Allan, M. L. och Philippacopoulos, A. J., 2000: Performance characteristics and modelling of cementitious grouts for geothermal heat pumps. *Proceedings world geothermal congress*, s. 3355 – 3360.
- Andersson, O. H., 1981: *Borrning och dokumentation - Borrningsteknik jämte metodik för geologisk dattainsamling under borrhings gång*. Lunds Universitet. Institutionen för kvartärgeologi. Lund. 281 s.
- Andersson, O., 2011: *Seminarium – Geoenergi: Ekonomisk och miljömässig värdering*. Geostrata. Föreläsningsmaterial.
- Barth, J., 2011a: *Geoenergi och Borrteknik: GEOP03, HT 2011*. Föreläsningsmaterial.
- Bayer, P., Blum, P. och Haehnlein, S., 2010: International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and sustainable energy reviews* 14, s. 2611 – 2625.
- Berndt, M. L. och Philippacopoulos, A. J., 2000: Influence of debonding in ground heat exchangers used with geothermal heat pumps. *Geothermics* 30, s. 527 – 544.
- Berndt, M. L. och Philippacopoulos, A. J., 2008: Improving the performance of geothermal heat pumps through borehole grout materials. *Australian geothermal energy conference*.
- Birgersson, M., Karnland, O. och Nilsson, U., 2010: *Freezing of bentonite: Experimental studies and theoretical considerations*. SKB TR-10-40. Svensk kärnbränslehantering AB. 50 s.
- Emborg, M., Jonasson, J-E. och Knutsson, S. 2007. *Långtidsstabilitet till följd av frysning och tining av betong och bentonit vid förvaring av låg- och medelaktivt kärnavfall i SFR 1*. SKB R-07-60. Svensk kärnbränslehantering AB. 36 s.
- Fetter, C. W., 2001: *Applied hydrogeology (fourth edition)*. Merrill Publishing Company. New Jersey. 598 s.
- Geotec, SP och svenska kollektorrrörstillverkare., 2005: *Tillverkningsnorm för bergvärmekollektorer*. 8 s.
- González, A., Moreno, N. och Navia, R., 2009: Fly ashes from coal and petroleum coke combustion: current and innovative potential applications. *Waste Management & Research* 2009: 27, s. 976 – 987.
- Hellström, G., 2002: Borehole heat exchangers state-of-the-art. *Energy conservation through energy storage. Annex 13*. International Energy Agency. 76 s.
- Heiberger, J. A., Paul, N. D., Remund, C. P. och Streich, G. A., 1997: *Thermal, physical, hydraulic and heat of hydration properties of cement-based grouts*. EPRI TR-109165. Electric Power Research Institute. 148 s.
- Holloway, W. A., Perry, R. L. och Smith, M. D., 1999: *Field evaluation of cementitious grout: Completions in collaboration with Brookhaven National Laboratory (BNL) and developing a database for long-term grout performance for three grout types*. Oklahoma State University. Stillwater. 9 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., 1997b: *Cement/Bentonite interaction – Results from 16 month long laboratory tests*. SKB TR-97-32. Svensk kärnbränslehantering AB. 38 s.
- Karnland, O., Nilsson, U., Olsson, S. och Sellin, P., 2005: Experimentally determined swelling pressures and geochemical interactions of compacted Wyoming bentonite with highly alkaline solutions. *Physics and chemistry of the earth* 32, s. 275 – 286.
- Karnland, O., Nilsson, U. och Olsson, S., 2006: *Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials*. SKB TR-06-30. Svensk kärnbränslehantering AB. 117 s.

- Kelessidis, V. C., 2008: Investigations on the thixotropy of bentonite suspensions. *Energy sources, Part A*, 30. s. 1729–1746.
- Lund, J. T. och Remund, C. P., 1996: Thermal enhancement of bentonite grouts for vertical GSHP systems. *Geoscience P. 002*, s. 95-106.
- Nesse, W. D., 2000: *Introduction to mineralogy*. Oxford University Press. New York. 442 s.
- Paul, N. D. och Remund, C. P., 1997: *Physical, thermal, and hydraulic properties of bentonite-based grouts*. EPRI TR-109160. Electric power research institute. 71 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. 71 s.
- Rohner, E., Rybach, L. och Salton, M., 2001: *Lebensdauer von erdwärmesonden in bezug auf druckverhältnisse und hinterfüllung*. Institut für Geophysik ETHZ, Zürich. 28 s.
- Risberg, G., 2011: Samtal. Sveriges Geologiska Undersökning. Avdelningschef för mark och grundvatten.
- Spitler, J. D., 2005: Ground-source heat pump system research – past, present, and future. *HVAC&R Research 11:2*, s. 165 – 167.
- SGU, Socialstyrelsen, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Geotec, Avanti och Svep, 2008: *Normbrunn -07: Normförfarande vid utförande av vatten- och energibrunnar*. Sveriges geologiska undersökning. 36 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.
- Tucker, M. E., 2001: *Sedimentary petrology: An introduction to the origin of sedimentary rocks (third edition)*. Blackwell Publishing, Oxford. 262 s.

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

250. Riebe, My, 2009: Spinel group minerals in carbonaceous and ordinary chondrites. (15 hskp)
251. Nilsson, Filip, 2009: Föreningsspridning och geologi vid Filborna i Helsingborg. (30 hskp)
252. Peetz, Romina, 2009: A geochemical characterization of the lower part of the Miocene shield-building lavas on Gran Canaria. (45 hskp)
253. Åkesson, Maria, 2010: Mass movements as contamination carriers in surface water systems – Swedish experiences and risks.
254. Löfroth, Elin, 2010: A Greenland ice core perspective on the dating of the Late Bronze Age Santorini eruption. (45 hskp)
255. Ellingsgaard, Óluva, 2009: Formation Evaluation of Interlava Volcaniclastic Rocks from the Faroe Islands and the Faroe-Shetland Basin. (45 hskp)
256. Arvidsson, Kristina, 2010: Geophysical and hydrogeological survey in a part of the Nhandugue River valley, Gorongosa National Park, Mozambique. (45 hskp)
257. Gren, Johan, 2010: Osteo-histology of Mesozoic marine tetrapods – implications for longevity, growth strategies and growth rates. (15 hskp)
258. Syversen, Fredrikke, 2010: Late Jurassic deposits in the Troll field. (15 hskp)
259. Andersson, Pontus, 2010: Hydrogeological investigation for the PEGASUS project, southern Skåne, Sweden. (30 hskp)
260. Noor, Amir, 2010: Upper Ordovician through lowermost Silurian stratigraphy and facies of the Borensult-1 core, Östergötland, Sweden. (45 hskp)
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 Svecnorwegian eclogite-bearing deformation zone in Halland: characteristics and regional context. (15 hp)
270. McGimpsey, Ian, 2010: Petrology and lithochemistry 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, south-western 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-Kundan (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 datering av basiska gångar längs Romeleåsen i Skåne och deras påverkan av plastisk deformation i Protoginizonen (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)



LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen
Lunds universitet
Sölvegatan 12, 223 62 Lund