

Injektering av flygaska i hushållsavfallsdeponi

Karin Wikman, Magnus Berg, Lale Andreas, Anders Lagerkvist, Sara Jannes,
Gustav Tham & Rolf Sjöblom

Injektering av flygaska i hushållsavfallsdeponi

Grouting of fly ash in sanitary landfills

Karin Wikman & Magnus Berg
ÅF-Energi & Miljö AB

Lale Andreas & Anders Lagerkvist
Luleå tekniska universitet

Sara Jannes & Gustav Tham
Telge Återvinning AB

Rolf Sjöblom
Tekedo AB

Q4-106

Injektering av sulfathaltig flygaska i hushållsavfallsdeponi

VÄRMEFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM · Tel 08-677 25 80
Oktober 2003
ISSN 0282-3772

Förord

”Injektering av flygaska i hushållsavfallsdeponi” är ett projekt som har genomförts i samarbete mellan ÅF-Energi & Miljö AB, Luleå tekniska universitet och Telge Återvinning AB. Injekteringsförsök i pilotskala har utförts på Tveta Återvinningsanläggning i Södertälje medan experimentella försök i laboratorieskala har utförts på Luleå tekniska universitet.

Projektet har samfinansierats av Ångpanneföreningens Forskningsstiftelse (ÅFORSK), Värmeforsks delprogram ”Miljöriktig användning av askor” samt Svenska Renhållningsverksföreningen (RVF). Inom studien har dessutom Telge Återvinning AB bidragit med egna resurser till de pilotförsök som har genomförts.

Referensgruppen för projektet har bestått av Henrik Bristav, Umeå Energi AB och Stig-Olov Taberman, Tekniska Verken i Linköping AB som har följt projektet och kommit med goda synpunkter under arbetets gång.

Stockholm, april 2003

Karin Wikman

Magnus Berg

ÅF-Energi & Miljö AB

Abstract

Totalt har cirka 100 ton askslurry injekterats vid pilotförsök på Tveta Återvinningsanläggning, vilket uppskattningsvis motsvarar en utfyllnad av cirka 12-16 % av de tillgängliga hålrummen inom injekteringsområdet på deponin. Slutsatsen när det gäller injekteringen är att aska blandar sig väl med vatten till en pumpbar slurry som kan injekteras utan risk för härdning i injekteringsutrustningen. Varken avfallet eller det injekterade materialet gav under pilotförsöken något mottryck och inget tyder på att avfallet i deponin trycks undan av den injekterade askan utan istället rinner askslurryn genom håligheter i avfallet. I deponin stelnar askan, inom uppskattningsvis några dagar, till hårda men något spröda klumpar som kan bidra till en ökad stabilitet i deponin.

Den ekonomiska bedömningen är att kostnaden för injektering med en utrustning med en kapacitet på 10 ton/h i perforerade rör i en hushållsavfallsdeponi blir cirka 800 SEK/ton torr aska. Emellertid kan kostnaden troligtvis komma ner i nivå med dagens skatt för deponering, d.v.s. 370 SEK/ton, genom att borring och injektering sker i ett steg samt genom införandet av två skift.

Sammanfattning

I projektet har potentialen för stabilisering av hushållsavfallsdeponier genom injektering av flygaska studerats. Tekniken bedöms kunna motverka problemet med att deponins topptätskikt förstörs genom differentiella sättningar. Dessutom kan flygaska i en deponi troligtvis bidra positivt till den kemiska utvecklingen så att fastläggning sker av metaller.

För bedömningen av injekteringsteknikens lämplighet i en hushållsavfallsdeponi har främst pilotförsök på Tveta Återvinningsanläggning utförts med injektering av flygaska från förbränning av biobränslen. För att genomföra och tolka dessa pilotförsök har även en litteraturstudie och laboratieförsök gjorts.

Totalt injekterades cirka 100 ton askslurry i pilotförsöken vilket uppskattningsvis motsvarar en utfyllnad av cirka 12-16 % av de tillgängliga hålrummen inom injekteringsområdet på deponin. Slutsatsen när det gäller injekteringen är att aska blandar sig väl med vatten till en pumpbar slurry som kan injekteras utan risk för hårdning i injekteringsutrustningen. Varken avfallet eller det injekterade materialet gav under pilotförsöken något mottryck och inget tyder på att avfallet i deponin trycks undan av den injekterade askan utan istället rinner askslurryn genom håligheter i avfallet. Askkan kan därmed sprida sig ganska långt från injekteringshålen.

Vid användande av kraftigare utrustning kan mottryck och rörelser i upplagt avfall uppstå, men på grund av föreliggande resultat kan det inte bedömas vid vilka flöden mottryck uppstår. Stora variationer är dessutom möjliga och som generell försiktighetsprincip bör maximala tryck begränsas i relation till förväntad stabilitet i aktuellt område.

I deponin stelnar askan, inom uppskattningsvis några dagar, till hårda men något spröda klumpar som kan bidra till en ökad stabilitet i deponin. För att klargöra huruvida stabiliteten påverkas och vilka mängder aska som är nödvändigt för detta krävs ytterligare studier där en större andel aska i förhållande till injekteringsområdet injekteras. För att få märkbara effekter av askinjektering i en deponi krävs troligtvis injektering av åtminstone något eller några tusen ton askslurry.

Den ekonomiska bedömningen i denna studie visar på att det är lönsamt att välja en relativt stor injekteringsutrustning för ett inte alltför litet projekt. Uppskattningsvis blir kostnaden för injektering med en utrustning med en kapacitet på 10 ton/h cirka 800 SEK/ton torr aska (inkl. intryckning av perforerade rör samt bemanning för ett skift). Om borrhål och injektering sker i ett steg samt om två skift införs kan emellertid denna kostnad troligtvis halveras och därmed komma ner i nivå med dagens deponeringsskatt, d.v.s. 370 SEK/ton.

En fördel med en stor utrustning är även att driften underlättas genom att kapaciteten kan vara kontinuerlig istället för satsvis. Vid injektering i en avfallsdeponi rekommenderas en utrustning med en kapacitet på 100-200 liter per minut och en

blandare på minst 500 kg. Pumpen bör ha ett maximalt tryck på omkring 20-30 bar för att kunna öppna upp eventuella sprickor i avfallet vid injekteringsstarten.

Summary

The purpose of the study was to investigate the potential for stabilization of sanitary landfills by injecting fly ash. The method is supposed to prevent differential settlements in landfills and by that to counteract damages in the final cover. Injecting fly ash may also affect the chemical development in a positive way and prevent metal leaching.

Pilot experiments at the Tveta waste recycling center (Tveta Återvinningsanläggning) have been performed in order to estimate if the grouting technology is a suitable method for sanitary landfills. Fly ashes from the combustion of bio fuels were used in these tests. A literature study and laboratory experiments in order to prepare the field experiments were also part of the project.

About 100 tons of ash slurry were injected during the pilot experiments. This corresponds to a filling degree of approximately 12-16 % of the available pores in the landfill body. As a result of the pilot test, the following conclusions can be drawn: Ash can be mixed with water to a pumpable slurry which can be injected without hardening inside the equipment. Neither the waste nor the grouting material caused a backpressure during the injection and nothing indicates that the injected ash deforms the landfilled waste. The ash-water-slurry flows through the voids in the waste easily. Thus, the ash may disperse quite far from the injection holes.

Using a more powerful equipment backpressure and movements in the waste might occur. It was not possible to estimate the flow required for backpressure in this study. Large variations are possible but for safety reasons the maximal pressure should be limited with regard to the expected stability in the actual area.

The grouted ash will harden within the landfill body within a couple of days. It accumulates in hard but brittle lumps, which may result in an increased stability of the landfill. Further studies are necessary in order to evaluate how the stability is affected and what amounts of ash are required. Grouting of about a thousand tons of ash in a landfill is probably needed to achieve noticeable effects.

The economic evaluation in this study shows that it is profitable/beneficial to use relatively large grouting equipments for grouting in landfills. The cost will be approximately 800 SEK/tons of dry ash if the equipment has a capacity of 10 tons per hour (including drilling and operating crew). However, this cost could probably be reduced to the same level as today's landfill tax in Sweden (370 SEK/ton) if the drilling and grouting is performed in one step and the work is done in two shifts.

Another advantage with large equipment is that the grouting could be performed continuously in a process where drilling of the grouting holes and grouting is done at the same time. Equipment with a capacity of 100-200 liters per minute and a mixing tank for at least 500 kg material is recommended for grouting in landfill areas. The pump should have a maximal pressure of 20-30 bar to open up fractures in the waste during the start of the grouting work.

Innehållsförteckning

1	BAKGRUND	1
2	MÅL OCH FORSKNINGSFRÅGOR	2
2.1	PROJEKTETS UTFORMNING.....	2
3	RESULTAT	3
3.1	GENOMFÖRANDE AV PILOTFÖRSÖK PÅ TVETA ÅTERVINNINGSANLÄGGNING	3
3.2	PROVTAGNING OCH DOKUMENTATION I SAMBAND MED PILOTFÖRSÖKEN	5
3.3	UTVÄRDERING AV PILOTFÖRSÖKEN	9
4	DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	14
5	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	17
6	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSARBETE	18
7	LITTERATURREFERENSER.....	19

Bilagor

A	LITTERATURSTUDIE – TIDIGARE ERFARENHETER AV INJEKTERING
B	UTRUSTNING FÖR INJEKTERING
C	EKONOMISK BEDÖMNING
D	LÄMPLIGA ASKOR – TILLGÄNGLIGHET, URSPRUNG OCH KEMISKA ANALYSER
E	BESKRIVNING AV TVETA ÅTERVINNINGSANLÄGGNING
F	LABORATORIEFÖRSÖK
G	INJEKTERING I PILOTSKALA
H	UTVÄRDERING AV PILOTFÖRSÖKEN

1 Bakgrund

Ett problem vid sluttäckning av avfallsupplag är att topptätskikten riskerar att förstöras med tiden genom differentiella sättningar. En möjlig lösning för att undvika sättningar kan vara att öka den mekaniska stabiliteten genom utfyllnad av upplagets större porer. Om avfallsupplaget fylls ut med material som påverkar den kemiska utvecklingen i deponin på ett positivt sätt kan även fastläggning ske av metaller.

Stora insatser görs idag för att täta över (och i framtiden även under) deponier för att reducera utsläppen av miljöpåverkande ämnen till acceptabla nivåer. Ett komplement till tätande skikt kring avfallet kan därmed vara att fylla ut hålrum i deponin med ett lämpligt material. Av de olika askfraktionerna som kan erhållas från förbränningsanläggningar för träbaserade bränslen finns vissa som har en särskilt god potential för att bilda en kemisk miljö som håller kvar tungmetaller. Detta gäller främst vissa flygaskor som har en hög halt av sulfater. Orsaken är att sulfater kan reduceras till elementärt svavel i avfallsupplag och detta svavel i sin tur binder de flesta tungmetaller. Sulfat har även en redoxbuffrande effekt som kan vara av intresse för deponier där deponigas bildas i en takt som gör den svår att samla in – redoxbuffringen kan då styra nedbrytningen bort från metanbildning.

Injektering av ”grout”, det vill säga ohärdat cementbruk, i jord och berg har tillämpats i stor skala i över 30 år för att förbättra de geologiska egenskaperna och för att underlätta fyllningen av håligheter inför strukturella processer. Flygaska bedöms kunna vara ett alternativt injekteringsmaterial som har en antal tekniska, reologiska (flödes), hållbarhets och ekonomiska fördelar jämfört med vanlig sand och cement. Flygaska som matas ut torr bildar tillsammans med vatten en pumpbar ”grout” som ofta stelnar inom loppet av några timmar till några dygn till följd av hydratiseringsreaktioner. En sådan slurry bedöms kunna injekteras i en deponi bestående av gammalt ”okonsoliderat” kommunalt avfall. När den hydratiserade askan ligger på plats i deponin förväntas den reagera med den koldioxid som genereras i samband med den fortsatta nedbrytningen av hushållsavfallet. Denna karbonatisering bedöms leda till en fortsatt stabilisering av deponin.

Det bör påpekas att det för närvarande ligger stora volymer hushållsavfall på deponi i avvaktan på sluttäckning varför olika möjligheter att minimera transporten av främst tungmetaller från dessa deponier är av stort intresse. Samtidigt sker en omorientering av avfallshanteringen på det sättet att organiskt avfall i framtiden i större utsträckning än tidigare kommer att förbrännas. Detta innebär en ökad generering av olika typer av askor och det är därför även av stort intresse att söka finna användningsområden för dessa askor. Höjd skatt och ökande kostnader för deponering har dessutom bidragit till ett ökat intresset för att använda askor i olika tillämpningar.

2 Mål och forskningsfrågor

Målet med detta projekt är att undersöka potentialen för att genom injektering av flygaska i hushållsavfall på deponier stabilisera deponin. För en bedömning av teknikens lämplighet krävs svar på följande frågor:

- Går askmaterialet att injektera?
 - Blandar sig flygaska och vatten till en pumpbar slurry?
 - Viskositet/pumpbarhet för injekteringsmaterialet?
 - Finns risk för snabb härdning i utrustningen?
 - Blir det mottryck från avfallet i deponin vid injekteringen?
 - Ökar motståndet då stora volymer har injekterats?
 - Tränger askan undan/lyfter befintligt material?
 - Finns lämpliga utrustningar och metoder för att göra denna typ av injekteringsarbete?
- Hur beter sig askan/deponin efter injekteringen?
 - Hur långt sprider sig askan?
 - Härdar injekteringsmaterialet i deponin?
 - Bidrar askan till ökad mekanisk stabilitet i deponin?
 - Påverkas kemin och gasproduktionen i deponin?
 - Fylls porerna i deponin fullständigt eller endast de grövre porerna?

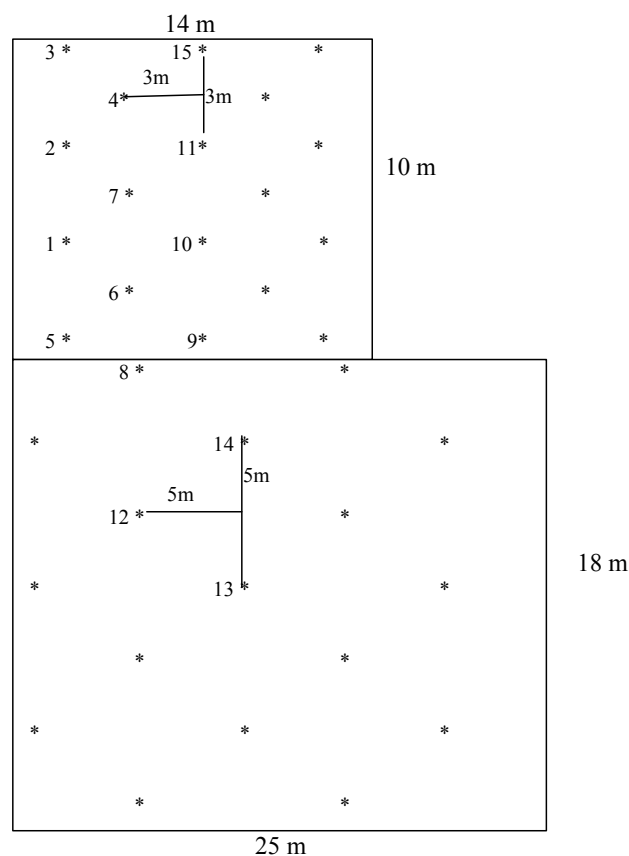
2.1 Projektets utformning

För att besvara forskningsfrågorna ovan har främst pilotförsök på Tveta Återvinningsanläggning utförts med en flygaska från förbränning av biobränslen. För att kunna genomföra och tolka dessa pilotförsök har även en mindre litteraturstudie och kompletterade laboratieförsök gjorts.

3 Resultat

3.1 Genomförande av pilotförsök på Tveta Återvinningsanläggning

Planeringen var till att börja med att borra 35 hål på en definierad yta på Tveta Återvinningsanläggnings deponiområde med hushållsavfall och i dem injektera något/några hundratal ton material i form av en blandning av aska och vatten. Dessutom planerades injektering i tre stycken tätade testceller med definierat innehåll och en storlek på vardera 288 m³, vilka konstruerades i samband med tidigare studier på deponin 1995. Det skulle senare visa sig att det ej var rimligt tidsmässigt, p.g.a. väderlek och problem med utrustningen, att injektera mer än 15 hål på deponiområdet (se Figur 1) samt enbart en av testcellerna fullständigt. Avståndet mellan hålen på deponiområdet valdes till cirka 3 meter för ett injekteringsområde och cirka 5 meter för ett annat injekteringsområde.



Figur 1. Injekteringsyta på Tveta Återvinningsanläggning med de 15 hålen numrerade där injektering utfördes. På den tät injekterade ytan är det 3 meter mellan hålen och på den gles injekterade ytan är det 5 meter mellan hålen.

Figure 1. The grouting area with 15 holes for grouting marked out. At the densely grouted area is it 3 meters between the holes and at the sparsely grouted area is it 5 meters between the holes.

Hypotesen innan pilotförsöken var att askan borde sprida sig i hålrummen i avfallsdeponin ett par meter från injekteringshålen. Därmed uppskattades att hela injekteringsområdet skulle stabiliseras.

Vid pilotförsöken utfördes borrningen av injekteringshålen och injekteringen av askan separerade från varandra. Injekteringshålen ”förborrades” först till 9 meters djup genom intryckning av perforerade foderrör i stål (Ø 32 mm) i vertikal riktningen ner i deponin. De små hålen på rören, för spridning av injekteringsmaterialet, hade en diameter på 10-20 mm. När rören var på plats pumpades en askslurry ner i injekteringshålen vid olika djup från 3 till 9 meter. I testcellen skedde injektering ner till cellens botten vid 6 meters djup. Utrustningen för injekteringsarbetet beskrivs närmare i bilaga B, se även Figur 2.



Figur 2. Vattentank, injekteringsutrustning (blandningstank, pump och injekteringsslang) samt färsk flygaska för injektering. Injekteringsutrustningen är den mindre utrustningen vilken provades under de två första injekteringsdagarna.

Figure 2. Water tank, equipment for grouting (mixing tank, pump and grouting tube) and fresh fly ash. The grouting equipment is the smaller one used during the first two grouting days.

Den aska som användes för injekteringen var främst färsk flygaska från förbränning av biobränslen i Igestaverket i Södertälje. Den härstammar från en gemensam silo till vilken både el- och slangfilteraska samt svavelreningsprodukter från tre olika pannor matas. En liten mängd åldrad bottenaska testades även. För detaljer kring askans ursprung, kemiska analyser samt tillgängliga kvantiteter i Sverige hänvisas till bilaga D. Askan siktades till 9 mm innan den blandades med vatten satsvis i en blandningstank och pumpades ner i deponin genom de förborrade hålen. Under arbetets början testades olika andelar aska och vatten med utgångspunkt från laborieförsöken i bilaga F samt

härdnings- och flytegenskapsförsök i samband med injekteringen (bilaga G.3). Även blandningstiden varierades. Injekteringsblandningen fastställdes under andra injekteringsdagen till 40 liter vatten och 105 liter flygaska med en blandningstid på 3-4 minuter. Denna blandning, som motsvarar cirka 125 kg askslurry, var sedan konstant för resten av injekteringsarbetet. I bilaga G beskrivs genomförandet av pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning mer i detalj.

Avfallet i det injekterade deponiområdet på Tveta Återvinningsanläggning bestod mest av maximalt 2 år gammalt kompakterat hushålls- och industriavfall med en styckestorlek generellt under 0,5 meter. Testcellen, som konstruerades för 7 år sedan, bestod endast av organiskt avfall (matavfall). En närmare beskrivning av deponin ges i bilaga E.

3.2 Provtagning och dokumentation i samband med pilotförsöken

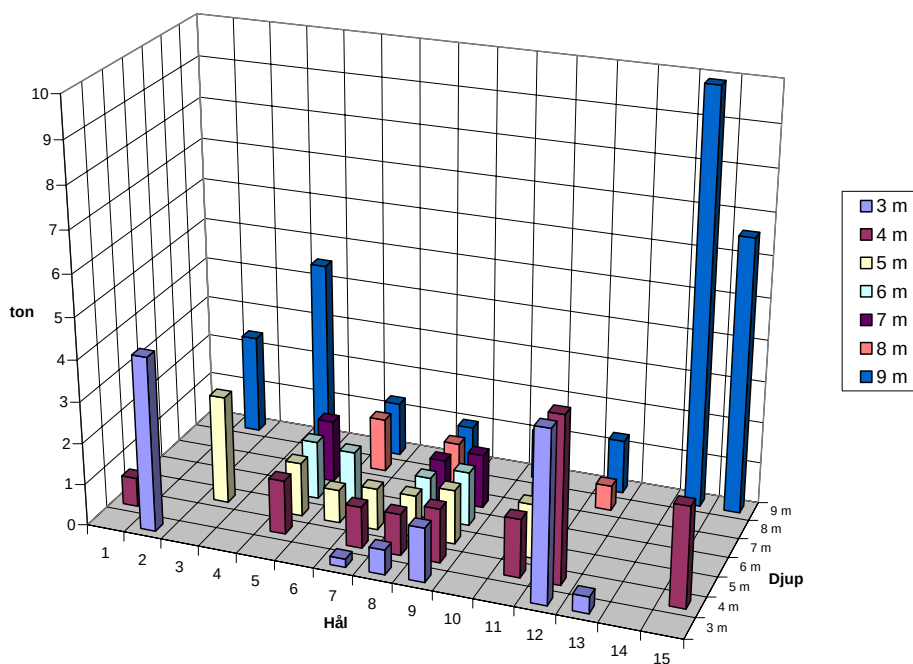
3.2.1 Dokumentation

Inget tryck krävdes för att få ner injekteringsmaterialet i deponin utan askslurryn rann lätt ned under större delen av injekteringsarbetet. Normalt uppkom inget mottryck vare sig på grund av avfallet i deponin eller det injekterade askmaterialet. Vid några tillfällen uppkom dock mottryck, upp till 10 bar under kortare perioder, vilket antagligen främst berodde på igensättningar i utrustningen.

En hel del problem uppkom under arbetets gång vilket gjorde att injektering i alla hål som planerats inte kunde fullföljas eftersom detta skulle ta orimligt lång tid. Problemen var främst en följd av att utrustningen var underdimensionerad och att arbetet utfördes under november månad så att vattnet i slangar m.m. vid ett flertal tillfällen frös p.g.a. kylan. Igensättningar förekom dessutom i injekteringsslangen (Ø 10 mm) och skador uppkom vid ett par tillfällen på blandningstanken och pumpen p.g.a. klumpar, metallbitar mm. i askan. Den åldrade bottenaskan som provades i två hål orsakade särskilt mycket problem genom igensättningar p.g.a. stenliknande klumpar i askan.

Det var även problem att få ner injekteringsslangen till 9 meters djup i alla hål eftersom igensättningar förekom i de perforerade forderrören. Det var därför inte möjligt att injektera alla hål vid 9 meters djup. Det största djupet för injekteringen varierade därför från hål till hål mellan 4-9 meter.

Totalt injekterades 75 ton askslurry i deponin (cirka 63 m³ aska blandat med cirka 24 m³ vatten). De injekterade mängderna askslurry och injekteringsdjupen i de injekterade hålen 1-15 framgår av Figur 3 samt Tabell 19 i bilaga G.4. Dessutom injekterades 24 ton askslurry i testcellen med organiskt avfall och närmare 4 ton askslurry i en testcell med restavfall. Den sammanlagda mängden askslurry som injekterades under pilotförsöken var därmed omkring 103 ton (blandat utgående från 70 ton aska (86 m³) med en TS-halt på 72 %). Injekteringsarbetet pågick i 4 veckor. När arbetet gick som bäst kunde cirka 10 ton askslurry injekteras under en dag.

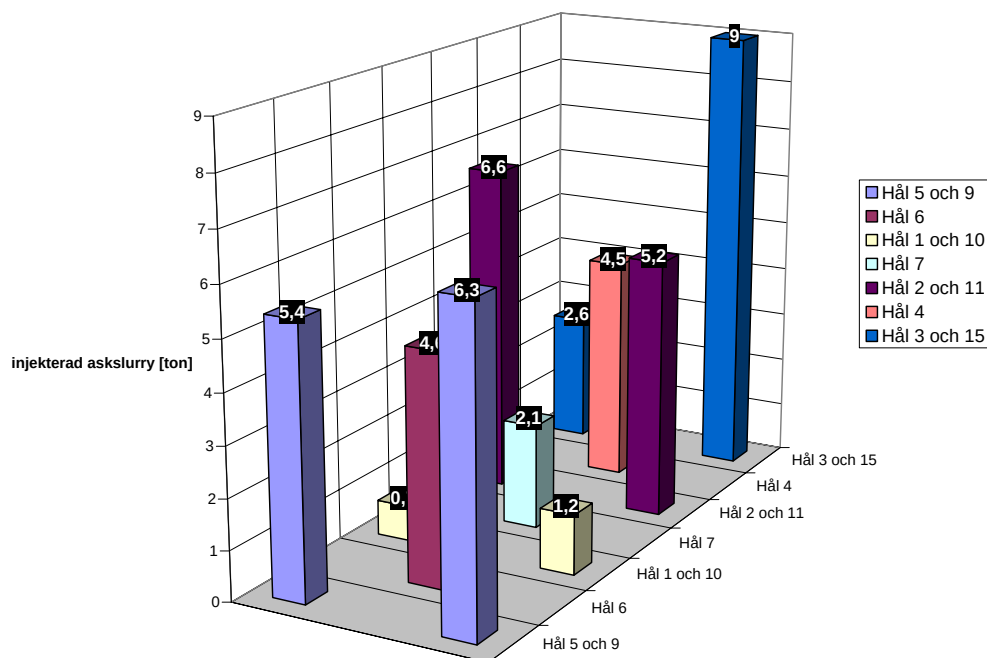


Figur 3. Injekterade askslurrymängder vid olika djup i de 15 hålen på deponin.

Figure 3. Grouted amounts of ash slurry at different depths in the 15 holes at the landfill.

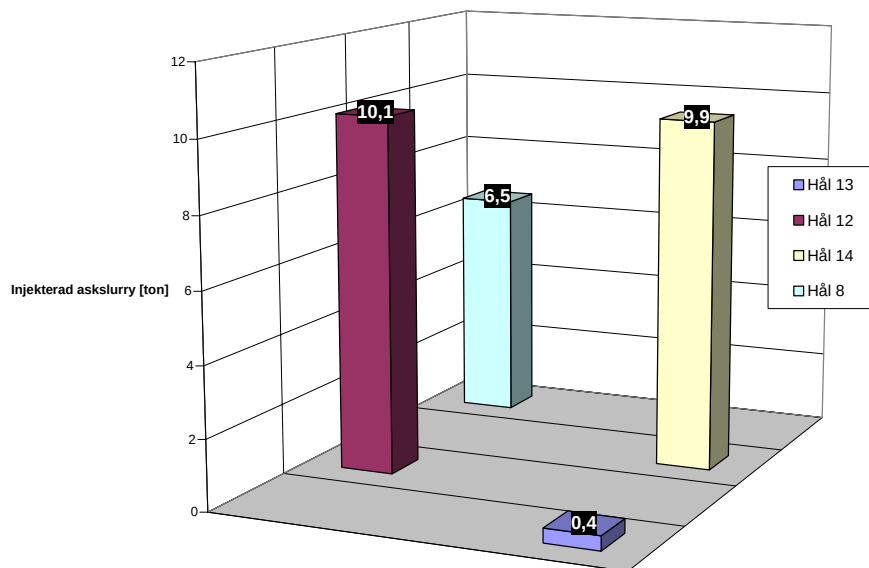
Som framgår av Figur 3 injekterades de flesta hålen vid ett flertal olika djup från 3 till 9 meter med något till några ton askslurry vid varje djup. De största askmängderna per hål (omkring 10 ton askslurry) injekterades i hål 14 och 15 vid 9 meters djup samt i hål 12 vid 3-4 meters djup.

Mängderna askslurry som injekterades illustreras även i Figur 4 för den tätt injekterade ytan (3 meter mellan hålen) samt i Figur 5 för den glest injekterade ytan (5 meter mellan hålen). I figurerna är hålen placerade på motsvarande sätt som i verkligheten på deponin enligt i skissen i Figur 1.



Figur 4. Injekterade mängder ashslurry på den tätt injekterade ytan (3 meter mellan hålen). Placeringen av hålen i figuren stämmer överens med placeringen på deponin.

Figure 4. Grouted amounts of ash slurry at the densely grouted area (3 meters between the holes). The placing of the holes in the figure corresponds the placing at the landfill.



Figur 5. Injekterade mängder askslurry på den glest injekterade ytan (5 meter mellan hålen). Placeringen av hålen i figuren stämmer överens med placeringen på deponin.

Figure 5. Grouted amounts of ash slurry at the sparsely grouted area (5 meters between the holes). The placing of the holes in the figure corresponds the placing at the landfill.

Med antagandet att askan inte sprider sig mer än 2,5 meter utanför de ytterst injekterade hålen utgör det injekterade området totalt en yta på cirka 243 m² (12,5*11m + 10*10,5m), se Figur 44 i bilaga G.4. Med ett djup på 9 meter blir deponins volym i injekteringsområdet cirka 2185 m³. Den injekterade volymen askslurry var inom detta deponiområde omkring 54 m³ (75 ton med en densitet omkring 1,4 ton/m³), vilket betyder att askslurryn endast motsvarar cirka 2,5 % av den totala volymen av injekteringsområdet. Troligtvis är området som askan kan sprida sig till ännu större än 2,5 meter utanför de ytterst injekterade hålen samt 9 meters djup, vilket gör att den injekterade askan utgör en något mindre del av injekteringsområdet.

Porvolymen i avfallsupplaget uppskattas till 30-40 % och av dessa porer är ungefär hälften så stora att de bedöms kunna fyllas med askslurry vid injekteringen. Detta betyder att av en total deponivolym på 2185 m³ bör cirka 330-440 m³ utgöra tillgängliga hålrum för det injekterade materialet. Den injekterade mängden askslurry på 54 m³ bör därmed ha fyllt ut 12-16 % av avfallsdeponin tillgängliga porer.

3.2.2 Viskositet, densitet och TS-halt

Under injekteringsarbetet togs kontinuerligt prover för analys av viskositeten, densiteten och TS-halten. Resultaten från analyserna redovisas i Tabell 20 i bilaga G.4.

TS-halten för de flesta proverna med askslurry låg mellan 40 och 50 %, d.v.s. vattenhalten var 50-60 %. Enligt tidigare erfarenheter från injektering [1] bildar blandningar med flygaska (från kolförbränning) och vatten en slurry vid en vattenhalt på omkring 35 procent, men viskositeten är då för hög för att blandningen ska kunna pumpas. Vid en vattenhalt på 50 procent flyter dock flygaska/vattenblandningar vanligtvis lätt [1]. Förhållandet mellan andelen aska och vatten som använts i blandningarna för injekteringsarbetet i detta projekt stämmer därmed väl överens med tidigare studier. I askorna som studerats i laboratorieförsöken i bilaga F.5 rekommenderas dock en något lägre vatten halt, cirka 32-42 % för att erhålla en lämplig viskositet.

Viskositeten varierade något mellan de olika injekteringsblandningarna från 0,01 till 0,49 s·Pa. Tidigare erfarenhet och forskning [2] har visat att för att erhålla önskvärda reologiska och mekaniska egenskaper är det lämpligt att viskositeten för injekteringsmaterial ligger på omkring 0,02-0,07 s·Pa. När det gäller pumpbarheten går det dock enligt uppgifter i litteraturen bra att med vanlig utrustning pumpa vätskor med en viskositet på upp till cirka 0,8-1,0 s·Pa [3]. För att kontrollera pumpbarheten under injekteringsarbetet gjordes kontinuerligt mätningar av flytegenskaperna för olika blandningar på plats med så kallade trattförsök (se beskrivning i bilaga G.3).

Resultaten från densitetsmätningarna visade att densiteten för aska-vattenblandningarna var relativt konstanta och låg inom intervallet 1300-1500 kg/m³. Densiteten för flygaskan (TS-halt 72 %) som användes för beredning av slurryn var drygt 800 kg/m³.

3.2.3 Härdningstid

För att se till att injekteringsmaterialet inte härdade så snabbt att det skulle sätta sig fast i injekteringspumpen testades härdningstiden av olika injekteringsblandningar genom sk ”skedförsök” (se beskrivning i bilaga G.3)

I samtliga ”skedförsök” konstaterades att injekteringsmaterialet inte hinner stelna innan inpumpningen. Efter cirka 1-2 dygn hade emellertid proverna börjat stelna och det gick trögt att röra om (träpinnen kunde stå upp mitt i bägaren). Efter ytterligare något dygn var proverna helt torkade och hårda. De flesta prover innehöll från början en vattenhalt på 40-50 % (enligt analyserna i avsnitt 3.2.2) och hade tillretts genom att blanda 105 liter fuktig aska (TS-halt 72 %) och 40 liter vatten.

3.3 Utvärdering av pilotförsöken

För att besvara frågorna kring hur askan/deponin beter sig efter injekteringen utvärderades pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning genom gasmätningar före och efter injekteringen samt sättningsmätningar följt av utgrävningar efter injekteringen. De tre olika utvärderingsmetoderna beskrivs närmare nedan samt i bilaga H.

3.3.1 Utgrävningar

Cirka 2,5 månader efter att injekteringsarbetet avslutats samt efter att gas- och sättningsmätningar genomförts (se kommande avsnitt) grävdes delar av det injekterade området på deponin ut med hjälp av en grävmaskin. I bilaga H.3 ges en detaljerad beskrivning av utgrävningsarbetet.

Hypotesen innan injekteringsförsöken om att askan skulle fördela sig i större delen av injekteringsområdet genom att sprida sig i hålrummen i deponin ett par meter från injekteringshålen visade sig inte stämma med verkligheten. Under utgrävningsarbetet påträffades endast en mindre mängd aska och det var inte självklart från vilket hål askan hade kommit. Det kunde inte konstateras i vilken utsträckning askan hade spridit sig i deponin utan fördelningen verkade slumpmässig. Askmaterialet påträffades som hårda klumpar (från grusstorlek upp till ett par decimeter i diameter) som var något spröda (se Figur 6). Askklumparna som fanns ner till 6 meters djup gick att bryta sönder medan materialet var hårdare och mindre sprött vid 9 meters djup.



Figur 6. Klumpar av stelnad aska vid 4,5 meters djup framför hål 4. Askan härstammade dock troligtvis inte från hål 4 eftersom detta hål endast injekterats vid 9 meters djup.

Figure 6. Lumps of hard ash at a depth of 4,5 meters in front of hole 4. However, probably the ash did not come from hole 4 since that hole only was grouted at a depth of 9 meters.

Totalt injekterades cirka 75 ton askslurry i injekteringsområdet på deponin varav 30 ton i de sex hål som låg närmast utgrävningsområdet. I hål 3, 4 och 15, runt vilka utgrävningen skedde, injekterades cirka 16 ton askslurry. Uppskattningsvis påträffades dock endast mindre än 0,5 ton injekterad aska i form av klumpar vid utgrävningsarbetet.

3.3.2 Sättningsmätningar

Cirka två månader efter att injekteringen avslutats (före utgrävningarna) genomföres ett belastningsförsök i syfte att se hur deponin reagerar på en belastning motsvarande ett sluttäckningsmaterial (4,5 ton/m²) (se Figur 7). Genomförande av sättningsförsöken och placeringen av belastningsplattorna behandlas mer ingående i bilaga H.2.



Figur 7. Sättningsmätningar. 1 m² stora betongplattor med en belastning på cirka 4,5 ton.

Figure 7. Settlement measurements. 1 m² large concrete slabs with a load of 4,5 tonnes each.

Plattornas placering mättes av vid dag 0, 4, 7, 11, 15 och 32 för att studera höjddifferensen och injekteringens påverkan på sättningar. Mätnoggrannheten på mätningarna var +/-1 cm.

Efter 32 dagar hade plattorna på området med 3 meter mellan injekteringshålen sjunkit i genomsnitt 71,7 mm medan plattorna både på området med 5 meter mellan injekteringshålen och det icke-injekterade området hade sjunkit i medeltal 72,5 mm. Den uppmätta skillnaden mellan sättningarna på de olika områdena kan därmed inte anses vara signifikant. En förklaring till detta kan dock vara att andelen injekterad aska i förhållande till den totala volymen i injekteringsområdet var mindre än planerat eftersom askan ej stannade inom det injekterade området.

Hur mycket plattorna i genomsnitt hade sjunkit per dag på de tre områdena (3 meter mellan injekteringshålen, 5 meter mellan injekteringshålen samt ett icke-injekterat område) mellan varje mättillfälle fram till dag 32 samt den genomsnittliga markhöjden för respektive område illustreras i Figur 51 och Figur 52 i bilaga H.2.

Vid en jämförelse mellan sättningarna dag 0-15 och dag 16-32 ägde i samtliga fall omkring 60 % av sättningarna rum i den första perioden, se Figur 53 i bilaga H.2.

Slutsatsen av de sättningsmätningar som utförts är att det inte går att avgöra om att den injekterade askan bidrar till att deponin stabiliseras genom minskade sättningar. Troligtvis krävs en större mängd injekterad aska i förhållande till deponivolymer för att en stabiliserande effekt ska kunna påvisas.

3.3.3 Gasmätningar

En minskad gasutveckling på deponin förväntas till följd av injekteringen. Mätningar av producerad gasmängd och sammansättningen i den producerade gasen planerades därför att göras före och efter injekteringen för att kunna påvisa eventuella skillnader.

Före injekteringen

Under gasmätningarna före injekteringen togs prover på gas i en kammare placerad uppe på deponin inom ett visst tidsintervall för att sedan kunna analysera metangashalten (CH_4) och därigenom kalkylera flödet (försöken beskrivs närmare i bilaga H.1). Vid analysen av gasproverna kunde dock ingen metan CH_4 detekteras. Anledningen till detta har inte kunnat fastställas. Möjliga förklaringar kan vara att tätningen av hinken vid provtagningarna inte var tillräcklig samt att deponiytan var täckt av slam. Samma metod har dock med framgång använts vid liknande gasmätningar på andra deponier. Gasflödet upp ur deponin kan även ha påverkats av att man på Tveta Återvinningsanläggning suger ut gas ur deponin med hjälp av nedgrävda rör så att det blir undertryck.

Efter injekteringen

Eftersom gasprovtagningen före injekteringen inte gav några resultat när det gäller gasproduktionen valdes att göra en annan typ av mätningar i mätomgången efter injekteringen. För dessa prover planerades mätning av både metanhalt och svavelvätehalten nere i deponin genom de perforerade rören istället för på ytan, se beskrivning i bilaga H.1. Svavelväte- och metangashalten mättes direkt i fält och dessutom togs gasprover för analys med en gaskromatograf i laboratorium.

I Tabell 21 i bilaga H.1 redovisas resultaten från gasmätningarna som utfördes efter injekteringen. I de injekterade hålen varierade metanhalt mellan 18 och 46 % och i de ej injekterade hålen uppmättes metanhalt till mellan 22 och 70 %. Resultatet indikerar att metangashalten är något lägre i de hål som injekterats med aska, men osäkerheten kring detta är stor.

När det gäller svavelvätehalten var den mycket varierade mellan de olika hålen, från <1 ppm upp till >2000 ppm. I 4 av de hål som injekterats med aska var H_2S -halterna cirka 1 ppm, 2 ppm, 40 ppm samt 700 ppm vid 1-1,5 meters djup. För 4 icke-injekterade hål var H_2S -halterna <10 ppm, 500-600 ppm, 1400-1500 ppm samt 1500->2000 ppm vid 1,5-2,5 meters djup. Värdena tyder på att lägre halter av svavelväte förekommer i de hål som injekterats med aska. Osäkerheten är emellertid stor. En förklaring till de låga halterna vid mätningar i vissa injekterade hål kan vara igensättningar av injekterat material nere i röret eller runt röret vilket hindrar gasen från att komma in till mätpunkten i injekteringsröret.

I samband med utgrävningarna togs även gasprover för analys i laboratorium med en sond in i deponin i horisontell riktning (placeringen av mätpunkterna framgår i bilaga H.3 och resultaten redovisas i Tabell 22 i bilaga H.1). Metangashalten i dessa prover låg

mellan 15 och 26 procent med undantag från ett prov där metangashalten endast var 4 procent.

4 Diskussion och slutsatser

I pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning injekterades totalt 103 ton askslurry, varav 75 ton på deponiområdet och 28 ton i avgränsade testceller. För framställningen av dessa 103 ton askslurry blandades 70 ton fuktig flygaska (TS-halt 72 %) med vatten. Detta motsvarar storleksordningen på den mängd aska som innan försöken var planerade att injekteras. Antalet injekterade hål på deponiområdet var 15. Injekteringsarbetet tog längre tid än beräknat och efter närmare en månads arbete avslutades injekteringen. Maximalt kunde cirka 10 ton askslurry injekteras under en arbetsdag. Anledningen till att injekteringen tog lång tid berodde främst på en hel del problem med injekteringsutrustningen och att den var underdimensionerad för injektering av mängder omkring 100 ton. Även klumpar och metallbitar i askan orsakade problem genom igensättningar i injekteringsslangen och skador på blandaren och pumpen. Dessutom gjorde väderleken under november månad att vattnet i slangar med mera frös vid ett flertal tillfällen. Problemet med sönderfrusna delar hade kunnat undvikas genom att injekteringsarbetet utförts under sommarhalvåret. För att undvika övriga problem hade det troligtvis varit lämpligare med en utrustning med större kapacitet och som varit mindre känslig för variationer av storleken på askkornen. Bortsett från driftproblemen med en mindre utrustning hade dessutom en större utrustning krävt betydligt kortare tid för injektering av 100 ton aska, vilket hade varit mer ekonomiskt.

Den ekonomiska bedömningen i denna studie (se bilaga C) indikerar att kostnaden för injektering med en utrustning med en kapacitet på 10 ton/h blir omkring 400 SEK/ton askslurry (inkl. intryckning av perforerade rör samt bemanning för ett skift). Detta motsvarar en kostnad på cirka 800 SEK/ton torr aska. Kostnaden skulle kunna reduceras avsevärt genom att borrhning och injektering utförs i ett steg istället för att trycka ner perforerade rör innan injekteringen samt genom att införa två skift. Därmed skulle det troligtvis vara möjligt att komma ner till en kostnad i samma storleksordning som skatten för deponering, d.v.s. 370 SEK/ton torr aska.

Förutsättningarna för att ytterligare öka injekteringshastigheten bör även undersökas. En kapacitetsökning från 10 ton/h till 20 ton/h skulle sänka kostnaderna för injekteringen avsevärt.

Med den typ av utrustning som användes i pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning med en kapacitet på maximalt 1,5-2 ton/h, förutsatt problemfri drift, uppskattas kostnaden till drygt 700 SEK/ton askslurry (cirka 1400 SEK/ton torr aska). Det bör dock noteras att med kapacitetsantagandet 1,5-2 ton/h skulle det ta cirka 8 arbetsdagar att injektera 100 ton askslurry men vid pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning tog det p.g.a driftproblem cirka 20 dagar att injektera motsvarande mängd, vilket gav ännu högre kostnader för arbetet.

Kostnadsuppskattningarna visar att det är ekonomisk lönsamt att välja en relativt stor injekteringsutrustning för ett inte alltför litet projekt. Driftsfördelar finns även för en större utrustning eftersom kapaciteten kan vara kontinuerlig istället för satsvis samt genom att borrhning av injekteringshålen och injekteringen kan ske samtidigt. Vid

pilotförsöken ”förborrades” injekteringshålen till 9 meters djup genom att perforerade stålrör trycktes ned i avfallsdeponin. Detta orsakade problem eftersom det i ett flertal hål var svårt att få ner injekteringsslangen till 9 meters djup p.g.a. igensättningar i rören. Det största djupet för injekteringen varierade därför från hål till hål mellan 4-9 meter.

I planeringen av injekteringsarbetet förväntades att askslurryn skulle vara svår att pumpa ner och att det skulle uppstå mottryck, dels p.g.a. att materialet i deponin var hårt kompakterat och dels p.g.a. mottryck från injekterad aska. Injekteringsutrustningen valdes därför mycket utifrån kapaciteten att pumpa med ett högt tryck istället för storleken på blandningstanken. Vid injekteringsarbetet visade sig dock att inget tryck krävdes för att få ner injekteringsmaterialet i deponin utan askslurryn rann lätt ned under större delen av injekteringsarbetet. Inget mottryck uppkom vare sig p.g.a. avfallet i deponin eller den injekterade askan. I kortare perioder kunde dock mottryck uppkomma, i några hål upp till 10 bar, vilket antagligen främst berodde på problem med igensättningar i utrustningen.

När det gäller askan användes främst en färsk flygaska (TS-halt 72 %) från biobränsleförbränning som siktats till 9 mm (gemensam silo till vilken både el- och slangfilteraska samt svavelreningsprodukter från tre olika pannor matas, se bilaga D). Denna blandade sig väl med vatten (50-60 % vattenhalt i blandningarna), men för att underlätta bildandet av en slät slurry sänktes ytspänningen genom att en liten mängd diskmedel tillsattes i de flesta blandningar. Den åldrade bottenaskan som provades i två hål visade sig mindre lämplig än flygaskan genom att igensättningar förekom p.g.a. stenliknande klumpar i askan. En hel del problem med igensättningar hade kunnat undvikas genom att askan siktats till ett mer finkornigt material. Om flygaskan varit torr innan den blandades med vatten hade även en del av klumparna i askslurryn kunnat undvikas. Flygaskan som tas emot på Tveta Återvinningsanläggning är befuktad för att undvika damning.

Ur den multivariata analysen av alla askor som undersökts med avseende på kemisk sammansättning (se bilaga D.4) kan slutsatsen dras att materialen som undersöktes i förväg i laboratorium är representativa för de senare injekterade askorna. Askor kan därmed efter kemisk analys infogas i datamatriken för att därigenom bedöma deras lämplighet för injektering. Både laboratoriestudierna och pilotförsöken indikerar att flygaska lämpar sig bättre än bottenaska som injekteringsmaterial.

Volymen av det område på Tveta Återvinningsanläggning dit injekterad aska kan ha spritt sig beräknas vara drygt 2000 m³. Den injekterade askslurryvolymen på 54 m³ motsvarar uppskattningsvis cirka 12-16 % av den tillgängliga porvolymen inom detta område. Det visade sig i uppföljningsarbetet efter injekteringen att denna mängd aska i deponin inte var tillräckliga för att ge några slutsatser angående minskade sättningar eller minskad gasproduktion. Vid utgrävningarna av injekteringsområdet kunde inte heller någon större mängd aska återfinnas och det var inte uppenbart från vilka hål askan härstammade. Detta tyder på att materialet troligtvis har spridit sig ganska långt genom att ta den lättaste vägen genom hålrummen i avfallet. Emellertid kunde det konstateras att askmaterialet i deponin hade stelnat som hårda, något spröda klumpar (från grusstorlek upp till ett par decimeter i diameter). Askklumparna som fanns ner till

6 meters djup gick att bryta sönder medan materialet var hårdare och mindre sprött vid 9 meters djup. Detta beror antagligen på att temperaturen är högre långt ner i deponin, över 50 °C (se Tabell 3 i bilaga E).

Som framgår av resonemanget ovan har de flesta av de frågor som ställdes upp innan projektet startade (se kapitel 2) kunnat besvaras genom pilotförsöken samt de kompletterade laborieförsöken trots att betingelserna under pilotförsöken inte var optimala. Slutsatsen när det gäller injekteringspotentialen är att aska kan blanda sig väl med vatten till en pumpbar slurry som kan injekteras utan risk för härdning i injekteringsutrustningen. Eftersom inget mottryck uppkom vid injekteringen tyder det på att avfallet i deponin inte trycks undan av den injekterade askan utan istället rinner askslurryn genom håligheter i avfallet.

Nere i deponin stelnar askan till hårda men något spröda klumpar som kan bidra till en ökad stabilitet i deponin. I vilken utsträckning stabiliteten påverkas och vilka mängder aska som krävs för detta har dock inte kunnat klargöras med pilotförsöken i denna studie eftersom uppenbarligen en för liten andel aska i förhållande till injekteringsområdet injekterades. Detta har gjort att några slutsatser inte heller har kunnat dras om hur kemin och gasproduktionen i en avfallsdeponi påverkas av injektering av aska. För att få märkbara effekter av askinjektering i en deponi krävs att en relativt stor mängd aska injekteras, åtminstone något eller några tusen ton.

5 Rekommendationer och användning

Vid injektering i en avfallsdeponi rekommenderas en utrustning med en kapacitet på 100-200 liter per minut och en blandare på minst 500 kg. Om stora mängder aska ska injekteras är det lämpligt att ha en utrustning med kontinuerlig kapacitet istället för satsvis. Pumpen bör ha ett maximalt tryck på omkring 20-30 bar för att kunna öppna upp eventuella sprickor i avfallet vid injekteringsstarten. Både trycket och flödet måste kunna regleras. För att injekteringen ska ske så effektivt som möjligt bör injekteringslangen vara utrustad med en dubbel manschett och injekteringsslangen bör vara minst en halv tum i diameter.

Om injekteringshålen förborras innan injekteringen genom att perforerade foderrör sätts ned i deponin bör rören uppskattningsvis ha en diameter på 54 mm och de små hålen för spridningen av materialet en diameter på 30 mm för att undvika igensättningar. Vid injekteringen ska sedan en manschett användas med motsvarande diameter som rören. Emellertid kan det vara mer ekonomiskt att använda en utrustning där förborring undviks genom att ett icke-perfoerat rör trycks ned under själva injekteringen som sedan återtå.

En ask-vatten-blandningen med en vattenhalt på omkring 50-60 % ger en välblandad pumpbar slurry som inte härdar under injekteringsarbetet. Uppskattningsvis tar det ett par dagar för denna blandning att stelna nere i deponin. Eventuellt kan det vara lämpligt att försöka hålla nere vattenhalten något under 50 % för att öka blandningens viskositet och därmed undvika att askan sprider sig allt för långt från injekteringshålen. För få en smidigare blandning för injekteringen kan en liten mängd diskmedel tillsättas så att ytspänningen sänks. Askan som ska blandas med vatten bör hållas torr efter man har krossat eller siktat den för att undvika att klumpar bildas i askslurryn. Lämplig förvaring är exempelvis i en silo. Vidare lämpar sig flygaska bättre än bottenaska som injekteringsmaterial.

Flygaska är aggressivt mot både händer och ögon och därmed rekommenderas att handskar och skyddsglasögon/skyddsmask används under injekteringsarbetet. Dessutom bör rinnande vatten och rengöringsmedel för händer mm finnas tillgängligt.

6 Förslag till fortsatt forskningsarbete

För att tydligare klargöra både de lång- och kortsiktiga positiva effekterna av att injektera flygaska på en avfallsdeponi bör storskaliga försök genomföras. Detta krävs speciellt för att studera hur gasproduktionen och kemin i deponin påverkas samt om differentiella sättningar kan undvikas.

I fortsatta försök bör askmängden i förhållande till volymen på det injekterade området utökas och utrustningens kapacitet vara högre än den som använts i detta projekt. Andelen aska i förhållande till den tillgängliga porvolymen i avfallsupplaget som är lämplig att injektera för att uppnå positiva effekter i en deponi bör undersökas. Vilken fyllnadsgrad krävs?

Flygaskor med en hög halt av sulfater kan ha vissa fördelar genom att i ett avfallsupplag bidra till fastläggning av metaller genom bildandet av metallsulfider. Det kan även påverka resterande gasbildning genom att buffra redoxpotentialen i avfallet. Detta gör att askor t.ex. från förbränning av torv eller andra bränslen med hög svavelhalt är speciellt intressanta. Hur fastläggningen av metaller i deponin påverkas av injekterad flygaska bör undersökas i fortsatta studier t.ex. genom mätningar på lakvattnet. Är det en fördel att använda sulfathaltig aska?

7 Litteraturreferenser

- [1] Sear L.K.A.; "The properties and use of coal fly ash", Thomas Telford Publishing, London, 2001
- [2] Kipko Eh.Ya., Polozov Yu.A., Lushinkova O.Yu., Lagunov V.A., Svirskiy Yu.I.; "Integrated Grouting and Hydrogeology of Fractured Rocks in the former USSR", Spetstamonazhgeologia Enterprize, Antratsit, Ukraine, Converted into Technical English by Roy E. Williams, The University of Idaho, published by Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, 1993, ISBN 0-87335-116-9
- [3] Kutzner C.; "Grouting of rock and soil", A.A. BALKEMS / ROTTERDAM / BROOKFIELD, 1996, ISBN 90 5410 634 4
- [4] Henn R.W.; "Practical guide to grouting of underground structures", ASCE Press, American Society of Civil Engineers, New York, 1996, ISBN 0-7844-0140-3
- [5] Brundin H., Kihl A., Lagerkvist A., Pusch R., Rihm T., Sjöblom R., Tham G.; "Långtidsegenskaper hos tätskikt innehållande bentonit", RVF Rapport 01:12, 2001, ISSN 1103-4092.
- [6] Bozkurt S., Moreno L., Neretnieks I.; "Long-term processes in waste deposits", KTH, Stockholm 1999
- [7] Harrison D.; "The grouting handbook", Gulf publishing company, 2000, ISBN 0-88415-887-X
- [8] Finkel M., Thoring T.; "Handbok i prospekteringsborrning", Svenska gruvföreningen – Kommittén för prospekteringsborrning, 1989
- [9] Stille H.; "Svensk injekteringsforskning – 30 år", Bergmekanikdag 1997, Stiftelsen bergmekanisk forskning, Stockholm 1997
- [10] "Chemical grouting", Technical engineering and design guides as adapted from the U.S. Army Corps of Engineers, No. 24, ASCE Press, American Society of Civil Engineers, New York, 1997, ISBN 0-7844-0282-5
- [11] Kosmatka S.H.; "Cementitious grouts and grouting", Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1990. ISBN 0-89312-088-X
- [12] Janson T.; "Calculation models for estimation of grout take in hard jointed rock", Royal Institute of Technology, Division of soil and rock mechanics, Doctoral Thesis 1018, Stockholm 1998, ISSN 1400-1284
- [13] Lysén L., Palmquist K.; "Tätning av bergtunnlar. Projekteringsmetodik, Injektering och förstärkning", Byggnadsforskningen, rapport R4:1976, Statens Råd för Byggnadsforskning, Stockholm 1976, ISBN 91-540-2526-5
- [14] Palmquist K.; "Tätning av bergtunnlar. Injekteringsutförande och resultat", Statens Råd för Byggnadsforskning, BeFo 66:1/83
- [15] "Betongkonstruktioner – Bruk för injektering av foderrör för spännkablar – Provning", Svensk Standard SS-EN 445
- [16] "Betongkonstruktioner – Bruk för injektering av foderrör för spännkablar – Utförande", Svensk Standard SS-EN 446

-
- [17] ”Betongkonstruktioner – Bruk för injektering av foderrör för spännkablar – Fordringar”, Svensk Standard SS-EN 447
 - [18] ”Utförande av geokonstruktioner – Injektering”, Svensk Standard SS-EN 12715
 - [19] Brantsberg Kent och Källström Jan-Olof, Svensk Byggekraft, personlig kontakt, november 2002
 - [20] Bjurström, H., Ilskog E., Berg M.; ”Askor från biobaserade bränslen i fjärrvärme- och skogsindustri sektorn– askmängder och askkvalitet”, Statens Energimyndighet, 2003 (under tryckning)
 - [21] Larsson, P-E. och Westling, O.; ”Lakning av vedaska - en laboratoriestudie”, IVL-rapport B1325, Institutet för Vatten- och Luftvårdsforskning, Stockholm, 1999
 - [22] Ecke H.; ”Karbonatstabilisering av flygaska från avfallsförbränning”, RVF Rapport 02:05, februari 2002
 - [23] Mácsik J., Lenströmer S.; ”FACE-Etapp 1. Delrapport steg 1”, Q-107 SCC:FACE, Scandiaconsult, Sundsvall, januari 2003, arbetsmaterial
 - [24] Arvidsson K.; ”Utveckling av tätskikt för sluttäckning vid Tveta avfallsanläggning”, examensarbete för civilingenjörsprogrammet, Inst. för Samhällsbyggnadsteknik, avd. för Avfallsteknik, Luleå tekniska universitet, 2001
 - [25] Ryk Lennart, Söderenergi, telefonkontakt 2003-03-27
 - [26] Haglund Jan-Erik, Miljöchef på Söderenergi, telefonkontakt 2002-12-19
 - [27] Söderenergi; ”Miljörapport 2001”, Södertälje, mars 2002
 - [28] Chandler, A.J., Eighmy, T.T., Hartlén, J., Hjelm, O., Kosson, D.S., Sawell, S.E., Van der Sloot, H.A., Vehlow, J.; ”Municipal solid waste incineration residues”, Studies in Environmental Science 67, Elsevier Science B.V. Amsterdam, 1997
 - [29] Telge Återvinning AB; ”Miljöberättelse 2002 Telge Återvinning”
 - [30] Olsson, A., Todorović, J.; ”Statistical Methods and experimental design - Compulsory assignment 5”, Intern rapport, Luleå tekniska universitet, mars 2002.

Bilagor

- A. Litteraturstudie – Tidigare erfarenheter av injektering
- B. Utrustning för injektering
- C. Ekonomisk bedömning
- D. Lämpliga askor – Tillgänglighet, ursprung och kemiska analyser
- E. Beskrivning av Tveta Återvinningsanläggning
- F. Laboratorieförsök
- G. Injektering i pilotskala
- H. Utvärdering av pilotförsöken

A Litteraturstudie – Tidigare erfarenheter av injektering

A.1 Bakgrund

Injektering har definierats som injektion av suspensioner, emulsioner eller kemiska lösningar under tryck för att förbättra de geologiska egenskaperna hos jord och berg och för att underlätta fyllningen av håligheter inför strukturella processer [1].

Utvecklingen av injektering av ohärdat cementbruk börjande som en metod för förbättring av grundmaterialet i väg- och vattenbyggnadskonstruktioner i och runt vattenkroppar. Konceptet att injektera en självhårdande cementslurry användes första gången år 1802 i Frankrike för att förbättra bärläggningen under en sluss [4].

Idag är injektering en del i de flesta underjordiska väg- och vattenprojekt och tekniken har tillämpats i jord och berg i stor skala i över 30 år. Cementbruket används till att fylla porer och hålrum i det geologiska materialet för att reducera läckage, stärka grunden eller förbättra interaktionen i markstrukturen. Injekteringen kan utföras både i samband med underjordiska konstruktioner såsom tunnlar och gruvbrytning och från markytan vid t.ex. byggnation av en damm.

Till skillnad från injektering för tätning och stabilisering av jord och berg är erfarenheterna av injektering för att stabilisera deponier små. Stabilisering av deponier bestående av gammalt ”okonsoliderat” kommunalt avfall bedöms dock kunna vara möjlig. Injekteringstekniken för deponier kan liknas vid den som används för stabilisering av mark och därför kommer främst tidigare erfarenheter från jordstabilisering att behandlas i nedanstående avsnitt. Injektering i berg är dock en mer använd teknik varför vissa delar av injekteringsteorin är tagen från denna tillämpning.

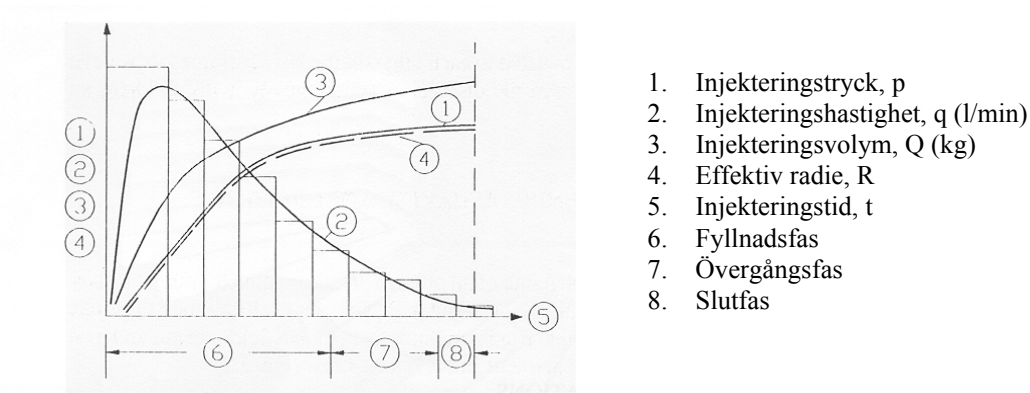
Cementblandningar är det injekteringsmaterial som används i störst utsträckning. Flygaska som ersättning för cement har dock i viss mån använts för injektering tidigare. Det har då främst varit flygaska från förbränning av kol som använts. Flygaska som matas ut torr bildar tillsammans med vatten en pumpbar ”grout” som ofta stelnar inom loppet av några timmar till några dygn, främst till följd av hydratiseringsreaktioner. Flygaska som injekteringsmaterial har en antal tekniska, reologiska (flödes), hållbarhets och ekonomiska fördelar jämfört med vanlig sand och cement [1].

A.2 Injekteringsteori

Injekteringstekniken började genom praktiskt genomförande och det fanns då inte särskilt mycket teorier kring hur injektering bör ske eller vad som styr processen. Det är uppenbart att om hålrum i underjorden fylls med ett flytande material som sedan stelnar leder det till tätning och stabilisering.

Figur 8 visar ett typiskt diagram för en korrekt fyllning av hålrum. Trycket p kontrolleras så att det sakta och stadigt stiger från noll till det tillåtna slutvärdet. Den effektiva radien på injekteringszonen ökar med tiden till den slutliga effektiva radien R . I fyllnadsfasen är injekteringshastigheten q stor men den sjunker sedan med tiden och

bör konvergera mot noll i slutet. Av praktiska skäl går dock inte injekteringshastigheten ner ända till noll. Den totala volymen (Q) av injekteringsmaterial ökar fram till slutet av processen.



Figur 8. Diagram för korrekt fyllningsinjektering [3].

Figure 8. Diagram for correct fill grouting [3].

Under injekteringsprocessen får inte materialet börja härda eller blockera fortsatta genomborrningar genom sedimentering. Vidare måste injekteringsmaterialet kunna tränga undan det vatten som finns i porer och hålrum utan utspädning och försämring av materialets egenskaper. Parametrar som bör betraktas i alla teoretiska och experimentella utredningar kring injekteringstekniker är:

- Injekteringsmaterialets flödes- och härdningsegenskaperna
- Injekteringstrycket
- Den effektiva radien på injekteringszonen (d.v.s. den radie till vilken injekteringsmaterial övergår från borrhålet)
- Injekteringstiden
- Användningsområden för olika injekteringsmaterial

Under senare år har även miljöpåverkan diskuterats vilket inte minst berör kemiska injekteringsmaterial.

Injekteringsmaterialalets flödes- och härdningsegenskaperna

Flödes- och härdningsegenskaperna för alla injekteringsmaterial begränsas av viskositets- och flytgränser. Dessa gränser är viktiga parametrar vid praktisk tillämpning. I princip är viskositeten ansvarig för hur lämpligt ett injekteringsmaterial är för ett givet system av bergsprickor eller porer samt för den effektiva radien. Viskositeten har även betydelse för pumpbarheten. Med vanlig utrustning går det bra att pumpa vätskor med en viskositet på upp till cirka 0,8-1,0 s·Pa [3]. Erfarenhet och forskning har dock visat att för att erhålla önskvärda reologiska och mekaniska

egenskaper är det lämpligt att viskositeten för injekteringsmaterial är lägre än dessa värden, omkring 0,02-0,07 s·Pa [2].

Arbetsprocessen påverkas även av flödesbegränsningar eftersom trycket måste vara tillräckligt högt för att komma över flytgränsen (den dynamiska skjuvspänningen, τ_0) utan att mediet som injekteringen sker i spricker sönder. Flytgränser på upp till cirka 50 Pa kan kontrolleras med vanlig utrustning [3]. Med avseende på reologiska och mekaniska egenskaper hos injekteringsmaterialet har erfarenhet och forskning visat att τ_0 bör vara 50-200 Pa [2].

En annan viktig aspekt vid praktiska tillämpningar är användningen av stabila blandningar av injekteringsmaterial så att inte sedimenteringen eller koagulering uppstår under arbetstiden. Sedimentering kan leda till blockering av porkanaler och därmed hindra fyllningen, vilket reducerar den effektiva radien.

Injekteringstrycket

Den effektiva radien ökar med injekteringstrycket. Förutsättningarna är att flödesgränsen överstigs samt att porerna är tillräckligt stora för att fasta partiklar i suspensioner ska kunna komma in. Under dessa förutsättningar förväntas alltså ett maximalt tryck ge det bästa injekteringsresultatet. Lämpligheten med ett högt tryck vid injektering har dock länge diskuterats eftersom ett högt tryck kan leda till att materialet i vilket injekteringen sker spricker sönder. Vid för högt tryck kan även förflyttningar av jordmaterial närmast borrhålet förekomma så att injekteringsmaterialet placeras i ett konstgjort hålrum nära borrhålet istället för att sprida sig till omgivande jord.

Det lämpliga trycket för fyllning av hålrum kan bestämmas genom försiktiga tester eller genom erfarenhet. Generellt ska trycket vara under "krackningstrycket", d.v.s. det tryck då jord- eller bergmaterialet börjar spricka sönder.

Den effektiva radien

Ekvationer har tagits fram för att beräkna den effektiva radien vid injektering. Den effektiva radien erhålls dock bäst genom praktisk erfarenhet eftersom ekvationerna bygger på förenklade förhållanden såsom konstant bredd och orientering av bergsprickorna.

Injekteringstiden

Injekteringstiden är relaterad till utvecklingen av injekteringsmaterialets viskositet, tillåtet injekteringstryck samt till den önskvärda och uppnåeliga effektiva radien. Injekteringstiden begränsas av viskositeten till pumpbarhetsperioden. Viskositeten börjar till viss del att öka strax efter materialets framställning men först efter en period ökar viskositeten hastigt. Denna pumpbarhetsperiod är cirka 2-4 timmar för cementsuspensioner, 20-60 minuter för vanliga kemiska injekteringsmaterial och några få minuter eller sekunder för skum och andra specialmaterial [3].

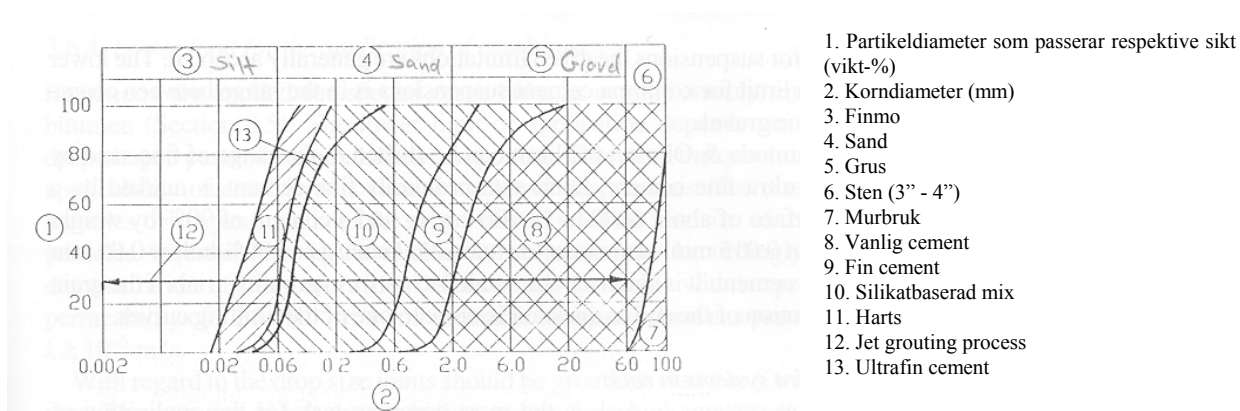
Injekteringstiden och det tillåtna trycket är relaterade till varandra eftersom pumphastigheten måste reduceras om trycket ökas. Under fyllnadsprocessen är pumphastigheten cirka 40-60 l/min för att fylla stora hålrum i berg och cirka 20-30 l/min för att fylla bergssprickor och porer. Pumphastigheten reduceras till cirka 1-3 l/min under slutfasen [3].

Användningsområden för olika injekteringsmaterial

Injekterbarheten i ett medium är relaterat till genomträngligheten. Detta gör att det finns begränsningar för vilka injekteringsmaterial som kan användas för injektering i olika medium. Vid injektering av lösningar begränsas inte användningsområdet av små suspensionspartiklar som kan sätta igen porkanalerna så att materialet hindras från att transporteras vidare. Istället beror den lägre gränsen för användning enbart på genomträngligheten hos mediet där injekteringen sker samt flödesegenskaperna hos injekteringsmaterialet.

Den initiala genomträngligheten hos jorden samt den initiala viskositeten hos injekteringslösningen bestämmer den effektiva radien eller injekterbarheten. Under injekteringstiden ökar viskositeten vilket gör att genomträngligheten minskar. För att kompensera för den reducerade radien kan trycket ökas, dock inte så mycket så att berg- eller jordmaterialet spricker sönder.

Den lägre begränsningen för användning av injekteringslösningar i jordens porsystem visas i Figur 9. Begränsningarna har utvecklats genom praktisk erfarenhet med vanliga kemiska injekteringsmaterial och med stabila suspensioner. Värdena har visat sig vara pålitliga och är generellt accepterade.



Figur 9. Användningsområden för olika injekteringsmaterial [3].

Figure 9. Range of application for different grouting materials [3].

Injektering av lösningar i bergsprickor följer i princip samma regler som vid injektering i jord. Den lägre begränsningen för användning av ett injekteringsmaterial ges av viskositeten som funktion av tiden samt det tillåtna trycket.

Omfattande utredningar har även gjorts för injektering av suspensioner i jordens porsystem genom användning av framförallt cement-, lercement och lersuspensioner. Genom laboratorieförsök och storskalig erfarenhet har distributionskurvor för kornstorleken tagits fram, se Figur 9. Precis som för lösningar är begränsningarna för suspensioner generellt accepterade.

Suspensioner, framför allt med cement, används främst för tätning av sprickor i berg. Storleken på den minsta injekterbara sprickan bestäms främst av cementets partikelstorlek. Minsta diametern varierar i praktiken från 0,1 till 0,5 mm [3]. Om större sprickor existerar kommer injekteringsmaterialet först att tränga in i dessa. De minsta sprickorna förblir då obehandlade. Tätningensåtgärden kan dock vara lyckad ändå om läckage hindras enbart genom att de stora sprickorna tätas.

A.3 Injekteringsmetoder

Det finns ett flertal olika metoder för injektering. Vilken injekteringsmetod som är lämplig beror främst på det geologiska materialet d.v.s. om injekteringen ska ske i jord eller berg och vilken typ av hålrum som existerar. Den önskade funktionen av injektering, t.ex. markstabilisering, samt materialet som ska injekteras är andra viktiga aspekter vid valet av injekteringsmetod. Några vanliga metoder är:

1. *“Fyllnadsinjektering” (eng. fill or permeation grouting)*. Syftet är att fylla existerande hålrum och porer *utan* en anmärkningsvärd förändring i strukturen hos tomrumssystemet. Injekteringen fungerar som tätning och stabilisering av jord och berg. Metoden är den äldsta och vanligaste formen av injektering. En typisk injekteringsmix innehåller cement, bentonit och vatten. Flygaska och finkorning sand kan även adderas vid injektering i grus för att reducera materialkostnaderna.
2. *“Krackningsinjektering” (eng. crack or fracture grouting, or hydrofracture grouting)*. Syftet är att fylla konstgjorda och naturligt existerande hålrum och porer *med* en anmärkningsvärd förändring i strukturen hos tomrumssystemet. Nya tomrum bildas genom ett hydrauliskt tryck av injekteringsmaterialet som därpå fylls upp. Injekteringen fungerar som tätning och stabilisering av jord och berg.
3. *“Sammanpressningsinjektering” (eng. compaction grouting)*. Syftet är att fylla ett onaturligt bildat hålrum direkt runt röret där injekteringsmaterialet förs in i jorden. Hålrummet, som vanligtvis är 1,5-6,1 m, bildas genom att jorden närmast röret sammanpressas och trängs undan av injekteringsmaterialet [4]. Denna typ av injektering bidrar till en ökning av jordens bärkapacitet och används t.ex. för att kontrollera förflyttningar i marken vid tunnelbyggnationer.

Oundvikliga liksom önskvärda kombinationer av de tre injekteringsmetoderna ovan förekommer. Dessa tre metoder skiljer sig från en relativt ny metod som utvecklats sedan 1960-talet där ett högre tryck används:

4. *Jet grouting* för tätning och stabilisering av svag jord och berg. En stråle av injekteringsmaterial eller vatten vid högt tryck upp emot 60 MPa används för att lossa och fräta sönder jorden. Tomrummet som bildas genom den här proceduren fylls upp av en blandning av injekteringsmaterial och lossad jord.

Målet är att bilda en sammanhängande zon med låg genomtränglighet och förbättrad hållfasthet. Metoden är inte en injekteringsmetod i vanlig mening utan en "mix-in-place" metod för att förbättra jorden.

A.4 Injektering för markstabilisering

För att täta och stabilisera är det nödvändigt att göra hålrummen i underjorden tillgängliga och att fylla dem så fullständigt som möjligt med injekteringsmaterial. Hålrummen blir tillgängliga genom borrhål. Med fyllnadsinjektering arrangeras borrhålen så att en sammanhängande injekteringszon bildas med överlappande områden.

Av kostnadsskäl är det viktigt att minimera borrarbetet. Förutsättningen för detta är att konstruktören känner till flödesparametrarna för injekteringsmaterialet samt hålrumssystemets egenart.

Nedan behandlas olika metoder för stabilisering av både osammanhängande och sammanhängande jordmassor, där fyllnadsinjektering av osammanhängande jord kan tänkas vara den teknik som främst lämpar sig för stabilisering av deponier.

Stabilisering av osammanhängande jord genom fyllnadsinjektering

Syftet med stabilisering av osammanhängande jord genom fyllnadsinjektering (eng. fill grouting) är att förbättra tryck- och skjuvhållfastheten så att jordstrukturen inte brister och sjunker undan. Eftersom porerna fylls med härdande material kommer jorden samtidigt att tätas.

Borrhålen arrangeras så att det blir möjligt att uppnå en sammanhängande och homogen injekteringszon. Hur tätt hålen ska borraras beror på materialets genomsläplighet. Mellanrummen mellan borrhålen kan vara upp till 4 meter om jordmaterialet är grovt och har hög genomsläplighet [3].

Trycket vid injekteringen måste hållas under "krackningstrycket", d.v.s. det tryck då jord- eller bergmaterialet börjar spricka sönder. Normalt är trycket mellan 0,2 och 1,0 MPa och injekteringshastigheten i storleksordningen 5-15 l/min [3].

Efter injekteringen ska materialet utveckla tillräcklig hållfasthet eller resultera i förstärkning av jordpartiklarna som är i kontakt med varandra. Hållfasthet är förknippat med deformation. Om hållfastheten är hög är risken för deformation låg. Injekteringsmaterialet ska även vara stabilt mot erosion. Cementbaserade suspensioner och silikatbaserade starka geler är exempel på material som uppfyller kraven för markstabilisering. Enligt Figur 9 begränsas användbarheten av både cement och starka geler av kornstorleken hos jorden där injekteringen sker.

Innan ett material används för injektering är det vanligt att stabiliseringseffekten kontrolleras genom laboratorietester. Flödesegenskaper, sedimentation och tryckhållfasthet är parametrar som testas för olika typer av material. För kemiska

injekteringsmaterial är det även nödvändigt att testa materialets livslängd och miljöpåverkan.

Tryckhållfastheten är den viktigaste egenskapen hos stabiliserad jord. Hållfastheten beror på jordens kornstorlek, typen av injekteringsmaterial samt testmetoden. Dessutom beror hållfastheten på fyllningsgraden i porerna och följaktligen injekteringshastigheten, injekteringstrycket samt hur insprutningen arrangeras. Laboratorietester för grov sand har visat att hållfastheten ökar proportionellt mot fyllningsgraden i porerna. Samma relation antas gälla även för andra jordtyper.

Tabell 1 visar enaxlig tryckhållfasthet av jord som stabiliserats genom porfyllnadsinjektering. Denna typ av värden kan vara intressant att jämföra med tester för injektering av flygaska på deponier.

Tabell 1. Enaxlig tryckhållfasthet av fyllnadsinjekterad jord [3].

Table 1. Linear pressure strength of grouted soil [3].

Injekteringsmaterial	Jordtyp	Hållfasthet (MPa)		
		Normal test ¹ DIN 1048	Controlled test ² DIN 18 136	Creep test ³ DIN 4093
Cementsuspension	Grus	10-20		
Silicagel (Joosten)	Sandigt grus	5-7	3-5	
Silicagel (one-shot-type)	Fin och medium sand	3-4	1,5-3,0	1,0-1,5

¹ Okontrollerad matningshastighet

² Matningshastighet 0,2 % av den initiala provets höjd per minut

³ Tillåten deformation 0,02 % av initiala provets höjd inom 7 dagar

Stabilisering av sammanhängande jord genom "crack grouting"

"Crack grouting" (Krackningsinjektering) kan användas för att stoppa sättningar av jorden eller för att återställa jordstrukturen. Injekteringsmetoden är även användbar för att stabilisera sluttningar.

Jordstabiliseringen sker genom hydraulisk "krackning" av jorden och fyllning av sprickorna med injekteringsmaterial. Sprickorna utvecklas mestadels i vertikal riktning men med ökad sammanpressning åt sidorna av fyllnadsmaterialet kan även horisontella sprickor uppkomma. Till slut bildas ett hårt skelett av injekteringsmaterial med sammanpressad jord mellan skelettets förgreningar.

Borrhålen arrangeras så att det blir möjligt att utveckla ett sammanhängande skelett. För en allmän förbättring av jordstabiliteten är det lämpligt med 2,0 till 4,0 meter mellan borrhålen, med 4,0 meters mellanrum för svag jord [3].

Injekteringstrycket vid "crack grouting" måste överstiga "krackningstrycket", vilket kan beräknas eller fastställas genom tester. Trycket för att bredda och fylla existerande sprickor är lägre än trycket som krävs för att skapa nya sprickor och därför sjunker injekteringstrycket efter sprickbildningen. För att skapa skelettet krävs inte ett tryck på mer än cirka 1,5 MPa [3].

Vid ”crack grouting” används vanligen suspensioner av cement med eller utan fyllnadsmaterial. Skelettet av härdad cement ger extra skjuvhållfasthet till jorden som helhet. Jordens hållfasthet inuti skelettet beror på dräneringsförhållanden och återställning av porttrycket. Det finns ingen sammanhängande injekteringszon och därför är det svårt att bedöma och fastställa injekteringsresultatet i termer av jordhållfasthet.

Sammanpressningsinjektering

Sammanpressningsinjektering (eng. compaction grouting) syftar till att ersätta och pressa ihop lös jord närmast injekteringsrörets mynning. Injekteringsmaterialet lägger sig som en sammanhängande massa liknande ett cylindriskt klot och går inte in i den kringliggande jorden eller skapar sprickor i jorden. Klotet av injekteringsmaterial utvecklas när injekteringsröret avlägsnas under injekteringen.

Vid sammanpressningsinjektering bildas inte en sammanhängande injekteringszon. Diametern på injekteringsklotet kan vara upp till 1,0 meter [3]. Klotet är inte i kontakt med varandra men det är däremot de sammanpressade zonerna av jord. Sammanpressning uppkommer på ett avstånd upp till 2 meter från respektive injekteringsklot [3].

Trycket vid injekteringen är under ”krackningstrycket”. Precis som för andra injekteringsmetoder är injekteringstrycket och injekteringshastigheten de kontrollerande parametrarna vid sammanpressningsinjektering. Om tryckökningen är för snabb eller om hastigheten är för hög leder det till att jordstrukturen spricker sönder.

A.5 Utförande av injekteringsarbete

Alla injekteringsarbeten består av två delar: borrhning av hålen och injektering av material. Generellt står borrhningen för en större kostnad än själva injekteringen. Primära hål med stort avstånd mellan varandra borrar och injekteras först. Därefter görs sekundära borrhål som halverar avståndet mellan de primära borrhålen. Borrhningen och injekteringen fortsätter på detta sätt till hela injekteringszonen har injekterats. Om det blir flera rader av borrhål sker arbetet från utsidan till mitten av det behandlade området. Anledningen till att primära borrhål injekteras före sekundära o.s.v är att det annars skulle vara oundvikligt att injekteringsmaterial spreds sig från ett borrhål till ett annat. Normalt är det slutliga avståndet mellan hålen 3-6 meter [1].

Injekteringen i borrhålen sker vertikalt genom olika sektioner där manschetter (packers) används för att isolera den sektion som behandlas från andra delar av borrhålet. Det finns två olika arbetssätt för injekteringen: (1) nedåtgående förfarande (från topp till botten) eller (2) uppåtgående förfarande (från botten till toppen). Vid nedåtgående injektering borrar först ett hål genom den första sektionen och injekteras. Därefter borrar hålet på nytt ner till slutet av nästa sektion o.s.v. Manschetten placeras vid botten av den sist injekterade sektionen. Vid uppåtgående injektering borrar istället hålet direkt ner till det slutliga djupet. Borrhålet injekteras sektion för sektion från botten till toppen och på manschetten placeras vid toppen på den sektion som injekteras. Det uppåtgående

arbetssättet går fortare och är mindre kostsamt eftersom man inte behöver borra flera gånger genom injekterade sektioner. En förutsättning för uppåtgående injektering är dock att borrhålen är stabila. Geologiska förhållanden, vilka är avgörande för borrhålens stabilitet, är därmed den avgörande faktorn vid valet mellan uppåtgående och nedåtgående injektering.

Sektionsvis injektering kan även ske med ”tubes-a-manchette” vilket är vanligast vid injektering av osammanhängande jord. Alla borrhål kan då förborras och utrustas med perforerande foderrör innan injekteringen startar. En ventilliknande funktion gör att injekteringsmaterial inte kan komma in i röret från utsidan. Perioderna för borring och injektering är separerade från varandra.

Injekteringsarbete utförs med hjälp av en injekteringsstation. Injekteringen startar så fort borrhålet är tvättat och manschetten är placerad. Ordentlig tvättning av borrhålen förbättrar injekterbarheten. För detta används vanligtvis en blandning av vatten och komprimerad luft vid trycket 0,5-1,0 MPa [3]. Efter tvättningen påbörjas injekteringen med högt eller måttligt högt utflöde från pumpen vid lågt tryck. Trycket ökar successivt vid fyllningen samtidigt som pumphastigheten reduceras till en specificerad sluthastighet på omkring 2-3 l/min [3]. När injekteringsmaterialet har slutat att absorberas ska trycket i injekteringsröret hållas konstant under en period på cirka 10 minuter. Under denna period kan det vara nödvändigt att fortsätta injekteringen vid den låga sluthastigheten 2-3 l/min för att underlätta filtrering av överskottsvatten och för att effektivt hålla trycket [3].

Under injekteringsarbetet registreras och plottas trycket och flödet från varje pump kontinuerligt. Varje pump injekterar endast ett borrhål. Detta krävs och är praxis för alla fall där en sammanhängande injekteringszon ska bildas. Kontinuerlig registrering inkluderar följande data: datum, tid, antal borrhål, manschetternas position, längd på sektionen som injekteras, sammansättningen på injekteringsmaterialet, resultat av vattentrycktester [3].

A.6 Injekteringsmaterial

Injekteringsmaterialets egenskaper ändras med tiden genom härdning från ett initialt flytande och pumpbart tillstånd till ett starkt och ogenomträngligt tillstånd. Flödesegenskaperna och varaktigheten för bearbetbarheten hos det flytande materialet kan varieras och optimeras genom att ändra sammansättningen. För suspensioner måste även hänsyn tas till sedimentering. Utvecklingen av injekteringsmaterial styrs av följande två principiella kriterier: (1) materialet måste utveckla största möjliga mekaniska styrka och (2) det måste vara pumpbart före den slutliga stabiliteten [2].

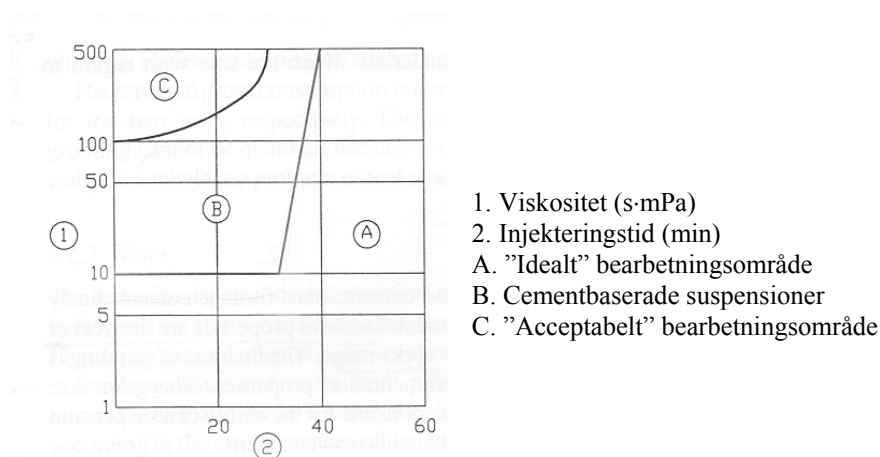
Under två förutsättningar kan bearbetbarheten för alla injekteringsmaterial definieras. Förutsättningarna är att flytgränsen inte överskrider ett maximum på cirka 50 Pa och att flödesförhållandena inte ändras väsentligt under pumptiden [3].

Mest lättbearbetade är material som initialt har en viskositet på mindre än 0,01 s·Pa [3]. En varaktighet av denna viskositet på cirka 30 minuter ger tillräckligt med tid för

injekteringsprocessen [3]. Därefter ska viskositeten hastigt stiga för att undvika att injekteringsmaterialet sprider sig utanför den önskade injekteringszonen till närliggande zoner av berg- eller jordmassor. Detta "ideala" beteende kan hänföras till de flesta kemiska injekteringsmixar (se Figur 10, fall A).

Alla cementbaserade suspensioner har en initial viskositet på mellan 0,01 och 0,1 s·Pa med ökande viskositet efter tillräcklig pumptid, d.v.s. 30 minuter eller mer (se Figur 10, fall B) [3].

Även material med en initial viskositet på mellan 0,1 och 0,5 s·Pa och som får en ökad viskositet efter tillräcklig pumptid är fullt möjliga att injektera [3]. Detta gäller för pastor och några specialmaterial som är baserade på harts eller skum (se Figur 10, fall C).



Figur 10. Injekteringstiden för injekteringsmaterial beroende på dess viskositet [3].

Figure 10. Working range for grout materials [3].

Cementbaserade suspensioner är de mest använda injekteringsmaterialen. Olika tillsatser används ofta för att ändra materialets egenskaper eller som fyllnadsmaterial för att reducera injekteringskostnaderna. Bentonit har använts som tillsats sedan 1950 för att erhålla förbättrade behandlingsegenskaper vid injektering av cementsuspensioner. Bentoniten förbättrar flödesegenskaperna, stabiliteten och homogeniteten hos injekteringsmaterialet.

Flygaska från kolförbränning i injekteringsmaterial

Flygaska är exempel på ett material som kan användas som utfyllnad i cementbaserade injekteringsblandningar för injektering. Viss erfarenhet finns även från injektering av ren flygaska som ersättning för cement. Ren flygaska är ett billigt injekteringsmaterial med låg styrka som är lämpligt för att fylla stora håligheter i marken eller i en deponi. Många blandningar med flygaska (från kolförbränning) och vatten bildar en slurry vid en vattenhalt på omkring 35 procent, men viskositeten är då för hög för att blandningen

ska kunna pumpas [1]. Vid en vattenhalt på 50 procent flyter dock flygaska/vattenblandningar vanligtvis lätt [1]. Förutsatt att överflödigt vatten som behövs för att pumpa injekteringsmaterialet kan rinna bort är det möjligt att erhålla material med en densitet som är mycket nära den som fås genom att pressa ihop flygaska med optimal vattenhalt. Data från tester med flygaska från kolförbränning som komprimerats vid optimal vattenhalt har visat att den självhårdande styrkan kan variera avsevärt, troligtvis beroende på mängden kalk som finns närvarande [1].

Vattenhalten i injekteringsmaterialet bör hållas till ett minimum som motsvarar flödeskraven eftersom överflödigt vatten för med sig en del kalk som rinner bort och därmed reducerar materialets självhårdande förmåga. Om det inte finns möjlighet för det överflödiga vattnet att rinna bort kan injekteringsmaterialet förbli mjukt under en lång tid. Under dessa förhållanden kan det därför vara motiverat att tillsätta cement till injekteringsmaterialet. Utan cement eller kalk som fungerar som bindare kan flygaskan krympa signifikant vid torkning [1].

Cement som injekteringsmaterial kan få förbättrade egenskaper genom tillsats av flygaska. Kalk som frigörs vid hydratisering av cement är väldigt känsligt för kemiska attacker och utgör endast ett litet eller inget bidrag till cementblandningens styrka. Flygaska, som har pozzolana egenskaper, binder däremot kalken så att ett stabilt cementliknande material bildas. Den kemiska reaktionen mellan flygaska och kalk ger upphov till starkare bindningar än mellan sand och cement i svaga cementinjekteringsmaterial. Den pozzolana aktiviteten hos flygaska kompenserar även för den reducerande styrka som vanligtvis förknippas med finkorninga fyllnadsmaterial [1].

Densiteten för kompakt injekteringsmaterial av flygaska från kolförbränning och cement är typiskt 1500-1800 kg/m³. För torr kolförbränningsflygaska är densiteten omkring 1000 kg/m³. Flygaska för injekteringssyften tillsätts dock vanligtvis i cementblandningar i en form med omkring 10-15 procent tillsatt vatten [1].

Partiklarna i flygaska från kolförbränning är till största delen sfäriska vilket ger flygaskbaserade injekteringsmaterial förhöjda flödesegenskaper. Detta betyder att mindre vatten måste tillsättas för att uppnå ett givet flöde jämfört med sand/cementinjekteringsmaterial. Vanligtvis är förhållanden vatten/fast material i injekteringsblandningar med flygaska och cement mellan 0:4 och 0:5 (beräknat på vikt) [1].

A.7 Kvalitetskontroll av injekteringszonen

Kontroll under injekteringsarbetet

Eftersom injekteringszonen befinner sig under marknivå är det inte möjligt att visuellt inspektera injekteringen under arbetets gång. För att kontrollera utförandeprocessen kan istället de data som registreras och plottas användas. Diagram indikerar om injekteringszonen utvecklas på rätt sätt eller inte. Till exempel indikerar en stadig ökning av trycket och samtidig en minskning av pumphastigheten att det inte

förekommer ”krackning” och att injekteringsmaterialet inte transporteras en oönskad väg genom vida sprickor utan att fyllning av små sprickor sker.

Ytterligare kontroll under injekteringsarbetet kan utföras genom geodetisk kartläggning av markytan. Meningen är att upptäcka oönskad deformation och höjning av markstrukturen. Även området utanför arbetszonen bör inspekteras visuellt för att upptäcka eventuellt läckage av injekteringsmaterial.

Kontroll efter injekteringen

Efter injekteringen kontrolleras vilka egenskaper som har uppnåtts i injekteringszonen och hur dessa relaterar till de uppställda kraven. Vid markstabilisering kan prover tas ut från injekteringszonen för mekaniska tester i laboratorium. Provtagningen görs genom kärnbörning. Erfarenheter har visat att kärnprov kan erhållas från nedåtgående borrhål under förutsättning att: (1) jorden är fri från grus, (2) styrkan är omkring 4 MPa och (3) kärnan är åtminstone 80 mm i diameter [3]. Dessa begränsningar gör att kontroll av stabiliserad mark oftast görs genom visuell inspektion av markytan och provtagning och testning i samband med utgrävningar. Prover som tas från injekteringszonen vid utgrävningar måste skyddas från stötar och vibrationer samt från uttorkning. Speciellt viktigt är detta för blockprover som är formade som kuber eller cylindrar. Oförsiktig behandling av proverna kan påverka testresultaten negativt.

Kubstorleken på proverna måste anpassas till jordens maximala kornstorlek. Generellt bör relationen mellan den maximala kornstorleken och kantsidan på kuben vara omkring 1:10 [3]. Mindre kuber återspeglar inte styrkan i den injekterade zonen korrekt. Fyra prover bör tas per 500 m³ injekterad mark [3].

A.8 Kemiska aspekter vid injektering i avfallsdeponier

Åldringsförloppet i en avfallsdeponi finns beskrivet bl.a. empiriskt i [5] och teoretiskt i [6]. Den sammantagna bilden är som följer.

Initialt finns det luft i porvolymen i hushållsavfall. Luftens innehåll av syre utnyttjas av bakterier som bryter ner organiskt material inklusive kolhydrater (bl.a. cellulosa), fett och proteiner (aerob fas). Nedbrytningen leder till en förurning vilket innebär att nedbrytningsprocesserna delvis ändrar karaktär (acidogen fas). När syret tagit slut leder den bakteriella nedbrytningen till att metan bildas (metanogen fas).

Avfallet innehåller svavel i form av proteiner (två av de essentiella aminosyror innehåller svavel) och gipsskivor (gips = kalciumsulfat). Under den metanogena fasen reduceras svavel till oxidationstal lägre än noll och bildar sulfider med de flesta tungmetaller.

Efter den metanogena fasen inträder den oxidativa fasen. Luftsyre tränger med tiden in i deponin och oxiderar det organiska materialet. Oxidationen innebär en kraftig ökning av surhetsgraden bl.a. genom att sulfiderna oxideras till sulfat.

I hushållsavfall varar de första två oxidativa faserna i bara upp till något år medan den metanogena fasen varar under minst flera decennier. Tidspunkten för övergången till den oxidativa fasen som kommer därefter beror av hur snabbt luftsyre kan ta sig in i deponin. Detta beror i sin tur på tät- och täcksiktets integritet och på porositeten i avfallet.

Om täcksikt och dess tätsikt är intakta och porositeten i avfallet låg kommer inträngningen att ta mycket lång tid, troligen väsentligt mer än 10 000 år. Detta är mycket gynnsamt ur utsläppssynpunkt eftersom de tungmetallsulfider som bildats i de flesta fall har en mycket låg löslighet i vatten. Dessutom innebär ju antagandet att tätsiktet är intakt att genomflödet av vatten är mycket litet.

Under den efterföljande oxidativa fasen sönderdelas tungmetallsulfiderna och det höga surhetsgraden innebär att många av dem övergår i löslig form.

Generellt sett så finns det ungefär dubbelt så mycket svavel i avfallet som behövs för att binda tungmetallerna. Det finns också en viss buffertkapacitet gentemot pH-sänkning. Samtidigt bör framhållas att det råder en stor osäkerhet om hur dessa processer kommer att gå till. Dessutom föreligger stora variationer i avfallet. Det finns därför behov av att utforma systemet på ett mera robust sätt med ordentliga marginaler vad gäller olika typer av kemisk buffertkapacitet.

Det största hotet mot den framtida integriteten i ett avfallsförvar är antagligen de differentiella sättningar som kan uppkomma i avfallet. De kan befaras föra med sig motsvarande sättningar i tätsiktet och täcksiktet. Tunna tätsikt med låg förmåga till plastisk deformation är därmed sårbara liksom täcksikt som innehåller material med otillräcklig mäktighet och inre friktion.

Injektering av flygaska i avfallet kan innebära viktiga fördelar i sammanhanget.

- 1 Utfyllnad av porvolym vilket innebär reducering av risken för differentiella sättningar i avfallet samt minskad hastighet för indiffusion av syre.
- 2 Ökning av avfallets innehåll av svavel så att överskott kan garanteras överallt i materialet. Under den metanogena fasen innebär detta att de flesta tungmetaller binds som svårlösliga sulfider.
- 3 Ökning av kalkvärdet i avfallet. Detta kalkvärde neutraliseras visserligen under nedbrytningsprocesserna genom att kalciumkarbonat bildas, men ger ändå upphov till en god buffertkapacitet gentemot sänkningar av pH till låga värden. Därmed kan betingelser som leder till snabb utlakning undvikas för många ämnen även efter den metanogena fasen.

Flygaskan bör väljas på ett sådant sätt att rökgasreningsprodukt med tillräcklig svavelhalt ingår. Askor från förbränning av torv eller andra bränslen med hög svavelhalt är speciellt intressanta.

Injekteringsmaterial av flygaska och vatten förväntas stelna i deponin inom loppet av några timmar till några dygn till följd av hydratiseringsreaktioner. Den hydratiserade

askan förväntas sedan reagera med den koldioxid som genereras i samband med nedbrytningen av hushållsavfallet. Denna karbonatisering bedöms leda till en fortsatt stabilisering av deponin.

B Utrustning för injektering

B.1 Bakgrundbeskrivning om funktionssätt för injekteringsutrustning

Injektering tillämpas för sinsemellan mycket olika ändamål (se bilaga A) vilket ställer mycket varierande krav på funktion hos utrustningen från fall till fall. Inför injekteringsarbetet på Tveta Återvinningsanläggning har en informationssökning och litteraturgenomgång [2], [3], [4], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18] gjorts på olika tekniker som liknar sådan som kan komma att bli aktuell för askor. Någon referens som handlar om injektering av aska i ett upplag av avfall har inte påträffats.

Den närmaste analogi som identifierats är injektering i mark (lågtrycksvarianten) samt vissa typer av gjutning med betong (t.ex. ”slabjacking” som kan användas för att justera nivå uppåt hos en redan utförd gjutning genom injektering i underliggande mark).

I motsvarighet till det relativt stora antalet olika tillämpningar finns det många typer av utrustning att välja mellan. Nedan beskrivs kortfattat endast sådana typer av utrustningar som kan vara aktuella att använda i samband med injektering med aska i en deponi.

Injektering kan vid första anblick förefalla enkelt men är vid närmare analys relativt komplicerat. Detta förstärks av att det oftast råder stor osäkerhet om porositet, sprickutbredning m.m. i den aktuella formationen.

För att en uppslamning skall kunna strömma genom en spricka krävs mycket ungefärligt att sprickvidden är minst cirka 5 gånger större än största kornstorlek. I annat fall utvecklas ett filter som snabbt ger ett mycket högt mottryck.

Vid en injektering önskar man trycka in material från ett antal punkter längs ett borrhål. Eftersom porositet, sprickförekomst och sprickvidd varierar starkt med läge kan förutsättning för intryckning av bruk variera kraftigt mellan olika punkter längs ett borrhål.

Vid en injektering motverkar man detta genom följande:

- 1 Avgränsa injekteringspunkten med manschetter (packers), d.v.s. uppblåsbara gummikuddar, på ömse sidor,
- 2 initialt lägga på ett förhållandevis högt tryck så att närzonen öppnas upp och
- 3 behålla flödet så att närzonen hålls öppen tills önskad mängd injekterats.

Att lägga på ett högt tryck initialt går bra eftersom det inte finns något flytande eller halvflytande material i den aktuella punkten vid det tillfälle när trycket läggs på.

I senare skeden är detta dock mindre lämpligt. Om trycket överstiger överlagringsstrycket (d.v.s. det tryck som ges av överliggande massor) kan instabilitet

uppstå och i värsta fall markytan ge sig så att utrustning och personal hamna i det slam som injekterats.

En god tumregel är därför enligt den genomgångna litteraturen att hålla sig under överlagringstrycket utom just vid öppningstillfället. I vissa fall kan detta tryck dock överskridas något och det finns tabeller med rekommendationer för olika grader av överstigande beroende i första hand på typen av aktuellt jordmaterial.

Dessa förutsättningar innebär för olika markförhållanden och för aktuella dimensioner på borrar och rör m.m. att initialt kan överlagringstrycket överstigas med kanske 20 bar och att ett lämpligt kontinuerligt flöde kan uppgå till storleksordningen 10 – 200 liter per minut beroende på markens beskaffenhet. Eftersom åldrat hushållsavfall har en hög porositet jämfört med de allra flesta typer av mark bedöms det kontinuerliga flödet i det aktuella fallet hållas vid 100 – 200 liter per minut.

När det gäller största kornstorlek är det inte ett tillräckligt villkor att det ingående pulverformiga materialet har tillräckligt fin kornstorlek. Det krävs också att det hålls torrt under lagringen så att det inte klumpar sig samt att det dispergeras med vattnet till ett homogent slam. För detta rekommenderas höghastighetsrotorer med ”piggar” som ger upphov till starka skjuvkrafter i slammet. Rotationshastigheterna ligger i området 200 – 2000 varv per minut.

Det aktuella askmaterialet har mycket starka klumpbildningstendenser när det utsätts för fukt. Detta hänger samman med det höga kalkvärdet.

Man skulle kanske kunna tänka sig att inträngningen blir bättre ju tunnare slammet är. Detta stämmer emellertid inte riktigt med erfarenheten. Ett alltför lågvisköst slam leder inte till någon spricköppning utan till att materialet strömmar vidare i de befintliga kanaler och hamnar långt från injekteringspunkten. I det aktuella fallet är huvudsyftet intransport av material vilket talar för att man bör eftersträva en hög slamhalt. Denna får dock inte vara alltför hög så att slammet blir för visköst och inte kan strömma in i aktuella kanaler och sprickor. Styrningen av slammets flytegenskaper redovisas i samband med laboratieförsöken i bilaga F.

Det finns två principiellt olika sätt att bereda slammet på: satsvis blandning och kontinuerlig blandning. Vid satsvis blandning tillsätts det fasta materialet till det flytande under omrörning. Blandningen sker i någon form av tank. Kontinuerlig blandning sker i en enhet till vilken vatten och fast material matas. Det fasta materialet tillförs normalt med skruvmatning. Blandningen erhålls genom att materialet under en viss transportsträcka behandlas av ett par ”knådare”. Processen kräver kontinuerlig övervakning men ger en god blandning och en hög homogenitet. Den används därför inte sällan för tillverkning av fabriksbetong, särskilt när hög kapacitet önskas.

Det finns två typer av pumpar som används för tillämpningar av aktuellt slag: skrupump och kolvump. En kolvump kan ge mycket högre tryck men drabbas mera av slitage. Samtidigt ger den en mera precis dosering.

Valet av typ av pump bedöms inte vara särskilt avgörande såvida inte annat än finkornigt material skall ingå. I sådana fall är skruvpumpen lämpligare.

Inte heller valet av slamberedningsteknik bedöms vara särskilt kritiskt. Det viktiga är egentligen att hela kedjan i processen har den kapacitet som erfordras. För den kontinuerliga blandningen bör man tänka på att blandaren normalt inte är utformad så att den skall utföra pumparbete också. (Det finns sådana blandare som pumpar också, men de som inte är utformade att göra det ger fel blandningsförhållanden om de tvingas arbeta mot ett tryck på utgångssidan). Ofta är det därför lämpligt att ha någon form av mellanbehållare mellan blandare och pump för att säkerställa konstanta tryckförhållanden över blandaren.

B.2 Utrustning för pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning

Före själva injekteringen påbörjades på Tveta Återvinningsanläggning hade ett antal stålrör slagits ner vertikalt i deponin, se bilaga G.2. Dessa hade en diameter på 32 mm och var av den typ som används för gasutvinning på deponier. Detta innebär att rören var försedda med hål i mantelytan för att medge inströmning av gas. Dessa hål utnyttjades för injekteringen. Entreprenaden utfördes av Södertälje Bro & Väg AB. De första rören som slogs ner hade en håldiameter som uppgick till 10 mm. Senare användes rör med en håldiameter på 20 mm.

Södertälje Bro & Väg AB var också huvudentreprenör för injekteringen vilken utfördes av Jan Källström och Kent Brantsberg vid Svensk Byggekraft med utrustning inhyrd från Hercules Grundläggning AB. Nedanstående uppgifter är lämnade från dessa personer [19]. Svensk Byggekraft har nu (april 2003) upphört med sin verksamhet och Kent Brantsberg arbetar nu i det egna företaget Byggmetoder Scandinavia AB.

För injekteringsarbetet användes följande utrustning:

- Pumpar
 - Putzmeister S5 EV med en blandningstank för cirka 80 liter per sats
 - Pumpplattform Willisch med en blandningstank för cirka 150 liter per sats
- Injekteringsmanschett Ø27 mm (med tryckpump för upplåsningen)
- Injekteringsslang Ø10 mm (används normalt för cement)
- Vattenslang
- Hinkar 10 liter (vatten)
- Hinkar 25 liter (aska)
- Spade

Arbetet utfördes i två omgångar med byte av utrustning mellan dessa. Först testades en utrustning med en pumpkapacitet på 4-23 liter per minut och en blandningstank för 80 liter per sats (Putzmeister S5 EV), se Figur 11. Det visade sig dock ganska snart att kapaciteten var för liten för att kunna injektera några hundra ton aska inom en rimlig tidsperiod. Dessutom uppstod problem med igensättningar i pumpen och slangen eftersom blandaren var för klen för att klumparna i askan skulle kunna slås sönder. Askan behövde därför siktas för hand till < 2 mm. Arbetet försvårades vidare av

väderleken med 1-10 minusgrader och måttliga till hårda vindar. Detta innebar att vattnet frös i slangar med mera trots att skyddsanordningar inrättats i form av ”tält” med varmvindsfläkt.



Figur 11. Utrustningen för cirka 80 liter som användes för injektering under de första injekteringsdagarna (Putzmeister S5 EV).

Figure 11. The equipment for about 80 litres that was used for grouting during the first days (Putzmeister S5 EV).

Utrustningen byttes ut efter ett par injekteringsdagar mot en större utrustning med en pumpkapacitet på 20-80 liter per minut och en blandningstank för 150 liter per sats (pumpplattform Willis), se Figur 12. Pumpens nominella kapacitet var emellertid inte tillgänglig för projektet eftersom den förutsatte säkringar i elnätet på 64 ampere medan de som fanns bara uppgick till 32 ampere. För att ändå kunna använda pumpen kopplades den om till lägre effekt vilket också sänkte kapaciteten. Pumpen hade också en ”högtryckskross” (d.v.s. högtrycksvattenjetstråle) för att slå sönder hårda klumpar och därmed behövde askan inte siktas till mindre än 9 mm.

Injekteringsslangen som användes för båda utrustningarna var en sådan som normalt används för injektering av cement med en diameter på 10 mm respektive 25 mm. Slangen var försedd med en injekteringsmanchett som i outhugget läge hade en diameter på 27 mm. Endast en manchett användes vilket gjorde att den ovan nämnda öppningseffekten endast erhöles i det djupaste läget. I de högre lägena gick det inte att åstadkomma en sådan tryckuppbyggnad eftersom injekteringen då utfördes över en större längd av röret. Det maximala trycket var satt till 20 bar och detta uppnåddes endast vid ett fåtal tillfällen och då p.g.a igensättningar i slangen.



Figur 12. Utrustningen för cirka 150 liter som användes under större delen av injekteringsarbetet (pumpplattform Willis).

Figure 12. The equipment for about 150 litres that was used for the main part of the grouting work (pump platform Willis).

Förutom utrustningen för själva injekteringen krävdes en vattentank på plats för att kunna blanda flygaska och vatten direkt i blandningstanken, se Figur 2. Vidare fanns ett aggregat för elförsörjning till injekteringsutrustningen samt belysning av injekteringsområdet.

B.3 Slutsatser för val av utrustning

Pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning visar att metodiken med injektering av slam berett av aska och vatten fungerar väl med konventionell utrustning och teknik i ett antal avseenden. På några punkter har emellertid inte tillräcklig kapacitet demonstrerats, och detta gäller i första hand flöde och möjlighet till kontinuerlig drift.

En genomgång av tillgänglig utrustning har visat att utrustning med högre kapacitet samt möjlighet till kontinuerligt arbete (t.ex. att man arbetar med två tankar för beredning av slam) finns tillgänglig. Vidare har framkommit att det finns ett alternativt sätt som också har en hög potential, nämligen att använda en borrhög med injekteringsborr med passande krona samt injektering samtidigt med att man borrar.

C Ekonomisk bedömning

Som framgår av övriga delar av rapporten har betingelserna under de pilotförsök som utförts på Tveta Återvinningsanläggning inte varit optimala. Detta beror dels på att försöken skedde under en besvärlig årstid och dels på problem med injekteringsutrustningen. Om aktuella prestanda för utrustningen och aktuella driftparametrar skulle ansättas så skulle kostnaden för injektering av aska i gammalt hushållsavfall sannolikt bli prohibitivt hög.

Ett lämpligare angreppssätt är därför att ange ett antal scenarier baserat på olika fiktiva förutsättningar och sedan utföra dimensionering, upprätta översiktliga system- och processbeskrivningar samt upprätta kostnadskalkyler.

En översiktlig genomgång av känslighet med avseende på olika parametrar av betydelse har gett som resultat att kostnaden styrs framförallt av det medelflöde av injekterings-slurry som kan injekteras i avfallet. Viss betydelse har också porositeten i avfallsupplaget och den fyllnadsgrad som kan erhållas eftersom dessa styr hur många meter injekteringsrör som behöver installeras och hur många hål och behövs.

Dessa ansatser har erhållits ur följande analys.

Enligt den informationssökning som gjorts [3], [11] beror inträngningen och flödet vid injektering till stor del av kornstorleken hos det uppslammade materialet. För injektering i mark används ett mycket finkornigt material. Mot denna bakgrund görs bedömningen att flödeshastigheter för injektering av aska i en avfallsdeponi kan uppnås vilka ligger i nivå med dem som rekommenderas för injektering i mark, d.v.s. 100–200 liter per minut. Detta flöde anges kunna upprätthållas även med den begränsning som ges av att injekteringstrycket normalt inte bör överstiga det s.k. överlagringstrycket (d.v.s. ”marktrycket”).

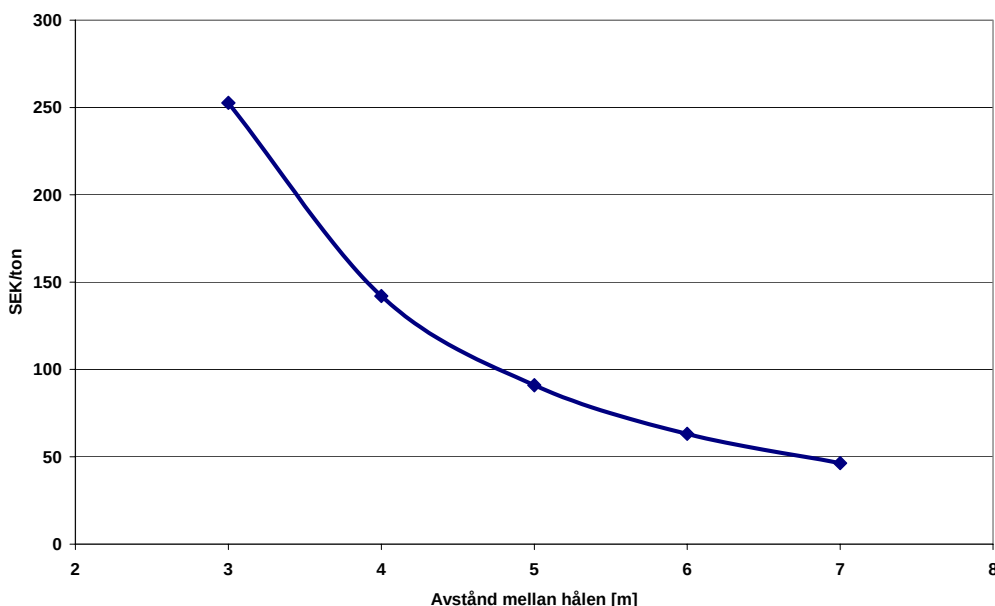
För injektering i en hushållsavfallsdeponi har två metodiker identifierats som bedöms ha en god prognos:

1. Injektering i perforerade foderrör med hjälp av konventionell injekteringsutrustning
2. Injektering under nedtryckning av icke-perforerat rör som återtas. Injekteringen sker i övrigt med hjälp av konventionell injekteringsutrustning

För metodik 1 sker alltså intryckningen av rören och injekteringen separerade från varandra medan detta sker i ett steg i metodik 2. Av dessa två alternativ har metodik 1 bedömts vara något dyrare eftersom injekteringshålen måste ”förborras” och väljs därför som referensmetod för kostnadsuppskattningarna nedan vilket är konservativt. Dessutom är kostnaderna lättare att uppskatta i detta fall eftersom liknande systemdelar finns i drift i dag.

Enligt uppgift från Södertälje Bro & Väg AB kostar intryckning av foderrör (vertikal orientering) cirka 500 SEK/meter. Med antagandet att injektering kan göras med ett

avstånd mellan foderrören på cirka 5 meter (dvs askan sprider sig fullständigt inom en radie på 2,5 meter) och att de tillgängliga hålrummen för askslurry i avfallsupplaget utgör 20 % blir den volym askslurry som teoretiskt kan injekteras cirka $3,9 \text{ m}^3$ per meter foderrör. Detta motsvarar cirka 5,5 ton askslurry ($\rho=1,4 \text{ ton/m}^3$). Kostnaden för intryckningen för foderrören blir således närmare 100 SEK/ton askslurry. Avståndet som krävs mellan injekteringshålen har emellertid en kraftig inverkan på kostnaden per ton injekteringsmaterial, se Figur 13. Även hur mycket aska som fås ner i varje rör har betydelse. Detta gör att osäkerheten kring den uppskattade kostnaden är stor.



Figur 13. Hur avståndet mellan injekteringshålen påverkas kostnaden för de perforerade rören.

Figure 13. How the distance between the grouting holes affects the cost for the perforated holes.

För tillredningen samt själva injekteringen antas process och utrustning utnyttjas enligt följande. Flygaskan tas ut för sig i pannanläggningen och hanteras och transporteras på samma sätt som cement och finmalen kalk, d.v.s. i slutna tankar samt överföring med tryckluft. Denna aska är naturligt mycket finkornig men eventuellt behöver den genomgå en enkel sållning i vilken eventuellt förekommande enstaka klumpar separeras bort. (Sådana kan bildas om vatten av någon anledning skulle nå askan). Blandningen av aska och vatten sker i en kontinuerlig blandare av samma typ som används för injektering och för tillredning av betong. Intryckningen av slurryn sker med hjälp av en skruppump som kan ge ett högsta tryck av cirka 20 bar. (Detta behövs eventuellt för att få i gång injekteringen genom att öppna upp sprickor i avfallet). Såväl blandare som pump har en högsta kapacitet på 200 liter per minut och en lägsta på omkring 20 liter per minut.

Med dessa förutsättningar blir kostnaderna enligt två tillfrågade källor i branschen cirka 15 000 SEK/dag för utrustningen och cirka 6 000 SEK/dag för bemanningen (ett skift med två personer antaget). Med en kapacitet på cirka 10 ton askslurry per timme innebär detta en kostnad på omkring 21 000 SEK per cirka 70 ton, d.v.s. cirka 300 SEK/ton. Det bör observeras att detta är en nettokostnad som inte innefattar etablering, kringoperationer med mera.

För ett inte alltför litet projekt ger ovanstående uppskattningar en totalkostnad som uppgår till cirka 400 SEK/ton askslurry (100 SEK/ton för intryckning av foderrör och 300 SEK/ton för injektering). Detta motsvarar drygt 800 SEK/ton torr flygaska.

Det bör noteras att kostnaden som uppskattats ovan skulle kunna reduceras t.ex. genom att utföra borrarbete och injektering i ett steg istället för att trycka ner perforerade rör innan injekteringen. Även införandet av två skift skulle sänka kostnaden avsevärt. Med dessa åtgärder är det troligtvis möjligt att halvera kostnaden och därmed komma ner till en kostnad i samma storleksordning som skattekostnaden för deponering, d.v.s. 370 SEK/ton torr aska.

C.1 Kostnader för pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning

Vid pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning skedde intryckningen av injekteringsrören i deponin och injekteringsarbetet separerade från varandra (enligt metodik 1 i avsnittet ovan). Nedan ges en kostnadsuppskattning enbart för injekteringen av askan med den utrustning som främst användes vid pilotförsöken, förutsatt en mer problemfri drift.

Den typ av utrustningen som främst användes vid pilotförsöken har en pumpkapacitet på 20-80 liter per minut och en blandningstank för 150 liter per sats. Bedömningen av denna utrustning är att maximalt 100 satser à 105 liter aska (cirka 126 kg askslurry per sats) kan injekteras under en arbetsdag, dvs cirka 12,5 ton [19]. Priset för hyran är cirka 1500-2000 SEK/dag [19]. För bemanningen (två personer som sköter driften och fyller på med aska och vatten i rätt proportioner i blandningstanken) tillkommer dessutom en kostnad på cirka 6000 SEK/dag [19]. Den totala kostnaden för injektering med denna typ av utrustning blir således cirka 600-640 SEK/ton askslurry.

Med antagandena ovan (12,5 ton askslurry per dag) skulle det ta 8 dagar att injektera 100 ton. Detta förutsätter dock en relativt problemfri drift, vilket kan vara svårt att uppnå för den aktuella tillämpningen. Vid pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning tog det cirka 20 dagar att injektera 100 ton askslurry.

Enligt kalkylen ovan är det betydligt billigare (och förmodligen mindre komplicerat) att använda en större injekteringsutrustning än den som användes i detta projekt. Injektering med en större utrustning (10 ton/h) beräknas kosta cirka 300 SEK/ton askslurry jämfört med cirka 600-640 SEK/ton askslurry för utrustningen med en kapacitet på maximalt 12,5 ton/dag (cirka 1,5-2 ton/h). Kostnaden för intryckning av perforerade foderrör (500 SEK/meter vilket antas motsvara omkring 100 SEK/ton askslurry) tillkommer i både fallen.

D Lämpliga askor – Tillgänglighet, ursprung och kemiska analyser

D.1 Askmängder i Sverige

I Sverige produceras varje år över 1 miljon ton askor och bidraget från olika branscher uppskattas till omkring [20]:

- 200 000-340 000 ton från energibranschen (exkl. avfallsförbränning)
- 447 000 ton från avfallsförbränning
- 275 000 ton från massa- och pappersindustrin
- 100 000 ton från den träbaserade industrin
- 50 000-100 000 ton från vedeldningen i småhus

Askor från olika kommunala värmeverk och skogsindustrier kan ha mycket varierande kvalitet. Olika typer av bränslen, förbränningsteknik och efterbehandling av askan ger stora variationer i bland annat löslighet, syraneutraliserande förmåga, näringsinnehåll och förekomst av metaller och andra miljögifter [21]. Även olika typer av aska, flygaska eller bottenaska, ger variationer i koncentrationer av olika ämnen och deras risk för utlakning. Askans ursprung är därmed av betydelse för miljöeffekterna vid olika tillämpningar eller deponering.

D.2 Lämpliga askor för injektering i en hushållsavfallsdeponi

För injektering i hushållsavfallsdeponier är det främst aktuellt att använda askor från förbränning av biobränslen som ej klassas som farligt avfall. Enligt EU-rådets direktiv 91/678/EEG klassas flygaska från hushållsavfallsförbränning som farligt avfall, vilket enligt direktiv 1999/31 medför att avfallet måste deponeras på upplag som skall möta de strängaste kraven [22]. Detta gör att denna typ av aska inte kan användas för injektering i en hushållsavfallsdeponi med lägre krav.

Sulfathaltig flygaska från träbränsleförbränning kan vara lämplig för tillämpningar på en avfallsdeponi eftersom svavel kan bidra till fastläggning av metaller genom bildning av metallsulfider. Sulfat har även en redoxbuffrande effekt som kan vara av intresse där deponigas bildas i en takt som gör den svår att samla in – redoxbuffring kan då styra nedbrytningen bort från metanbildning. Å andra sidan innehåller flygaska normalt högre halter av en del metaller (t.ex. Zn och Pb), jämfört med bottenaska, som kan lakas ut och bidra till en negativ miljöpåverkan. Den kemiska sammansättningen för den flygaska som främst använts för pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning redovisas närmare i bilaga D.4.

Förutom kemisk sammansättning i askan måste hänsyn tas till mekaniska egenskaper för att bestämma askans lämplighet som injekteringsmaterial i en avfallsdeponi. Dessa mekaniska egenskaper är t.ex. pumpbarhet med vatten, partikelstorlek, steltningsförlopp, solidifiering/stabiliseringsförmåga, viskositet och styvhet. I laboratorieförsöken i denna studie (se bilaga F) har olika askors reologiska och mekaniska egenskaper studerats och

jämförts med lämpliga data från tidigare erfarenheter av injektering (se bilaga F). De reologiska och mekaniska egenskaperna för lerbaserade injekteringsmaterial bör enligt tidigare studier ligga inom följande intervall: dynamisk viskositet 0,02-0,07 s·Pa och dynamisk skjuvspänning 50-200 Pa [2]. Med tanke på pumpbarheten går det normalt bra att med vanlig utrustning att pumpa vätskor med en viskositet på upp till cirka 0,8-1,0 s·Pa [3]. När det gäller flytgränser (dynamisk skjuvspänning) går det med vanlig utrustning att kontrollera dessa upp till cirka 50 Pa [3].

Hållfastheten för flygaska har i en tidigare studie [23] visat sig påverkas av den ursprungliga vattenhalten samt CaO-halten. Flygaskor med hög kvot mellan CaO-halt och utsprunglig vattenkvot har bra kapacitet att härda och kan ge höga hållfasthetsvärden utan tillsats av bindemedel som cement. Det är därmed önskvärt att i injekteringssammanhang utgå från en torr aska som inte befuktats. CaO-halten för den flygaska som främst använts för pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning redovisas i bilaga D.4.

Mer om tidigare erfarenheter från injektering och olika injekteringsmaterial beskrivs i bilaga A och laboratorieförsöken med aska som utförts i denna studie redovisas i bilaga F.

D.3 Försökaskornas ursprung

Askan som använts för pilotförsöken med injektering är främst flygaska samt en del blandad bottenaska som kommer från förbränning av biobränslen i Igelstaverket (Södertälje). Verket har tre pannor: en bubblande fluidbädd panna för eldning av fuktiga biobränslen, en rostpanna för i första hand eldning av olika fasta returbränslen samt en pulverpanna för eldning av torvbriketter. Rostpannan kan även eldas med flytande och pulveriserade bränslen. Den totala effekten för pannorna uppgår till 310 MW [24].

Igelstaverkets pannor används i olika utsträckning. Under november 2002, då aska främst togs från Igelstaverket för injekteringsarbetet på Tveta Återvinningsanläggning, eldades samtliga pannor med full last. I Tabell 2 visas vilka bränslen som eldades i de olika pannorna samt hur stor andel aska som bildades. Från panna 2 fås nästan enbart flygaska ut medan panna 1 genererar något större andel bottenaska än flygaska. För panna 3 är förhållandet mellan flyg- och bottenaska 7 till 3.

Tabell 2. Panntyp, bränslen och askbildning vid Igelstaverket under november 2002 [25].

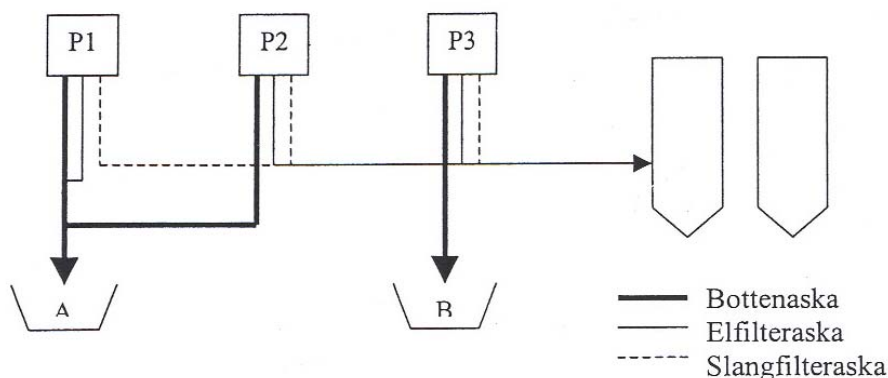
Table 2. Type of boiler, fuels and ash formation at Igelstaverket during November 2002 [25].

Nr	Typ av panna	Typ av bränsle	Mängd bränsle (ton/dygn)	Aska (%)
1	Rostpanna med snedrost	Bränslekross	500	~ 10
2	Pulverpanna	Torvbriketter	550	6-7
3	Fluidbäddpanna	85 % Returflis + 15 % Stycketorv	500	~ 4

Bränslekross innehåller kartong, papper, plast och trä. Returflis består av sorterat byggavfall och innehåller i huvudsak trä och spånskivor samt slipers.

De olika pannorna har separata rökgasreningslinjer bestående av system för reduktion av kväveoxider, elfiler, system för avsvavling samt spärrfilter. Elfiltet skiljer merparten av de stoftpartiklar som följer med rökgaserna efter förbränningen. Samtliga pannor är försedda med SNCR-system för icke-katalytisk reduktion av kväveoxiderna i rökgaserna. Svavelavskiljning sker i en svavelskrubber där kalkslurry sprayas in över rökgasen och svaveldioxiden reagerar med kalkslurryns kalciumjoner till kalciumsulfid¹. Särskilt torv, som eldas i pulverpannan, har en relativt hög svavelhalt.

De olika askfraktionerna vid Igelstaverket samlas upp i tre olika system (Figur 14).



Figur 14. Askuppsamlingssystemet vid Igelstaverket [24].

Figure 14. Collecting system for ash at Igelsta [24].

Systemet är uppbyggt enligt följande [24], [26]:

Två stycken silor tar emot

- slangfilteraska från samtliga tre pannor
- elfilteraska från pulverpannan (P2) och fluidbäddpannan (P3)
- svavelreningsprodukter från pulverpannan (P2)

En container tar emot

- bottenaska från rostpannan (P1) och pulverpannan (P2)
- elfilteraska från rostpannan (P1)

En annan container tar emot

- cyklonaska från fluidbäddpanna (P3)

I rostpannan och i den pulvereldade pannan faller bottenaskan ut i botten av pannorna. I fluidbäddpannan avskiljs däremot de tyngre partiklarna från rökgasen med hjälp av en cyklon. Denna aska behandlas separat och innehåller förutom askmaterial en hel del sand från fluidbädden [27].

För att undvika damning befuktas avsvälingsprodukterna och flygaskan med cirka 25 procent vatten innan den transporteras till deponering [27]. Både rökgasreningsprodukterna och bottenaskan från Igelstaverket transporteras till Tveta Återvinningsanläggning för deponering (Figur 15). Askorna klassas inte som farligt avfall.

Den aska som använts för injekteringen är främst flygaskan från de tre pannorna som samlas upp i silorna. Dessutom har en mindre mängd av den blandade bottenaskan från container A i Figur 14 använts. Laboratorieförsök och kemiska analyser har gjorts för ett flertal prover med olika ålder av båda dessa asktyper.



Figur 15. Askupplag på Tveta Återvinningsanläggning 2002-05-30. Den ljusa askan är flygaska medan den lilla högen med mörkare aska är blandad bottenaska.

Figure 15. Ash deposit at Tveta waste recycling center (Tveta Återvinningsanläggning) 2002-05-30. The light coloured ash is fly ash and the dark coloured ash is mixed bottom ash.

D.4 Analyser av försöksaskorna

I olika steg av projektet har undersökningar gjorts med lite olika askor: de första laborietesterna gjordes på flyg- och blandaska från Igelstaverket som provtogs i slutet av år 2000 och början av 2001 för ett tidigare projekt [24]; senare laborationstester inkl. de reologiska undersökningar gjordes efter provtagning i juni 2002 med askor som har lagrats olika länge på Tveta Återvinningsanläggning och slutligen utfördes injekteringen och efterföljande reologitester med askor som var tillgängliga på Tveta Återvinningsanläggning under hösten 2002.

De olika askorna som togs prov på under 2002 inom detta projekt är listade nedan. Samtliga prover skickades till Analytica i Luleå för kemisk analys. För laboratieförsöken som redovisas i bilaga F har följande askor från provtagningen i juni 2002 använts och analyserats:

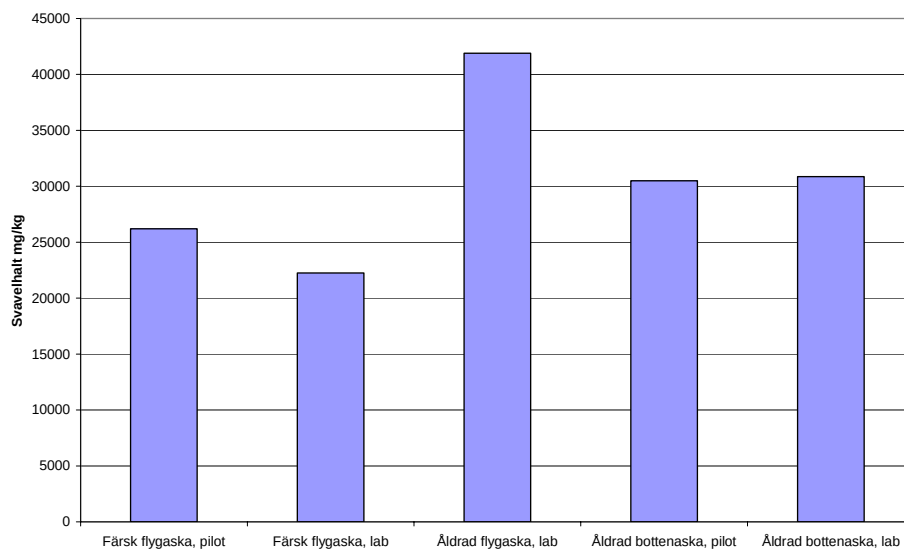
- Färsk flygaska (cirka 1 månad gammal, prov A i bilaga F.2)
- Åldrad flygaska (över 1 år gammal, prov E i bilaga F.2)
- Åldrad bottenaska (över 1 år gammal) (prov B, C, D i bilaga F.2)

och för injekteringen i pilotförsöken har följande askor från provtagningen i november 2002 använts och analyserats:

- Färsk flygaska (mindre än 1 månad gammal)
- Åldrad bottenaska (cirka 1 år gammal)

Analysresultat

Fastläggning av tungmetaller i deponier kan påverkas på ett positivt sätt genom att den kemiska miljön påverkas. Askor från förbränning av träbaserade bränslen med hög halt av sulfater kan ha god potential att bilda en miljö som håller kvar tungmetaller. I Figur 16 visas svavelhalten (medelvärde) i de ovan nämnda askorna som använts i laboratorie- och pilotförsöken.



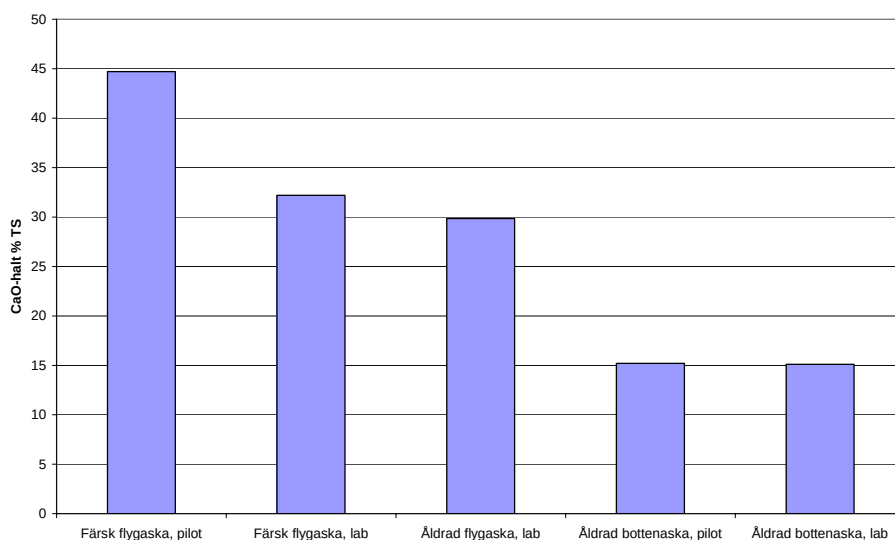
Figur 16. Svavelhalten i de fem askor som använts vid laboratorie- och pilotförsöken.

Figure 16. The sulphur content in five ashes used for the laboratory and pilot experiments.

Svavelhalten i askorna ligger mellan 22 och 42 g/kg. Den lägsta halten återfinns i en färsk flygaska medan den högsta halten återfinns i en åldrad flygaska. Variationerna mellan askorna beror främst på vilka bränslen som har eldats. Svavelhalterna i den

aktuella askan är betydligt högre än normalt förekommande halter i vanlig jord. Enligt uppgifter internationell litteratur innehåller jord vanligtvis 30-10000 ppm svavel [28].

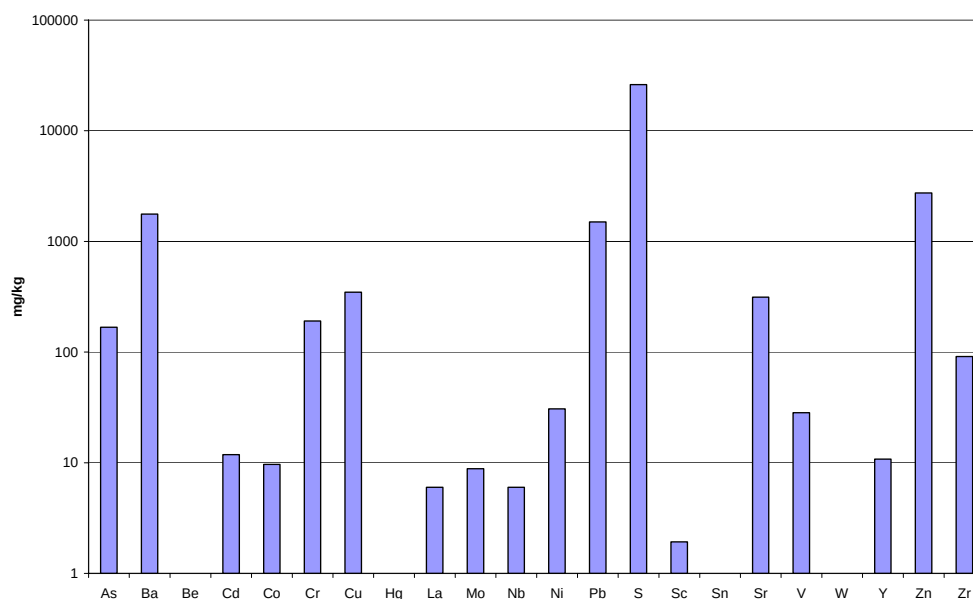
Askan som injekteras i en deponi bör stelna för att kunna bidra till en ökad stabilitet. För att erhålla bra härdningsförmåga och höga hållfasthetsvärden är det bland annat önskvärt att askan har en hög CaO-halt [23]. I Figur 17 visas CaO-halten (medelvärde) i askorna som använts i laboratorie- och pilotförsöken. Flygaskorna har en högre CaO-halt jämfört med bottenaskorna.



Figur 17. CaO-halten i de fem askor som använts vid laboratorie- och pilotförsöken.

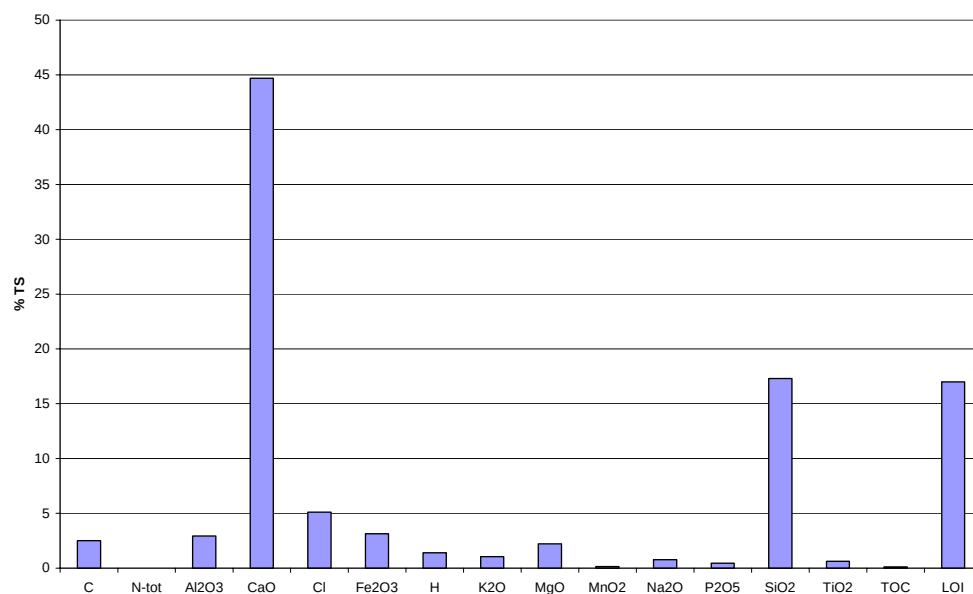
Figure 17. The CaO content in five ashes used for the laboratory and pilot experiments.

I pilotförsöken injekterades nästan enbart färsk flygaska. I Figur 18 och Figur 19 visas analysresultaten från ett prov taget på aska under injekteringsarbetet. TS-halten i flygaskan uppmättes till omkring 73 %.



Figur 18. Kemisk analys av spårämnen (mg/kg) i den färska flygaska som främst injekterades i pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning.

Figure 18. Chemical analysis of trace elements (mg/kg) in the fresh fly ash that was grouted during the pilot experiments at Tveta waste recycling center.



Figur 19. Kemisk analys samt LOI (% TS) för den färska flygaska som främst injekterades i pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning.

Figure 19. Chemical analysis and LOI (% TS) in the fresh fly ash that was grouted during the pilot experiments at Tveta waste recycling center.

Multivariat utvärdering av de kemiska analyserna av undersökta askor

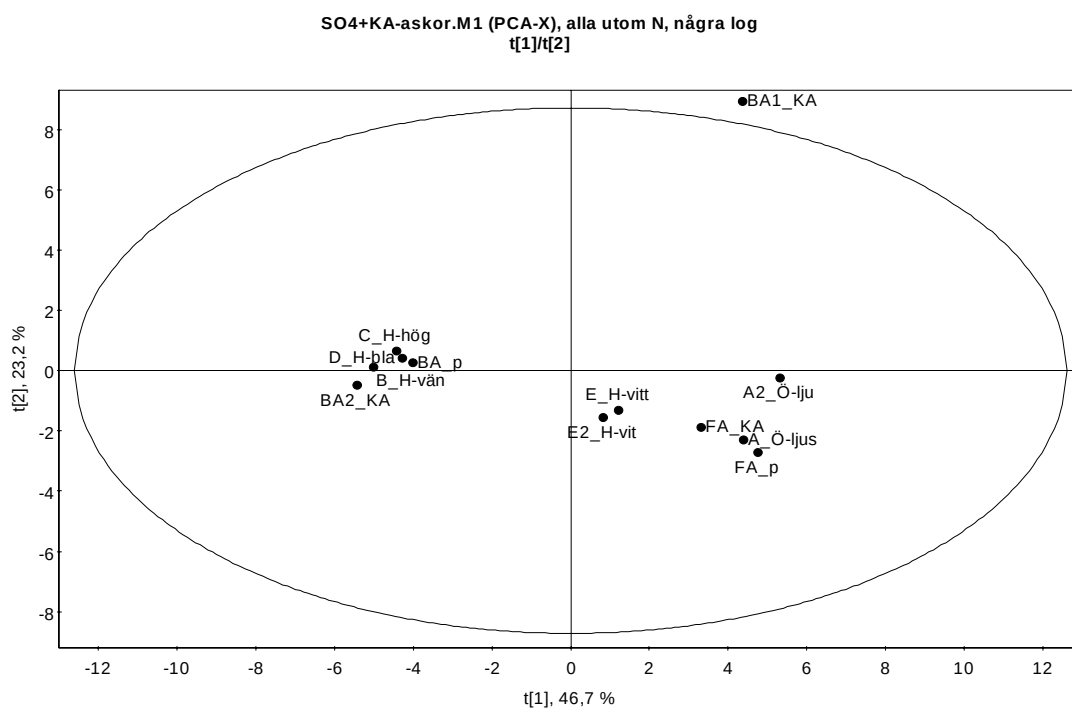
De olika askorna som analyserats avseende kemisk sammansättning liknar till stor del varandra eftersom de kommer från samma förbränningsanläggning. Det finns dock skillnader i bränslesammansättning och drift eftersom åldern varierar.

För att kunna utvärdera analysresultaten på ett effektivt sätt gjordes en principalkomponentanalys (PCA). Resultatet i form av observations- och variabelplot (eng. score- och loadingplot) för första och andra komponenten visas i Figur 20 och Figur 21.

Förklaring till analyserade material:

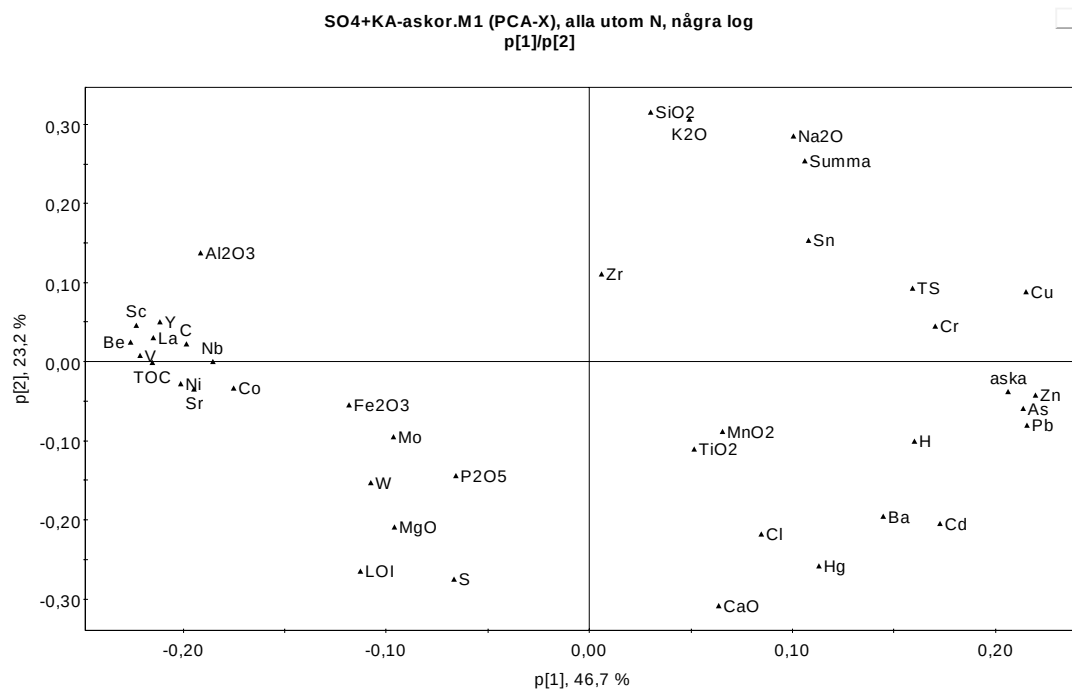
..._KA	står för askor som fanns kvar på Luleå tekniska universitet från tidigare arbete [24].
FA_KA	Flygaska som samlades in direkt vid kraftvärmeverket Igelsta. Ur en förvaringssilo togs tre stickprov på 100 liter ut med två respektive tre dagars mellanrum.
BA1_KA	Prov på siktad blandaska från Telge Återvinnings askdeponi som har legat där i hög under ca 11 månader. Prov togs från fraktionen < 60 mm (300 l).
BA2_KA	Andra prov på blandaska som var mer kompakt än den första och hade sintrat ihop till stora block. Krossades i en käftkross och siktades till < 5,6 mm. Denna aska användes inte till några försök för att strukturen var fortfarande mycket grov och det var inte tänkt att använda något "ihopsintrat" material vid injekteringsförsök.
A_Ö-ljus (färsk flygaska)	} prover från Tveta Återvinningsanläggning, juni 2002.
B_H-vänster (åldrad bottenaska)	
C_H-höger (åldrad bottenaska)	
D_H-bland (åldrad bottenaska)	
E_H-vitträd (åldrad flygaska)	
A2_Ö-ljus	} prover av respektive material från augusti 2002.
E2_H-vitträd	
FA_p (färsk flygaska)	} prover på pilotförsöksaskor, från november 2002.
BA_p (åldrad bottenaska)	

Askornas ursprung visas i Figur 14 i bilaga D.3.



Figur 20. Scoreplot av PCA för de undersökta askorna

Figure 20. Scoreplot of the PCA for the tested ashes



Figur 21. Loadingplot av PCA för de undersökta askorna

Figure 21. Loadingplot of the PCA for the tested ashes

Som Figur 20 visar grupperas flygaskorna i en grupp och bottenaskorna i en annan. Varje grupp är väl samlad, vilket betyder att de har liknande egenskaper. Faktorena bakom askornas fördelning i scoreplotten visas i loadingplotten, Figur 21. På högra sidan avbildas storheter som är relativt sett höga i de observationer som ligger på högra sidan i scoreplotten. Zn, As och Pb är typiska exempel för metaller som går i rökgasen och som därmed återfinns i flygaska. Askhalten och även TS-halten är hög i flygaskor. Storheterna på vänstra sidan i loadingplotten är relativt sett låga i flygaska och högre i bottenaska.

Den åldrade flygaska H_vittrad ligger på samma sida som flygaskorna dock förskjuten mot bland- respektive bottenaskorna.

Blandaska BA1 som också undersöktes i laboratorietesterna avvek från detta mönster. I loadingplotten (Figur 21) finns det med SiO_2 , K_2O och Na_2O en förklaring som stämmer överens med karakteriseringen av materialet som sandigt i andra försök (se bilaga F). Materialets höga salthalter gör att det placeras på samma sida som flygaskorna. Vid provtagningen år 2001 levererades inga rena fraktioner av varken flyg- eller bottenaska från Igelstaverket till Tveta Återvinningsanläggning. Det var därför flygaskan togs direkt på förbränningsanläggningen och alla andra material betecknas som blandaskor. I fallet BA 1 kan det vara möjligt att den innehöll sand från fluidbäddpannan på Igelstaverket.

Ur den multivariata analysen av alla undersökta askor kan dras följande slutsatser: materialen som undersöktes i förväg i laboratorium är representativa för de senare injekterade askorna. Blandaska BA1 som visade avvikande beteende kan också p.g.a. PC-analysen särskiljas. Andra askor kan efter kemisk analys infogas i datamatriisen och därigenom kan deras lämplighet för injekteringen bedömas.

E Beskrivning av Tveta Återvinningsanläggning

E.1 Allmän beskrivning av Tveta Återvinningsanläggning

Nedan ges en beskrivning av Tveta Återvinningsanläggning där Telge Återvinning AB bedriver all sin verksamhet. Uppgifterna är hämtade ur Telge Återvinnings miljörapport för 2002 [29] samt från Gustav Tham, VD på Telge Återvinning.

Historik

Tveta är centralt belägen mellan Södertälje, Nykvarn och Järna och började användas på 60-talet huvudsakligen som industritipp. Brännbart eldades öppet och kvar blev i huvudsak en deponi med inert material. I mitten på 70-talet tog den gamla deponin vid Hall slut och kommunen övertog Tveta och började ta emot hushållsavfall. Avfallet blandades med industriellt avfall bestående av trä, plast, wellpapp, skrot mm. Någon egentlig utsortering började inte förrän i början på 90-talet, då plockmaskiner sorterade ut främst metallskrot och andra stora komponenter för återvinning såsom spisar, tumlare m.m.

När materialet deponerats har avfallet packats med en kompaktor som dels trycker ihop avfallet dels sönderdelar materialet för att uppnå så stor täthet som möjligt. Avfallet täcktes samtidigt med material såsom gjuterisand, havreskal m.m. för att förhindra nedskräpning i omgivningen.

God kompaktering av avfallet innebar en syrefri miljö varvid anaerob nedbrytning påbörjades och metangas bildades. 1992 påbörjades arbetet med att samla in gasen dels från vertikalt borrarade brunnar dels från horisontella dräner som lades på några meters djup. Gasen överförs till panncentralen i Järna via en 7 km lång gasledning och sörjer för uppvärmning av ca 1500 bostäder. Gassystemet har kompletterats under åren alltefter som nya sopor lagts på deponi och täcker idag drygt 50% av Järnas behov. Under sommaren kan även gasen nyttiggöras vid Cerealias fabrik (tidigare Kungsörnen) i Järna.

Under drygt 25 år har ungefär 500 000 ton hushållsavfall tillförts deponin. Till detta kommer lika mycket verksamhetsavfall inklusive mellantäckningsmaterial.

Källsortering av hushållsavfall infördes i Södertälje och Nykvarns kommuner under 2001 varför hushållsdeponin nu håller på att sluttäckas.

Geologiska och hydrologiska förhållanden samt näromgivning

Tveta Återvinningsanläggning är belägen i ett höjdområde 40-90 meter över havet. Deponin, som ligger i en dalgång, har ett största djup på 25-30 meter. Området underlagras av ett relativt mäktigt lerlager och tät morän. Dominerande bergarter är gnejsgranit och sedimentgnejs med låg vattengenomsläpplighet. Svaghetszoner förekommer i berggrunden. Dessa zoner - spricksystem - har kartlagts liksom vattenavrinningen i området.

En vattendelare ligger ostsydost om deponin och området avvattnas i västlig riktning genom ett dike norr om anläggningen (Lerhagadiket). Omfattande mark- och vattenundersökningar har gjorts under åren för att kartlägga vattenflöden och anläggningens eventuella påverkan på omgivande miljö. Under de senaste fem åren har flera omfattande undersökningar gjorts för att spåra eventuella läckage till omgivningen.

I Figur 22 visas ett flygfoto över Tveta Återvinningsanläggning. Närmaste boende finns i lantbruksfastigheter ca 350 m norr om anläggningen och i ett sportstugeområde ca 500 meter öster om densamma. I övrigt är området glest befolkat med stora skogsområden som dominerande inslag.



Figur 22. Översiktsbild för Tveta Återvinningsanläggning.

Figure 22. Overview of Tveta waste recycling center (Tveta Återvinningsanläggning).

Lakvattenhantering

Det lakvatten som bildas samlas upp i ett antal brunnar belägna runt om anläggningen. I brunnarna finns pumpar som överför lakvattnet till en central damm – lakvattendammen. Pumpning sker kontinuerligt och regleras genom nivåvippor som styr när pumparna startar och stänger. Pumpstationerna har placerats i sådana geografiska lägen att maximal effekt uppnås. Pumparnas läge ger en effektiv avsänkningstratt för att förhindra ett utflöde av lakvatten från området.

Lakvattnet pumpas sedan vidare till Himmerfjärdsverket, totalt 34 200 m³ under 2002. Övervakningssystem finns för detektion av läckage på lakvattenledningen via ett larmsystem till kontoret på Tveta. Inga läckage på lakvattenledningen påvisade eller indikerades under 2002.

E.2 Beskrivning av injekteringsområdet på deponin

Avfallsdeponin i det område där injekteringen utförts innehåller en blandning av hushållsavfall och industriavfall (trä, plast mm), generellt i förhållandet en tredjedel hushållsavfall och två tredjedelar industriavfall. Avfall har deponerats i området under det senaste året. Det är alltså relativt färsk sopor från 2001 och 2002.

De 2-3 översta metrarna består enbart av industriavfall. Ner till nio meters djup är avfallet maximalt cirka två år gammalt och ej källsorterat. Vid var tredje meter finns ett 0,1-0,5 meter tjockt lager med gjuterisand. Avfallsdeponin har kompakterats kontinuerligt. Vid tolv meters djup finns rör nedgrävda för insamling av metangas.

Avfallets styckestorlek i injekteringsområdet är i regel under 0,5 meter men plast och andra föremål kan ge större styckefall. Rent generellt är huvuddelen av avfallet i mindre stycken genom att kompaktorn krossar avfallet och trycker ihop det.

I samband med injekteringsarbetet mättes temperaturen i de flesta av injekteringshålerna vid 3, 6 och 9 meters djup. Detta redovisas i Tabell 3. Resultatet visar att temperaturen nere i deponin under 6 meters djup är över 50 °C.

Tabell 3. Temperaturer uppmätta i injekteringshålerna före injekteringen.

Table 3. Temperatures in the grouting holes before the grouting.

Hål	9 meters djup [°C]	6 meters djup[°C]	3 meters djup[°C]
2	56	38	30
3	53	50	36
5	57	57	53
6	54	50	45
7	51	51	26
8	51	50	36
12	56	51	46
13	54	50	48
14	56	52	46

I Figur 23 visas en bild från utgrävningarna i injekteringsområdet på deponin ner till cirka 6 meters djup. Vid cirka 3-4 meters djup kan en tydlig gräns ses där materialet i deponin byter karaktär. I den undre delen är materialet till största delen mörkt och jordliktande, vilket indikerar att den biologiska processen har kommit igång. Detta avfall innehåller mer organiskt material (matavfall) än det övre skiktet beroende på att hushållsavfall källsorteras sedan 2002 och behandlas på annan plats. Det övre skiktet är således mer versamhetsavfall från företag då den organiska delen (matavfallet) har minskat.

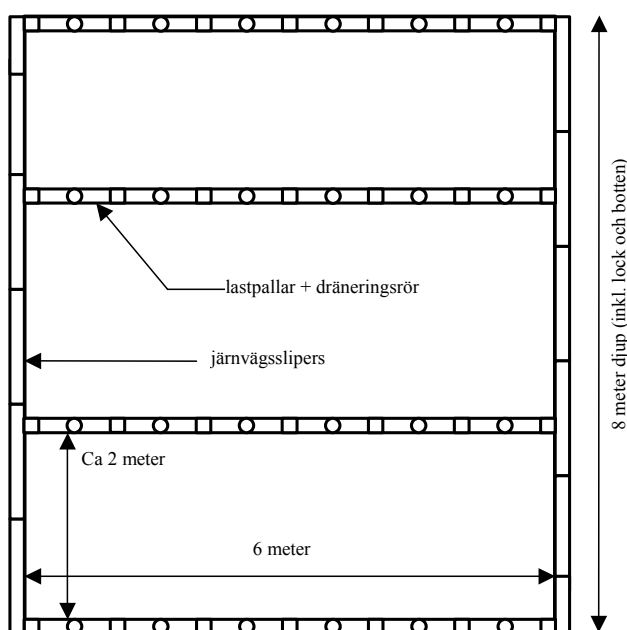


Figur 23. Deponin i genomskärning ner till 6 meters djup. Innehållet i deponin är en blandning av hushålls- och industriavfall. De översta metrarna består enbart av industriavfall.

Figure 23. A cutting section of the landfill down to a depth of 6 meters. The content in the landfill is a mixture of household waste and industrial waste. The first meters from the top consist of industrial waste only.

E.3 Beskrivning av testcellerna

På Tveta Återvinnings avfallsanläggning finns tre stycken tätade s.k. testceller med avgränsad storlek och definierat innehåll. Dessa konstruerades i samband med tidigare studier 1995. Principutformningen av respektive cell i genomskärning framgår av Figur 24.



Figur 24. Genomskärning av en testcell. Varje cell har en area på cirka 6*6 meter och ett djup på 8 meter, d.v.s. en total volym på närmare 300 m³.

Figure 24. A cutting section of a test cell. Each cell has an area of 6*6 meters and a depth of 8 meters, i.e. a total volume of almost 300 m³.

De tre cellerna är således cirka 7 år gamla och har vardera en volym på närmare 300 m³. Innehållet är organiskt avfall (matavfall), brännbart avfall respektive restavfall. Ungefärlig total vikt för avfallet i respektive cell är 250 ton för cellen med organiskt avfall, 100 ton för cellen med brännbart avfall och 150 ton för cellen med restavfall.

Uppmätta temperaturer i injekteringshålarna i testcellerna före injekteringen redovisas i Tabell 4.

Tabell 4. Temperaturer uppmätta i testcellerna före injekteringen.

Table 4. Temperatures in the test cells before the grouting.

Testcell	3 meters djup [°C]	6 meters djup[°C]
Organiskt avfall	20	21
Brännbart avfall	25	30
Restavfall	23	24

Figur 25 visas testcellen med organiskt avfall ner till cirka 4 meters djup där aska injekterats under pilotförsöken.



Figur 25. Testcell med organiskt avfall på Tveta Återvinningsanläggning där injektering skedde under pilotförsöken.

Figure 25. Test cell with organic waste at Tveta waste recycling center where the grouting took place during the pilot experiments.

F Laboratorieförsök

F.1 Utvärdering av experiment med stelning och härdning av olika blandningar av flygaska (FA), blandaska (BA) och vatten, steg 1

Allmänt

Askan skall injekteras i form av ett slam ("grout") bestående av aska och vatten. Detta slam skall ha följande egenskaper:

1. Direkt efter blandningen och en viss tid framöver skall det vara pumpbart för att kunna hanteras under själva injektering.
2. Efter att ha injekterats i deponin bör askan stelna för att kunna bidra till deponins mekaniska stabilitet.

Målet med försöken (steg 1) är att undersöka härdningsegenskaperna hos olika askblandningar med speciell fokus på härdningstiden.

Använda askor

I försöken användes material som fanns på Luleå tekniska universitet sedan tidigare:

- en torr flygaska (FA 1 (= FA_KA i bilaga D4); ur en av silorna på Igelsta Värmeverk; blandning av rökgasreningsprodukt, slang- och elfilteraska) och
- en blandaska (BA 1 (= BA_KA i bilaga D4); från Tvetaverket, lagrad på deponin under ca 10-11 månader, siktad).

För närmare beskrivning se [24].

Preliminära försök (förförsök)

Ett antal enkla tester genomfördes initialt, t ex mättes fältkapacitet och stelningförsök gjordes med en "ren" flygaska och en "ren" blandaska vid olika vattenhalter. En testserie av flygaskans härdningsegenskaper vid olika vattenhalter och temperaturer utförd av en kollega [30] redovisas också i det här avsnittet.

Härdning av askor vid olika vattenhalter

Blandaska

Prover av blandaskan BA 1 blandades med vatten i blandningsförhållanden 12-44 %, se Tabell 5. Mixad avser en blandning av askor från olika tunnor, framställd av Karin Arvidsson i samband med hennes examensarbete [24]. Torrsubstanshalten TS i askan var 94 % av våtvikt (v.v.) och vatteninnehållet är medtaget i vattenhaltsberäkningarna.

Tabell 5. Översikt över blandningarna av blandaska (BA) med vatten; vattenhalter.

Table 5. Overview for the mixtures of mixed ash (BA) and water; content of water.

Beteckning	Mängd aska [g vid 94 % TS]	Vattenhalt [% v.v.]
BA < 4 mm; mixad; a)	42	12
– ” – b)	42	19
– ” – c)	100	23
– ” – d)	100	28
– ” – e)	100	33
– ” – f)	100	41
– ” – g)	100	44
BA5 < 20mm; ej mixad	92	18
BA6 < 20 mm; ej mixad	100	17

Vid vattenhalter fr.o.m. 28 % blev blandningarna icke homogena, d.v.s. vattnet blandades inte fullständigt in utan blev stående på ytan (se också avsnittet om fältkapacitet nedan).

Bägarna täcktes med plastfolie (Parafilm) för att vattnet inte skulle avdunsta. Blandningarna rördes om två ggr om dagen med glasstav.

Även efter 21 dagar, när försöket avslutades, var omrörning (med glasstav) fullt möjlig och ingen härdning kunde observeras.

Slutsats: Materialet (Blandaska 1) som har legat på deponin under en längre period har ingen märkbar härdningsförmåga under försökstiden. Obs! Materialet verkar inte kunna jämföras med de prover som togs på Tveta Återvinningsanläggning i juni 2002 (bilaga F.2) inför injekteringsförsöken i pilotskala. Strukturen av det undersökta materialet är finkornig-sandig, färgen brun och det påminner mest om bottenaska.

Flygaska

Parallellt med försöken som beskrivits under för blandaskan ovan testades flygaskan i blandningar enligt Tabell 6. TS-halten i askan var 97 % av våtvikt (v.v.) och vatteninnehållet är medtaget i vattenhaltsberäkningarna.

Tabell 6. Blandningar av flygaska (FA 1) med vatten; vattenhalter.

Table 6. Mixtures of fly ash (FA) and water; content of water.

Beteckning	Mängd aska [g vid 97 % TS]	Vattenhalt [% v.v.]
FA a)	26,5	53
FA b)	46,2	52

Blandningarna verkade vara homogena. Efter två-tre dygn hade de stelnat. Materialet kunde dock smulas sönder med en glasstav.

Olsson och Todorović [30] har även undersökt flygaskans härdningsförmåga. De testade kombinationer av faktorerna vattenhalt, temperatur och tid i vardera tre nivåer, se Tabell 7. De blandade proverna fylldes i cylindrar och komprimerades med hjälp av en tung

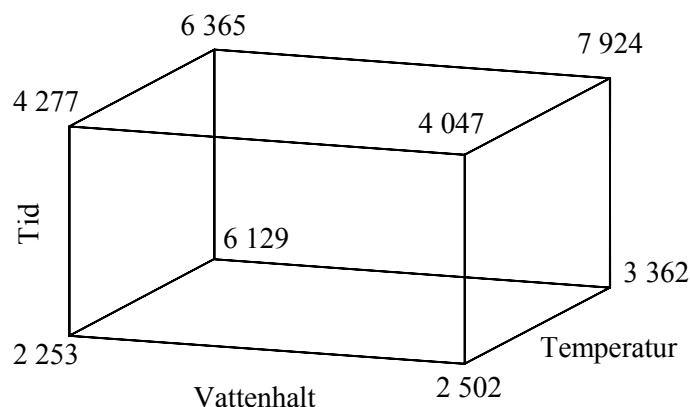
kolv. Efter de valda tiderna testades härdningen (respektive hårdhet) genom enaxligt kompressionstest.

Tabell 7. Faktorer och nivåer för att testa flygaskans härdningsförmåga [30].

Table 7. Factors and levels to test the hardening capacity of the fly ash [30].

Faktor	låg	Nivå medel	hög
Vattenhalt [% v.v.]	25	30	35
Temperatur [°C]	20	60	100
Tid [d]	1	14	29

Proverna kunde belastas med mellan 1,1 och 8,2 MN/m², i medel 4,5 MN/m², före brott. Högsta hållfastheten uppstod vid höga värden av alla tre faktorer. De prover som uppvisade högst hållfasthet för övrigt hade dock alla en låg nivå av faktorn vattenhalt. Därför kan det förstnämnda resultatet misstänkas vara en anomali. Resultaten visas i Figur 26.



Figur 26. Kubdiagram över hållfastheten [kN/m²] vid de olika kombinationerna av faktorerna.

Figure 26. Cube diagram for the strength [kN/m²] at different combinations of the factors.

Med ytterligare statistisk utvärdering kom författarna fram till att högsta hållfastheten väntas vid 31 % vattenhalt och höga nivåer för temperatur och tid.

Slutsats: Flygaskan i blandning med vatten härdar redan efter kort tid (här: 1 dygn) och vid låga temperaturer (här: rumstemperatur 20°C). Högre hårdhet uppnås vid mindre vattenhalt och vid höga temperaturer och längre tid.

Blandning av flyg- och blandaska

Två blandningar av flyg- och blandaska (FA 1 och BA 1) tillverkades ungefär i förhållande 50/50 % med avseende på vikt (A) och volym (B). Mängder och vattenhalter redovisas i Tabell 8.

Tabell 8. Blandningar av flyg- och blandaskan i förhållande 50/50 % angående vikt och volym liksom andel flygaskan på viktsbasis och vattenhalt (VH).

Table 8. Mixtures of fly ash and mixed ash in the proportion 50/50 % concerning weight and volume; the percentage of fly ash based on weight; and the water content (VH).

	FA [g]	FA TS [g]	BA [g]	BA TS [g]	andel FA (vikt-%)	Vatten [g]	VH [% v.v.]
Blandning A	100	97	100	94	51	91	31
Blandning B	100	97	256	240	29	104	23

Vid första kontrollen efter 2 timmar var det redan omöjligt att röra om med en glasstav. Vid nästa kontroll efter 2 dygn var proverna uttorkade, fast vid utsköljning av bågarna kunde de smulas sönder med vatten.

Slutsats: Blandningar med andelar flygaska av cirka 30 respektive 50 vikt-% och låga vattenhalter (23 respektive 30 %) börjar stelna inom mycket kort tid (< 2 timmar). Det är sannolikt att högre vattenhalter eller också lägre andel flygaska kan leda till långsammare stelning. Blandningen med 51 % FA verkade hårdare och finare p.g.a. den högre andelen flygaska; skillnaden kvantifierades dock inte.

Fältkapacitet

Fältkapaciteten kan beskrivas som den mängd (andel) vatten som kan hållas av provmaterialet mot tyngdkraften. Allt fritt vatten har dränerat bort. Ovanför fältkapaciteten skiljs vatten från fastmaterialet (askan) om blandningen inte hålls i rörelse.

Fältkapacitet bestämdes för blandaskan BA 1 i fyra parallella försök, se Tabell 9.

Tabell 9. Observerade fältkapaciteter hos blandaska (BA 1).

Table 9. Observed field capacities for mixed ash (BA 1).

Prov	BA [g]	BA TS [g]	Tillsatt vatten [g]	Perkolat [g]	Vattenhalt [% v.v.]
1	40,6	38,3	40	28,2	27,0
2	60,3	56,8	36	19,3	26,2
3	80,7	76,0	45	22,9	26,0
4	70,5	66,5	40	20,6	26,0

Den genomsnittliga fältkapaciteten låg vid 26,3 %. Det stämmer bra överens med vattenhalter som under 3.1.1 observerades leda till ojämna blandningar.

För flygaskan genomfördes inte den analysen eftersom den hårdar så fort. Olsson och Todorović [30] noterade dock att 35 % v.v. är ungefär den mängd vatten som flygaskan kan hålla (mot tyngdkraften).

Slutsats: Fältkapaciteten ligger vid ungefär 26 respektive 35 % för bland- respektive flygaska. Dessa vattenhalter kan betraktas som lägsta nivåer för fortsatta försök med att framställa pumpbara blandningar.

Härdning av askblandningar

Härdningsförmågan av olika askblandningar (flygaska och blandaska BA 1) undersöktes med variationer av faktorerna andel flygaska, vattenhalt och tid enligt Tabell 10. Varje försök utfördes i triplikat. Blandningarna tillverkades av 200-250 g torr askblandning och vatten i bägare och fylldes sedan i provcylindrar (höjd 7 cm, diameter invändig 5 cm). Ingen kompaktering gjordes förutom en lätt skakning och knackande på väggen med en sked. Under uthärdningstiden stod proverna otäckta i ett dragskåp vid rumstemperatur (ca 20 °C) vilket betyder att överflödigt vatten kunde avdunsta.

Tabell 10. Faktorer och nivåer för att testa askblandningarnas härdningsförmåga.

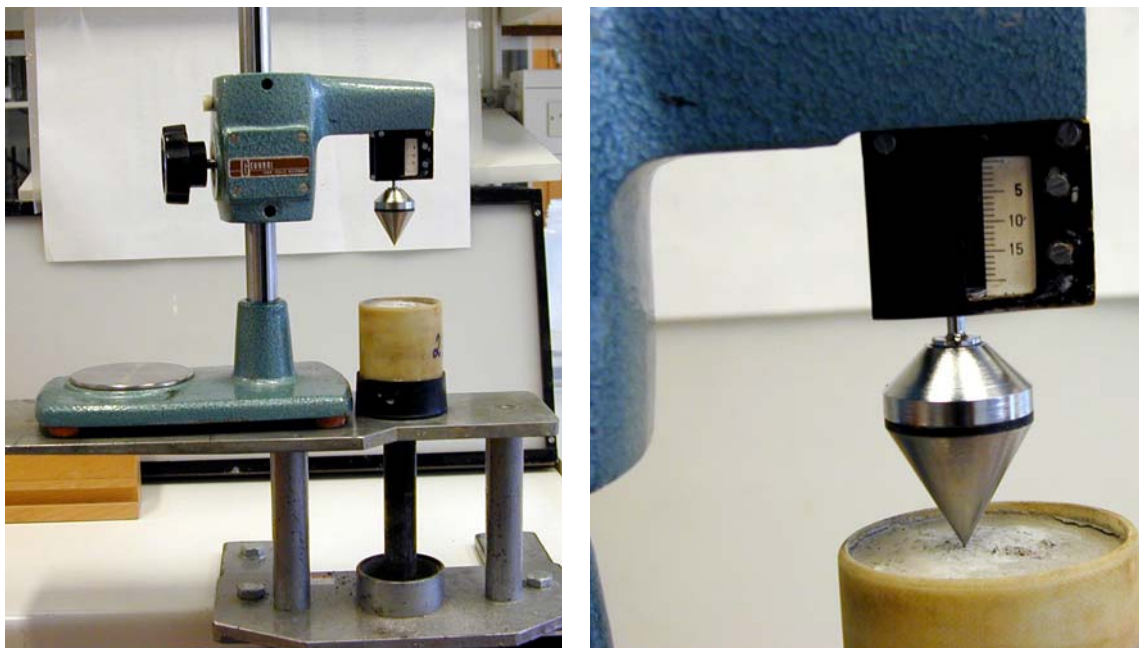
Table 10. Factors and levels to test the hardening capacity of the ash mixtures.

Faktor	Nivå		
	låg	medel	hög
Andel flygaska [%]	10	25	40
Vattenhalt [% v.v.]	25	31	38
Tid [d]	1	5	10

Alla prover förutom de med den högsta andelen flygaska och mindre än 35 % vattenhalt var inhomogena d.v.s. vattnet blandades inte fullständigt in utan blev stående på ytan. Det gjorde det svårt (omöjligt) att överföra blandningarna till cylindrarna utan att förändra vattenhalten. Detta resulterade i en stor variation mellan parallella försök (variationskoefficient 6-140 %, 46 % i genomsnitt).

Hårdheten testades med hjälp av fallkonförsök enligt SS 02 71 25. Figur 27 visar testapparaturen och ett exempel. Konen positioneras på provens yta och släpps sedan genom att urkoppla en magnet. Djupet på konens intryck i proven avläses på en graderad skala (0 till 20 mm). Eftersom provernas hårdhet var mycket olika gjordes testerna med två olika koner: den ena vägde 400 g och hade 30° spetsvinkel; den andra vägde 60 g och hade 60° spetsvinkel. Resultaten är sammanfattade i Figur 28.

Det vatten som initialt stod över provytorna avdunstade på 0-3 dygn.



Figur 27. Fallkonapparat med kon 60 g/60° och prov 23 (10 % FA, 25 % VH, 10 d).

Figure 27. Fall-cone-apparatus with cone 60 g/60° and sample 23 (10 % FA, 25 % VH, 10 d).

Figur 28 visar hur de olika faktorerna påverkar hårdheten och vilka av faktorkombinationerna som ger höga respektive låga värden. Figuren visar resultaten från testerna med kon 400 g/30°. Dessa mätningarna gav tydligare skillnader även om det inte gick att använda denna kon för proverna med höga vattenhalter efter ett dygn (den sjönk mer än 20 mm in i provmaterialet). Å andra sidan sjönk 60 g/60°-konen väldigt lite respektive inte alls in i proverna efter fem respektive tio dygn.

Hårdheten beräknas utgående från konintrycket i fallkonförsöken som skjuvhållfasthet enligt ekvation 1 [SS 02 71 25].

$$\tau = K \cdot g \cdot m/i^2 \quad (1)$$

där

τ = odränerad skjuvhållfasthet hos ostörd (τ_{fu}) eller omrörd (τ_R) jord [kPa]

K = konstant, som huvudsakligen beror på konens spetsvinkel β

K = 1,00 för koner med 30° spetsvinkel

K = 0,25 för koner med 60° spetsvinkel

g = acceleration vid fritt fall [m/s^2]

m = konens massa [g]

i = konintryck [mm].

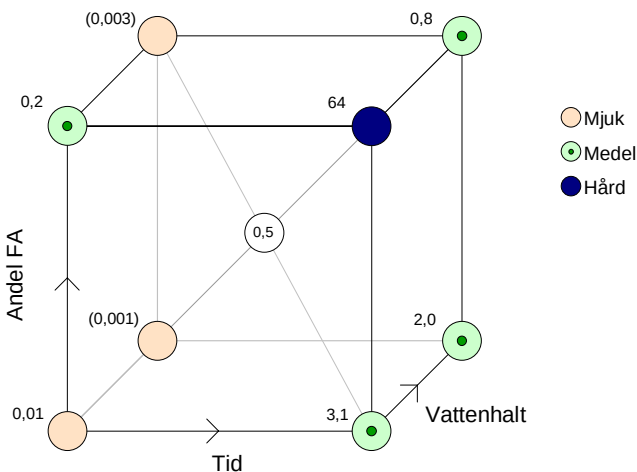
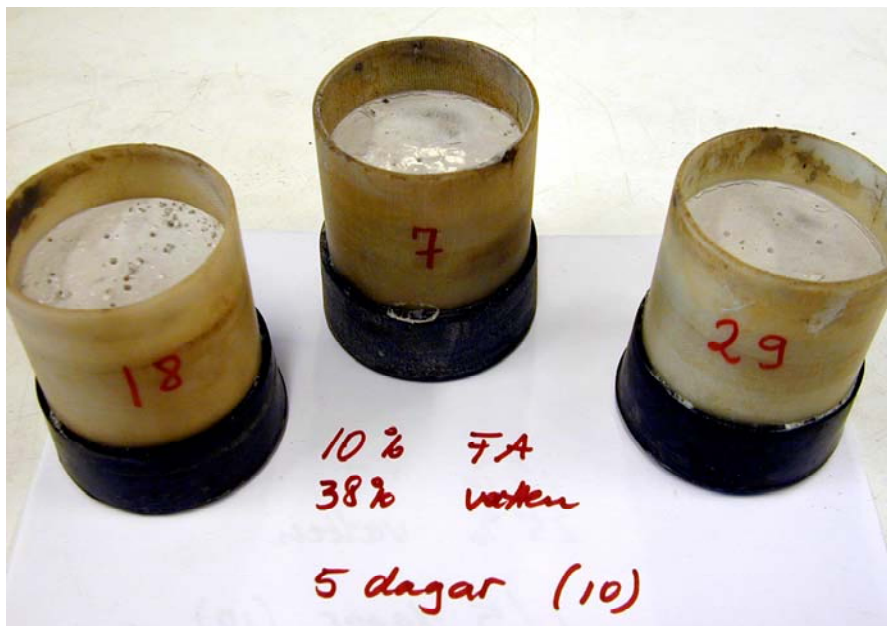


Figure 28. Cube diagram for the hardness (shear strength [MPa]) in fall-cone test with cone 400 g/30°. In parenthesis the results with a cone 60 g/60°.

Högsta hårdhet inom de här undersökta intervallen uppnås med kombinationen hög andel flygaska (40 %), låg vattenhalt (25 %) och lång tid (10 d). Kombinationen av 40 % flygaska och 25 % vattenhalt hade högsta hårdhet (ca 0,2 respektive 3 MPa) även efter ett och fem dygn.

Vid några enstaka konförsök i provernas inre (efter 1-2 cm av provet hade bortskurits från ytan) visade det sig att konen sjönk ungefär två till tre gånger djupare än på ytan. Konsistensen var oftast smulig.



Figur 29. Prover med 10 % flygaska och 38 % vatten efter 5 dagar.

Figure 29. Samples with 10 % fly ash and 38 % water after 5 days.

Slutsats: Alla undersökta blandningar härdade inom ett till fem dygn och i samband med att överflödigt vatten kunde avdunsta. Mest homogena blandningarna uppnåddes vid höga halter flygaska dock bara upp till ungefär 38 % vattenhalt.

För injektering i stor skala på en deponi betyder det att ask-vatten-slammet kommer att stelna, dock inte för fort så att ingen risk för utrustningen måste befaras. Inne i deponin härdar materialet; p.g.a. den vattenångmättade atmosfären kan det dock vara svårare för vattnet att avdunsta. Å andra sidan är temperaturen högre inom en deponi och koldioxid i deponigasen bidrar till härdningen genom hydratiserings- och karbonatiseringsreaktioner.

F.2 Härdning av askorna från Tveta Återvinningsanläggning

Askor från provtagning på Tveta Återvinningsanläggning i början av juni 2002 har undersökts med avseende på deras härdningsförmåga (askornas ursprung framgår i bilaga D.3). Undersökningen gjordes med materialet < 1,12 mm som erhållits genom siktning och krossning (se bilaga F.3 om siktning). Provbeteckningarna i Tabell 11 står för följande typer av askor:

- A = färsk flygaska (cirka 1 månad gammal)
- B, C, D = åldrad bottenaska (över 1 år gammal)
- E = åldrad flygaska (över 1 år gammal)

För att jämföra resultaten med tidigare experiment (se bilaga F.1) siktades också ett prov av flygaskan (FA 1) och blandaska (BA 1) och undersöktes på samma sätt.

100 g av varje prov vägdes in i en bägare och blandades med vatten under omrörning tills det blev ett homogent slam. Mängderna och resulterande vattenhalter (initiala fukthalter är inräknade) redovisas i Tabell 11.

Tabell 11. Mängder, torrsvikt, vattentillsats och vattenhalt av askproverna till härdningsförsök i kornstorleksfraktion < 1,12 mm.

Table 11. Amount, dry weight, added water and water content of the ash samples for hardening tests in the fraction < 1,12 mm.

Prov	Vikt [g]	Torrsvikt [g]	Vatten [g]	Vattenhalt [%]
A (Ö ljus 020604)	100	83	42	47
B (H vänster 020604)	100	72	58	67
C (H höger 020604)	100	71	52	66
D (H bland 020604)	100	74	60	65
E (H vittr 020604)	100	65	31	68
Flygaska FA 1	100	100	94	48
Blandaska BA 1	100	100	33	25

Blandningarna blev nästan homogena, bara hos askorna B, C och D bildades lite vatten på provernas yta. Vattenhalterna i Tabell 11 kan alltså anses indikera den undre gränsen för att erhålla en pumpbar blandning. Eftersom konsistensen fortfarande var tjock och i bästa fall trögflytande, väntas dock vattenhalterna i pumpbara blandningarna ligga högre. Proverna täcktes med plastfolie och förvarades i ett dragskåp vid rumstemperatur (ca 20°C). Omrörning skedde med glasstavar i tidsintervall som i anges Tabell 12. Eftersom ingen initial härdning inträdde togs plasten bort efter 40 timmar.

Tabell 12. Observationer angående blandbarhet efter olika tidsintervaller [timmar, h].

Table 12. Observations concerning the miscibility after different time intervals [hours, h].

Prov	1 h	2 h	16 h	40 h (folie bort)	48 h	65 h och längre
Aska A	lätt	lätt	lätt	lätt	svårare	inte möjligt
Aska B	svårt i början	lite svårare, lättare efter ett tag	lättare än förra gång	som förra gång	svårt	- " -
Aska C	- " -	- " -	- " -	- " -	- " -	- " -
Aska D	- " -	- " -	- " -	- " -	- " -	- " -
Aska E	lätt	lätt	lätt	lätt	svårare	- " -
Flygaska FA 1	medel	medel	medel	svårare	svårare	- " -
Blandaska BA 1	lätt	lätt	lätt	lätt	lätt	lätt

Ingen härdning respektive stelning observerades så länge vattnet inte kunde avdunsta. Askorna B-D bildade i början ett ganska fast sediment som dock blev mjukare efter att vattnet på ytan hade blandats in igen. BA 1 kan beskrivas likna sand som inte påverkades av vatteninblandningen.

Efter att de täckande plastfolierna hade tagits bort torkade proverna och blev hårdare. Det gick inte längre att röra om dem och deformationerna blev kvar (plastisk karaktär). Proverna tycktes dock inte ha hög skjuv- eller draghållfasthet eftersom det gick relativt lätt att bryta loss bitar och att smula sönder dem.

Experimentet avslutades efter 78 timmar. Då hade askorna härdat ytterligare och askorna A, E och FA var inte längre möjliga att deformera med glasstav utan att använda den som en slags stöt. Aska E verkade t.o.m. hårdare än aska A, vilket motsäger observationerna vid provtagningen där A karakteriserades som färskare (Ö (övre/ohärdad) ljus) än askorna B, C och D (hårdade) och aska E (vittrad). På ytan av aska E hade det bildats ett vitt skikt vilket kan bero på oxidationsprocesser av calcium eller sulfider.

Slutsats: Askor som har legat på deponi har mindre självhärtningsförmåga än den tidigare [24] undersökta flygaskan FA som kom direkt från Igelstaverket. Askorna A och E beter sig dock mycket likt flygaskan FA. De äldre askorna B-D sedimenterade mycket fort och blev hårda genom detta, men det verkade inte finnas lika mycket kemiskt orsakad härdning som i askorna A, E och FA.

F.3 Siktning av askor från Tveta Återvinningsanläggning

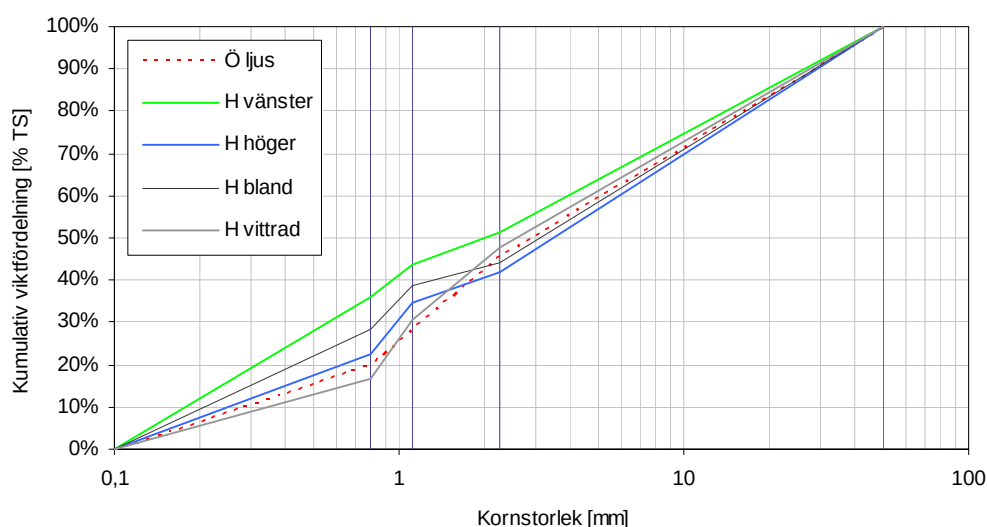
Siktning av originalmaterialet

Askorna från provtagningen på Tveta Återvinningsanläggning i början av juni 2002 (för ursprung se bilaga D.3) siktades direkt efter de hade kommit till Luleå tekniska universitet. Målet med siktningen var att få fram en fin fraktion som skulle kunna användas för injekteringsförsök, dock bidrog siktningen också till materialkaraktäriseringen. En kornstorlek på ca 1 mm antogs behövas för att få ett pumpbart slam och vara möjligt att sikta fram även i stor skala. Materialet siktades till en början i fyra klasser: > 2,24 mm, 2,24 - 1,12 mm, 1,12 - 0,8 mm och < 0,8 mm, varav den sistnämnda togs bort senare. Beteckningen och siktade mängder redovisas i Tabell 13, siktkurvor visar Figur 30.

Tabell 13. Beteckning, vikt och andel < 0,8 mm av de siktade askproverna.

Table 13. Name, weight and part < 0.8 mm of the sieved ash samples.

Prov	Vikt [kg]	Torrsvikt [g TS]	Andel < 0,8 mm [% TS]
Aska A (Ö ljus 020604)	2,78	2,23	20
Aska B (H vänster 020604)	2,95	2,10	36
Aska C (H höger 020604)	3,64	2,57	22
Aska D (H bland 020604)	3,40	2,49	29
Aska E (H vittr 020604)	4,22	2,74	17



Figur 30. Kornstorleksfördelning för askorna från Tveta Återvinning före krossning.

Figure 30. Grain size distribution for the ashes from Tveta waste recycling before crushing.

Mindre än 50 % av proverna var < 2,24 mm. Andelen finmaterial < 0,8 mm låg i genomsnitt vid 25 % (av torrsvikt). Askorna B (H vänster), C (H höger) och D (H bland) har större andelar finmaterial än askorna A (Ö ljus) och E (H vittr). Siktcurvan för H bland ligger mellan kurvorna för H höger och H vänster.

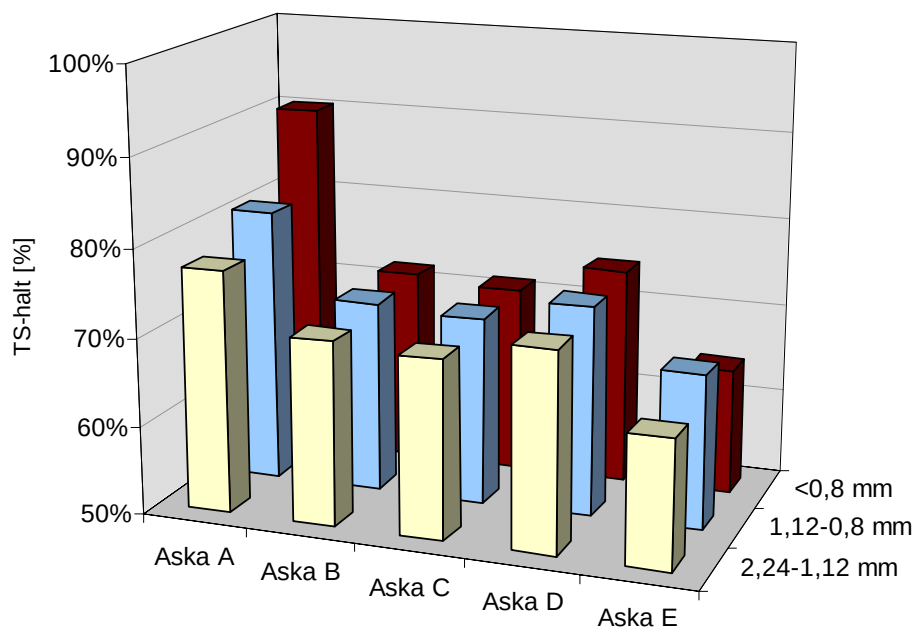
TS-halt av det siktade materialet

TS-halten bestämdes efter den första siktningen, se Tabell 14 och Figur 31.

Tabell 14. TS-halt av siktade askproverna.

Table 14. Content of dry substance in the sieved ash samples.

Prov	2,24 - 1,12 mm	1,12 - 0,8 mm	< 0,8 mm
Aska A	77 %	81 %	90 %
Aska B	71 %	72 %	72 %
Aska C	70 %	71 %	71 %
Aska D	73 %	74 %	75 %
Aska E	65 %	68 %	64 %



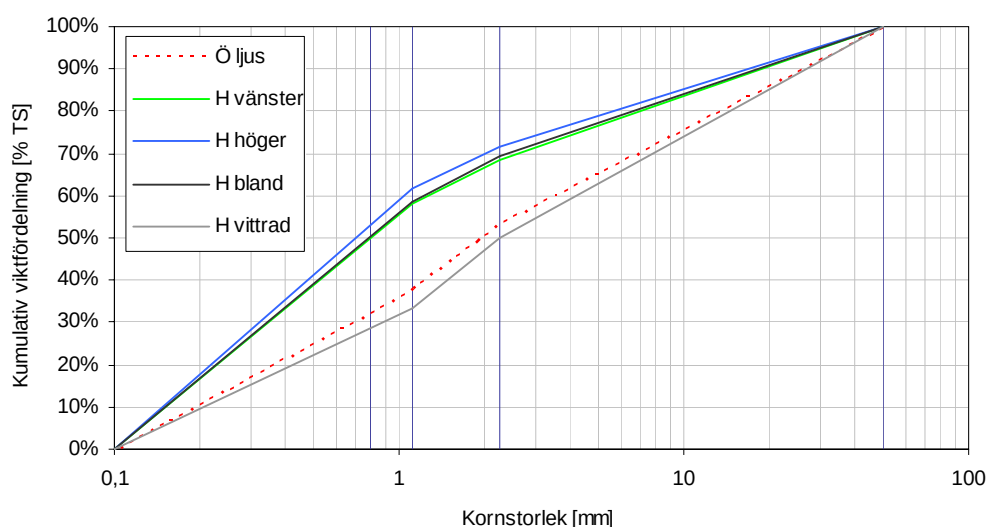
Figur 31. Torrsubstanshalt i askorna från Tveta Återvinningsanläggning i olika kornstorleksklasser.

Figure 31. Content of dry material in the ashes from Tveta waste recycling center in different grain sizes.

Förutom i aska A (Ö ljus) var TS-halten mycket jämn över de undersökta kornstorleksklasserna. Askorna H höger (B) och H vänster (C) hade ungefär samma TS-halt. Att TS-halten i blandningen av dessa två (D) är högre kan inte förklaras. Standardavvikelse av de tredubbla TS-analyserna var för alla prover mycket låg: 0,01-0,5 % av medelvärdet.

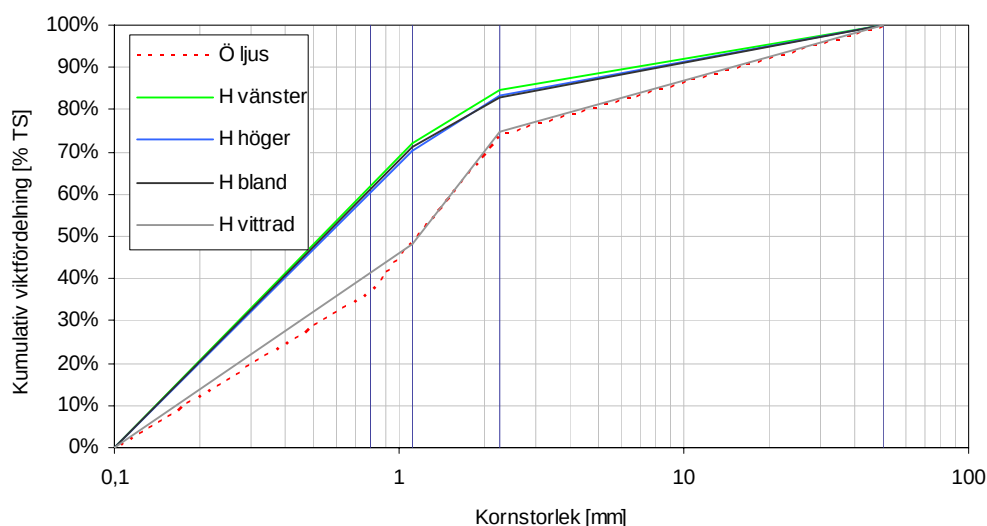
Krossning och andra siktning

Eftersom andelen fint material var låg för alla askor, krossades materialet i en käftkross. Det krossade materialet siktades igen (Figur 32) och blandades sedan med det tidigare siktade (Figur 33). Av det material < 1,12 mm var i det krossade materialet av aska A (Ö ljus) bara 17 % större än 0,8 mm (d.v.s. i klass 1,12-0,8 mm). Därför togs 0,8-mm-sikten bort vid siktningen av askorna B-E och bara summan av allt material < 1,12 mm bestämdes.



Figur 32. Kornstorleksfördelning för de krossade askorna från Tveta Återvinningsanläggning.

Figure 32. Grain size distribution for the crushed ashes from Tveta waste recycling center.



Figur 33. Kornstorleksfördelning för askorna från Tveta Återvinning efter krossning och blandning med siktat material före krossning.

Figure 33. Grain size distribution for the ashes from Tveta waste recycling after crushing and mixing with sieved material before crushing.

Andelen finmaterial < 8 mm höjdes betydligt genom krossningen: från 25 % i medeltal upp till ungefär 60 % för askorna B-D och 40 % för askorna A och E. I det krossade (och blandade) material syns det en tydlig likhet av askorna B, C och D. Kurvan för aska D (blandning av B och C) ligger mellan kurvorna för askorna B och C. Askorna A och E visar också en stor likhet som förstärkts genom krossningen. Likheterna i materialen bekräftades också genom kemiska analyserna, se bilaga D.4.

Slutsats: Undersökningen av askor som har legat på deponi visar att andelen finmaterial som kan erhållas genom siktning är begränsad: bara ca 30 % (torrvikt) är mindre än 1 mm, ca 70 % är mindre än 10 mm. Genom krossning kan andelen < 1 mm höjas till ungefär 60 %. Jämfört med tidigare analyser av ren flygaska [24] är materialet som har legat på deponi mycket grovkornigt. Den tidigare studerade flygaskan var då till 100 % mindre än 0,1 mm.

F.4 Densitet för olika askor

Densiteten av materialen bestämdes för att kunna uppskatta mängderna respektive volym av askorna till injekteringen.

En 10 cm hög provcylindrar med 5 cm i diameter (invändig; vilket motsvarar en volym av 196,35 cm³) fylldes fullständigt med flygaska (FA) respektive blandaska (BA 1). Ingen kompaktering gjordes, bara en lätt skakning och knackning på väggen med en sked. TS-halterna av askorna var 97 % för flygaskan och 94 % för blandaskan (se bilaga F.1). Resultaten visas i Tabell 15.

Tabell 15. Densitet av flygaska (FA) och blandaska (BA).

Table 15. Density of fly ash (FA) and mixed ash (BA).

Prov	Vikt [g]	TS [g]	Torrdensitet [g/cm ³]
Flygaska	102	99	0,5
Blandaska	256	240	1,2

Ytterligare densitetsanalyser genomfördes med samma metod för askorna från provtagningen på upplaget vid Tveta Återvinningsanläggning i juni 2002 efter siktning. Densiteten bestämdes i materialfraktion < 1,12 mm (se bilaga F.3 om siktning). Resultaten redovisas i Tabell 16.

Tabell 16. TS-halt och densitet av askor från Tveta Återvinningsanläggning (flygaska och blandaska i kornstorleksfraktion < 1,12 mm).

Table 16. Content of dry substance and the density in ashes from Tveta waste recycling center (fly ash and mixed ash in grain size fraction < 1.12 mm).

Prov	TS [%]	Vikt [g]	Torrvikt [g]	Torrdensitet [g/cm ³]
A (Ö ljus 020604)	83	179,3	148,7	0,76
B (H vänster 020604)	72	144,5	103,3	0,53
C (H höger 020604)	71	162,4	115,1	0,59
D (H bland 020604)	74	149,8	110,4	0,56
E (H vittr 020604)	65	175,3	114,7	0,58
Flygaska FA	100	119,7	119,7	0,61
Blandaska BA 1	100	297,4	297,4	1,51

Torrdensiteten av aska D, som är en blandning av B och C motsvarar medelvärdet av dessa två askor. Densiteten av flygaska FA och blandaska BA 1 var lite högre i den

andra undersökningen, vilket kan bero på att askan hade torkats denna gången och densiteten bestämdes direkt av det torkade materialet.

F.5 Viskositet för olika askor

Viskositetsmätningar genomfördes på Luleå tekniska universitet, avdelningen för konstruktionsteknik med en ConTec rotationsviskosimeter. Volym av den yttre cylindern är 6 liter vilket betyder att relativt stora prover av de olika blandningarna kunde användas. Mätningarna genomfördes med ett förprogrammerat mätprogram kallat "Murbruk". Försöken utfördes på följande sätt: askan respektive askblandningen blandades manuellt med vatten i ett förhållande som motsvarade ungefär fältkapaciteten, blandningen hällades i provcylindern och analysen kördes. Beroende på resultat blandades in mer vatten eller aska för att uppnå de viskositets- och skjuvspänningsvärden som i litteraturstudien identifierats som lämpliga för injekteringen, se Tabell 17. Resultaten av viskositetsanalyserna redovisas i Tabell 18.

Tabell 17. Lämpliga viskositets- och skjuvspänningsvärden enligt litteraturstudie (bilaga A.2).

Table 17. Suitable values for viscosity and shear stress according to literature (bilaga A.2).

Egenskap	Enhet	Spännvidd	Referens
Dynamisk skjuvspänning τ	Pa	50 – 200	[2]
Dynamisk viskositet η	Pa·s	0,02 – 0,07	[2]
- " -	- " -	0,8 – 1 (pumpbart)	[3]

Eftersom askorna B_H-vänster, C_H-höger och D_H-bland i de tidigare försök hade visat sig vara mycket lika varandra, blandades de till ett enda material (H-askor, BCD). Askan E (Ö-ljus) undersöktes även osiktad med den partikelstorlek som uppnåddes genom krossning. Bland resultaten i Tabell 18 redovisas även den vattenhalt i blandningen, där bästa värden för viskositet och skjuvspänning erhöles.

Tabell 18. Vattenkvot, viskositets- och skjuvspänningsvärden i olika ask-vatten-blandningar.

Table 18. Water content, viscosity and shear stress in different ash-water-mixtures.

Blandning	Vattenkvot [%]	Skjuvspänning τ [Pa]	Viskositet η [Pa s]
H-askor (BCD) < 1,12 mm	37 %	23 - 48	6,3 - 0,2
40 % FA / 60 % BA < 1,12 mm	29 %	13 - 30	0,3 - (0)
50 % FA / 50 % BA < 1,12 mm	35 %	20 - 28	(0)
55 % FA / 45 % BA < 1,12 mm	32 %	35 - 77	2,4 - 0,3
H-vittrad < 1,12 mm	42 %	57	0,25
Ö-ljus < 1,12 mm	34 %	60	0,22
Ö-ljus < ca 5 mm (krossad, osiktad)	35 %	56 - 58	0,7 - 0,9

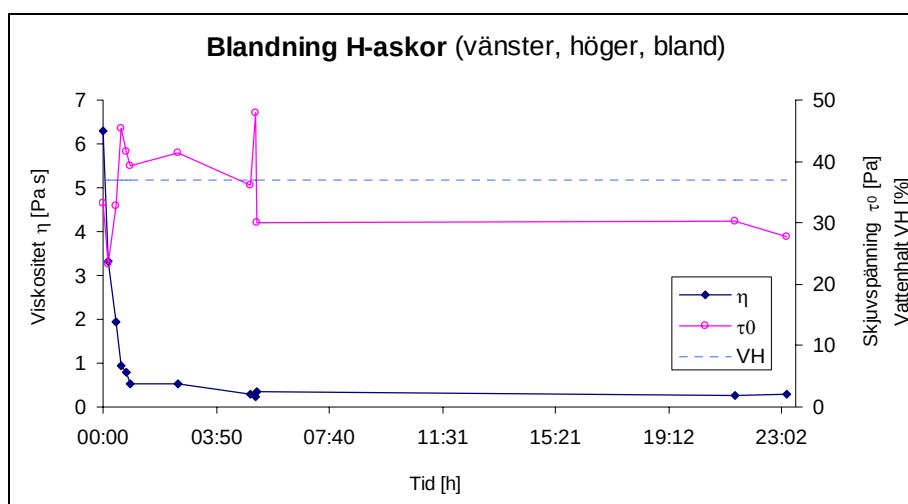
Spännvidden i resultaten beror på att värdena förändrades över tiden. Utan att förändra sammansättning i en blandning tenderade viskositeten att sjunka om materialet stod

stilla ett tag (det omrördes/homogeniserades dock strax innan en ny mätning genomfördes). Denna tendens blev mindre med längre försökstid, se Figur 34.

Nollvärden inom parentes betyder att viskositeten var mycket nära noll. Utrustningen kan inte hantera detta utan visade negativa värden, vilket saknar praktiskt mening. Därför sattes värdena lika med noll. Fenomenet uppträdde bara i blandningar med hög andel av blandaska (BA 1). Detta material hade i tidigare undersökningar karaktäriserats som sandigt med en stark tendens till sedimentation (se bilaga F.1 och F.2), vilket också tros ha bidragit till att viskosimetern visade felvärden.

Blandningarna var mycket känsliga för förändringar i vattenhalt, d.v.s. om man tillsatte lite vatten för att sänka viskositeten blev blandningen ofta för tunn även efter mycket små vattenmängder, se Figur 35.

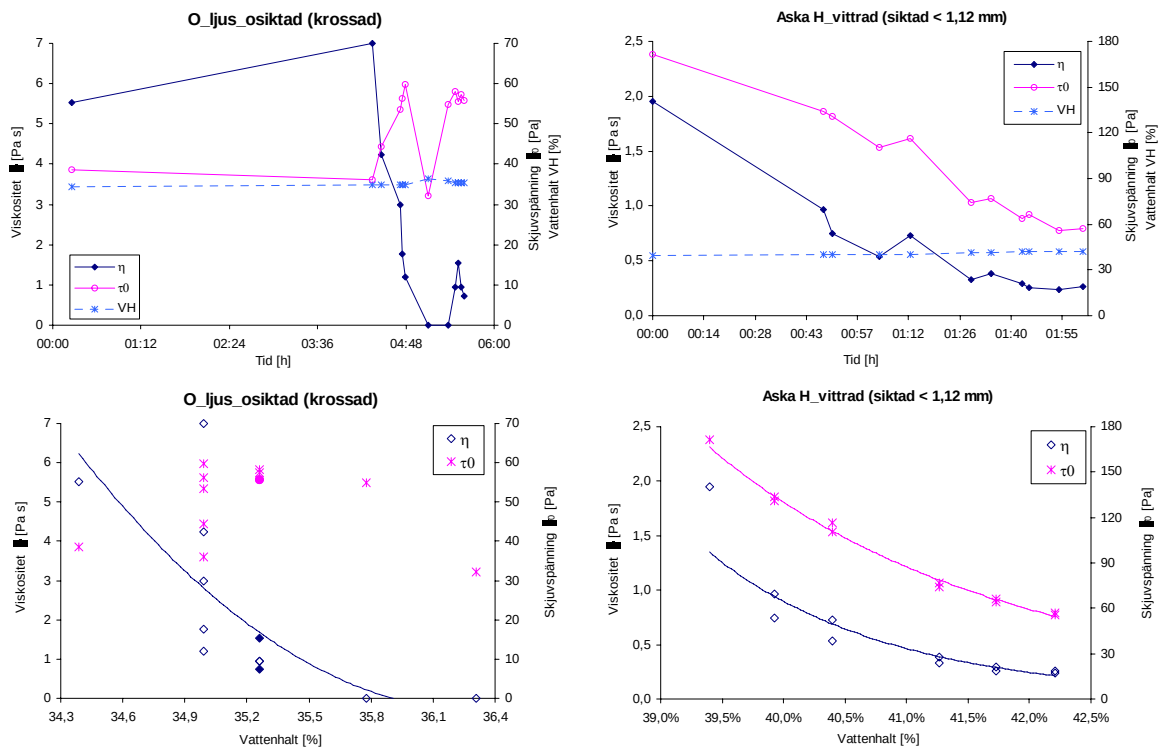
Härdning observerades för inget av materialen. Försökstiderna varierade mellan 2 och 6 timmer per blandning. Den första blandningen (H-askor) hade lämnats i cylindern (täckt med folie) även över natt för att undersöka förändringar med tiden (Figur 34).



Figur 34. Förlopp av viskositet och skjuvspänning vid konstant vattenkvot över 23 timmar för H-askorna. Blandningen homogeniserades inför varje mätning.

Figure 34. Viscosity and shear stress for H-ashes at constant water content over 23 hours. The mixture was homogenised before each measurement.

Med alla askor kunde viskositetsvärden i önskad storleksordning uppnås. Skjuvspänningen var dock bara i rekommenderat område för blandningar av flygaska respektive blandningar med hög andel flygaska. Flygaskorna Ö_ljus och H_vittrad visade som i tidigare undersökningarna bara marginella skillnader förutom att det behövdes mer vatten i H_vittrad-blandningen för att uppnå samma viskositets- och skjuvspänningsvärden. I jämförelse med det siktade och osiktade Ö_ljus-material hade det osiktade material lite högre viskositet och mindre skjuvspänning vid ungefär samma vattenkvot.



Figur 35. Förlopp av viskositet och skjuvspänning vid föränderlig vattenkvot för färsk (O_ljus) och lagrad (H_vittrad) flygaska över tid (övre del) och över vattenhalt (nedre del).

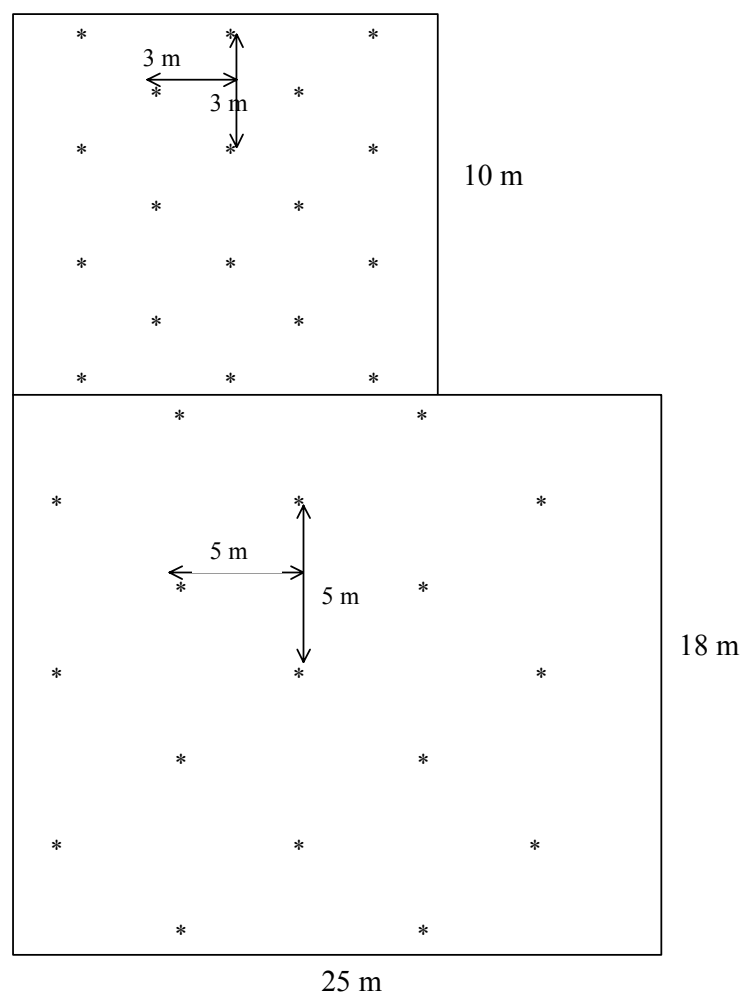
Figure 35. Viscosity and shear stress at changing water content for fresh (O_ljus) and aged (H_vittrad) fly ash over time (upper part) and over water content (lower part).

Slutsats: För injekteringen på Tveta Återvinningsanläggning rekommenderas att använda flygaska varvid det verkar inte vara av betydelse om den är färsk eller lagrad. Vattenkvot i blandningen skall ligga mellan ungefär 32 och 42 % för att erhålla en lämplig viskositet och måste inställas beroende på materialets aktuella konsistens.

G Injektering i pilotskala

G.1 Planering

Planen för injekteringen på deponin med hushållsavfall på Tveta Återvinningsanläggning var att borra hål med två olika tätheter; 5 meter respektive 3 meters mellanrum (diagonalt). I de tre testcellerna skulle endast ett hål borraras per cell. Totalt planerades att injektera omkring 100 ton material (flygaska + vatten) under cirka en veckas tid i totalt 38 hål (18 med 3 meters mellanrum, 17 med 5 meters mellanrum och 3 i testcellerna). Injekteringsplanen för pilotförsöken på deponin såg ut enligt skissen i Figur 36.



Figur 36. Skiss över injekteringsområdet på Tveta Återvinningsanläggning.

Figure 36. The grouting area at Tveta waste recycling center.

G.2 Genomförande

Intryckning av perforerade foderrör

Innan ”börningen” av injekteringshålen startade markerades punkterna på deponiytan (se Figur 37).



Figur 37. Markeringar på injekteringsytan på deponin för borrning och injektering.

Figure 37. Markings for drilling and grouting at the landfill grouting area.

”Börning” av hålen och injekteringen utfördes separerade från varandra. Alla injekteringshål förbörades till 9 meters djup genom att stålrör (Ø 32 mm) slogs ned i deponin (vertikal orientering) med hjälp av undersidan av en grävsropa (se Figur 38). Rören var perforerade med många små hål på röret för att möjliggöra spridning av injekteringsmaterialet. Diametern på dessa hål var till en början 10 mm men senare användes rör med en håldiameter på 20 mm för att undvika problem med igensättningar vid injekteringen.



Figur 38. Nedtryckning av perforerade stålrör i deponin med hjälp av en grävmaskin.

Figure 38. Depressing of perforated pipes in the deposit by an excavator.

Siktning av flygaskan

Flygaskan som användes för injekteringen var relativt färsk och härstammade från förbränning av biobränslen under hösten 2002. För ytterligare beskrivning av askans ursprung se bilaga D. För att möjliggöra injekteringen siktades flygaskan till 9 mm genom en stor sikt med hjälp av en grävmaskin.

Det kom senare att visa sig att den utrustning som användes i första skedet krävde en kornstorlek på < 2 mm, varför flygaskan siktades en gång till för hand med en mindre sikt de två första injekteringsdagarna (Figur 39). Under det fortsatta injekteringsarbetet (från och med dag 3) användes emellertid en injekteringsutrustning med en högtryckskross som inte krävde ytterligare siktning under 9 mm.



Figur 39. Siktning av flygaska till >2 mm under den första injekteringsdagen 4/11 2002.

Figure 39. Sifting of fly ash to a fraction > 2 mm during the first grouting day 4/11 2002.

Injekteringsutrustningen

Två olika utrustningar för injekteringen provades i samband med pilotförsöken på deponin. Från början användes en relativt liten utrustning med en blandningstank för satser på cirka 80 liter och en pumpkapacitet på 4-23 l/min, se Figur 40 samt Figur 11 i bilaga B.



Figur 40. Liten utrustning för injektering som användes för injektering i ett hål under de två första injekteringsdagarna.

Figure 40. Small grouting equipment that was used for grouting in one hole during the first two days.

Denna utrustning byttes ut efter två dagar mot en utrustning med högre pumpkapacitet (20-80 l/min), större blandningstank (upp till 150 liter) och en högtryckskross som krossar större stenar (se Figur 12 i bilaga B). I båda utrustningarna som användes vid pilotförsöken på Tveta Återvinningsanläggning blandades aska och vatten satsvis i blandningstanken innan slurryn pumpades ner i de förborrade hålen genom en lång cementinjekteringsslang (Ø 10 mm) försedd med en manschett (Ø 27 mm). De två utrustningarna samt alternativ utrustning beskrivs närmare i bilaga B.

Förutom utrustningen för själva injekteringen krävdes en vattentank på plats för att kunna blanda flygaska och vatten direkt i blandningstanken, se Figur 2. Vidare fanns ett aggregat för elförsörjning till injekteringsutrustningen samt belysning av deponiområdet. Från elaggregatet kunde emellertid endast 32 ampere tas ut vilket gjorde att injekteringspumpens fulla kapacitet inte kunde utnyttjas.

Injekteringsarbetet på deponin

Injekteringen startade 4/11 2002 med den relativt lilla utrustningen. Under de två första dagarna provades olika proportioner av flygaska och vatten och även blandningstiden varierades. Flygaskan, som tidigare siktats till 9 mm, siktades på nytt till < 2 mm innan den blandades med vatten. Inga tillsatser användes. Injekteringen i det första hålet skedde vid 4 meters djup.

Den större utrustningen börjande användes i samband med starten av injekteringen i hål 2. Injekteringsblandningen fastställdes till 40 liter vatten och 105 liter flygaska med en blandningstid på 3-4 minuter. Denna blandning, som motsvarar cirka 126 kg askslurry per sats, var konstant för större delen av injekteringsarbetet. Endast i det sista hålet (hål 15) testades en mer lättflytande blandning med högre vattenhalt. I hål 4-15 blandades en liten mängd diskmedel i askslurryn för att sänka ytspänningen och därmed få en smidigare blandning som var lättare att pumpa.

I alla hål utom två (hål 7 och 8) injekterades färsk flygaska. I hål 7 och 8 testades istället en lite äldre bottenaska men denna innehöll en del stenliknande klumpar som orsakade problem genom igensättningar av injekteringsslangen. Beskrivningar av askorna ges i bilaga D.

Slurryn med flygaska rann lätt ned i deponin utan tryck under större delen av injekteringsarbetet och inget mottryck uppkom vare sig pga det befintliga materialet i deponin eller den injekterade askan. I kortare perioder kunde dock mottryck uppkomma i några hål upp till 10 bar, men detta berodde antagligen främst på igensättningar i utrustningen. Vid ett tillfälle (injektering av hål 12 vid 3 meters djup) spred sig askan och kom upp i ett närliggande hål (hål 13).

En hel del problem uppkom under arbetets gång vilket gjorde att injektering alla hål som planerats inte kunde fullföljas eftersom detta skulle ta orimligt lång tid. Problemen var främst en följd av att utrustningen var underdimensionerad och att väderleken gjorde att vattnet i slangar mm. vid ett flertal tillfällen frös. Igensättningar förekom dessutom i injekteringsslangen p.g.a. klumpar, metallbitar mm. i askan. För att undvika

problemen blandades glykol i känsliga delar och presenningar användes för att skydda askan mot fukt.

Injekteringsarbetet på deponiområdet avslutades efter 3 veckor den 22/11 2002 och då hade totalt 15 hål injekterats på deponin enligt skissen i Figur 1. Totalt injekterades cirka 75 ton askslurry i deponin (blandat utgående från cirka 51 ton aska med en TS-halt på 28 %). Det var på grund av igensättningar i de förborrade hålen inte möjligt att injektera alla hål vid 9 meters djup. Det största djupet för injekteringen varierade därför från hål till hål mellan 4-9 meter.

Injektering av en testcell

I den slutna testcellen (6*6*8 meter) med 7 år gammalt matavfall injekterades cirka 24 ton flygaskslurry under tre dagar. Detta gav inte något mottryck men i slutet av den första injekteringsdagen, när omkring 2,5 ton askslurry injekterats, höjde sig marken något i en diameter på cirka en meter runt injekteringshålet. Dagen därpå hade dock nivån i cellen sjunkit till en något lägre nivå än startnivån och denna nya nivå förblev konstant under resten av injekteringen.

I testcellen med restavfall injekterades cirka 3,8 ton askslurry vid 6 meters djup innan injekteringsarbetet avslutades.

G.3 Provtagning och dokumentation

Under injekteringsarbetet dokumenterades förloppet och noteringar gjordes för samtliga satser som injekterades. Prov togs med jämna mellanrum för mätning av:

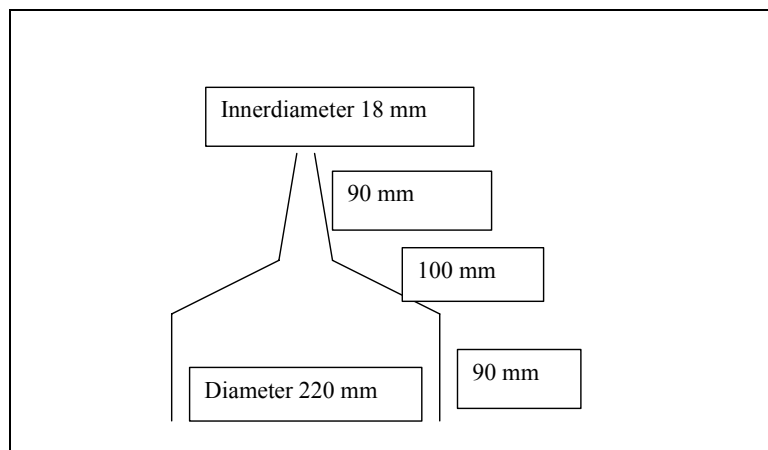
- flytegenskaper/viskositet
- densitet
- TS-halt
- härdningstid

Flytegenskaper, viskositet samt densitet

Varje dag under injekteringsperioden togs ett prov på blandningen av flygaska och vatten för mätning av viskositeten och densiteten i ett laboratorium på Luleå tekniska universitet. Kontinuerlig mätning av flytegenskaperna för olika blandningar gjordes även på plats med så kallade trattförsök.

I injekteringssammanhang testas flytegenskaper enligt SS-EN 445. I testet rinner slurryn genom en tratt vars pip har en diameter på 10 mm. Tiden för en viss volym klockas. I denna studie med aska var kornstorleken hos ingående material högre än normalt och därmed användes en tratt med en större diameter (18 mm) på pipen.

Tratten, som erhöles från Brunelius färghandel i Nyköping, visas i Figur 41 och Figur 42 visas försöksupställningen för trattförsöken vid injekteringsarbetet.



Figur 41. Bild av tratten för mätning av flytegenskaperna hos injekteringsmaterialet. Trattmaterial: plast, vägg tjocklek: 1-2 mm, största diametern på pipen: cirka 50 mm.

Figure 41. A funnel for flow measurements of the grouting material. Material of the funnel: plastic, wall thickness: 1-2 mm, largest diameter of the spout: 50 mm.



Figur 42. Försöksuppställning för trattförsök för test av flytegenskaperna under injekteringsarbetet.

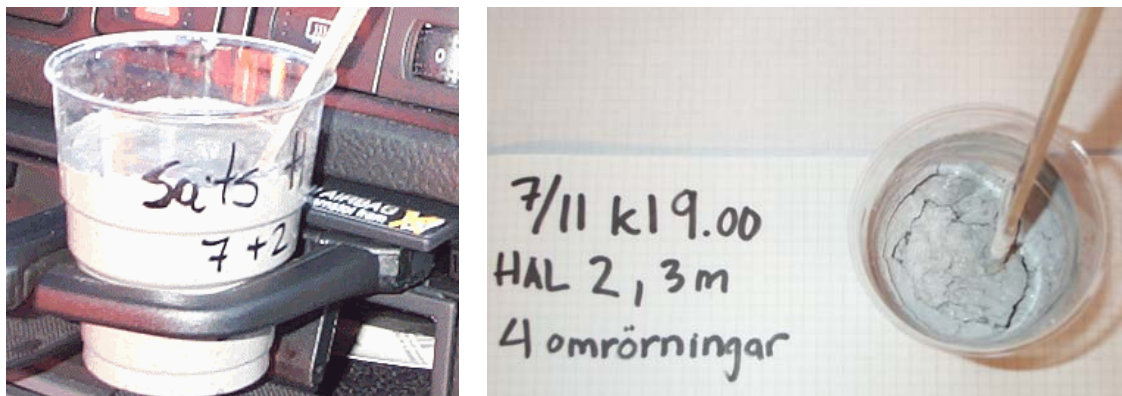
Figure 42. Equipment for funnel experiments to measure the flow properties during the grouting work.

TS-halt

Med jämna mellanrum några gånger per dag, i samband med trattförsöken, togs prover på injekteringsblandningen i en liten glasburk för att senare kunna bestämma TS-halten genom att skicka burkarna till SwedPower i Nyköping. Några större prover togs även för analys på Luleå tekniska universitet.

Härdningstid

Härdningstiden analyserades med s.k. "skedförsök" på den injekterade askslurryn i samband med injekteringsarbetet, för att se till att materialet inte härdade så snabbt att det skulle sätta sig fast i injekteringspumpen. Bägarna med prover på injekteringsblandningar rördes om med träpinnen och fick sedan stå och stelna i rumstemperatur. Träpinnen gör det möjligt att bedöma härdningstiden genom att se hur väl materialet håller emot så att pinnen inte faller åt sidorna, se Figur 43.



Figur 43. Bägare med askmaterial och träpinne för test av härdningstiden. Provet i bägaren på vänstra sidan har inte börjat stelna och därmed faller träpinnen mot kanten. På höger sidan syns stelnat material (efter cirka 1-2 dygn).

Figure 43. A cup with ash material and a stick to test the hardening time. The sample in the cup on the left side has not started to harden and therefore the stick falls to the side. On the right side the material is hardened (1-2 days later).

G.4 Resultat

Injekteringen på deponiområdet

De injekterade volymerna aska (utan vattentillsats), mängderna askslurry samt injekteringsdjupen i de injekterade hålen 1-15 framgår av Tabell 19 och Figur 3. I Tabell 19 framgår även mängden askslurry som injekterades i testcellerna.

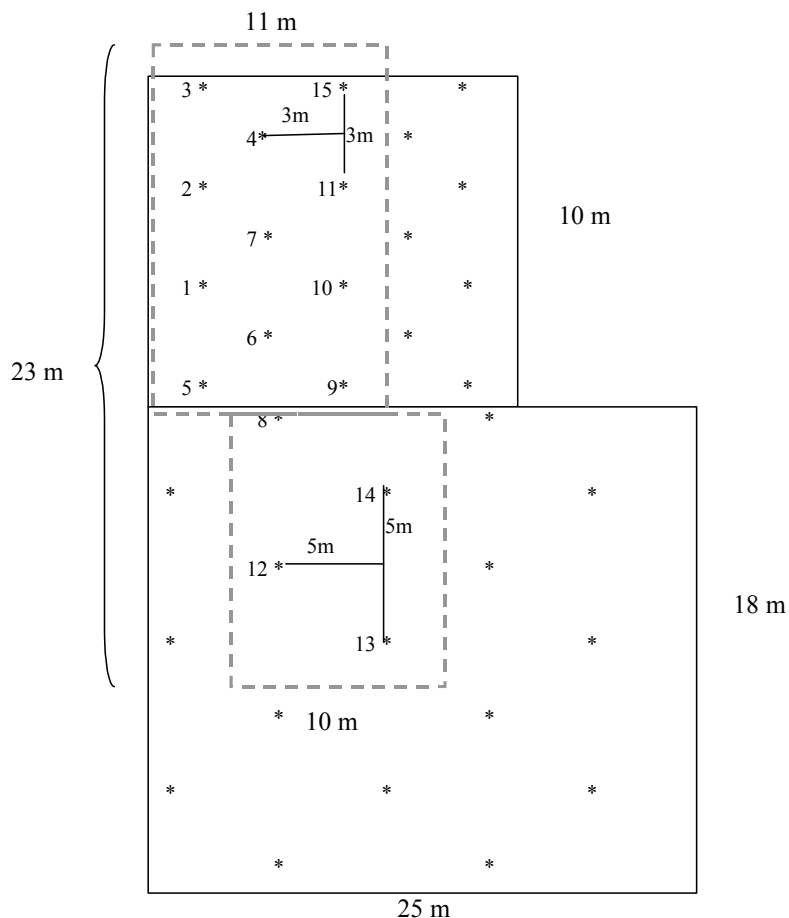
Tabell 19. Injekterad volym aska, mängd askslurry samt injekteringsdjupen för de injekterade hålen på deponin samt i testcellerna.

Table 19. Weight and volume of the grouted ash slurry and the grouting depths for the holes at the landfill area and the test cells.

Hål	Injekterad mängd aska (utan vattentillsats) (m ³)	Injekterad mängd askslurry (ton)	Injekterings- djup (m)
1	0,5	0,7	4
2	5,5	6,6	3 + 9
3	2,2	2,6	5,5
4	3,7	4,5	9
5	4,5	5,4	4-7
6	3,9	4,6	5-6 + 8-9
7	2,1	2,1	3-5
8	6,3	6,5	3-9
9	5,3	6,3	3-7
10	1,1	1,2	9
11	4,3	5,2	4-7
12	8,4	10,1	3-4 + 8-9
13	0,3	0,4	3
14	8,3	9,9	9
15	6,5	9,0	4 + 9
Summa deponin	63	75	
Testcell 1	3,2	3,8	6
Testcell 2	20,0	23,7	5-6
Summa totalt	86	103	

Mängderna askslurry som injekterats illustreras även i Figur 4 för den tät injekterade ytan (3 meter mellan hålen) samt i Figur 5 för den glest injekterade ytan (5 meter mellan hålen).

Med antagandet att askan inte sprider sig mer än 2,5 meter utanför de ytterst injekterade hålen utgör det injekterade området, se Figur 44, totalt en volym på cirka 2185 m³. Den injekterade volymen askslurry inom detta deponiområde motsvarar cirka 2,5 %.



Figur 44. Skiss över injekteringsytan på deponin där de streckade områdena motsvarar det injekterade området med 1 meter utanför de yttersta hålen.

Figure 44. The grouting area at the landfill. The area inside the broken lines is the grouted area plus 1 meter outside the farthest holes.

Injekteringen i testcellen

Totalt injekterades cirka 20 m^3 aska som blandades med drygt 7 m^3 vatten i testcellen med organiskt avfall. Detta motsvarar cirka 24 ton eller 17 m^3 askslurry. Testcellen storlek är $6 \times 6 \times 8$ meter, d.v.s. volymen är cirka 288 m^3 . Detta betyder att den injekterade volymen askslurry utgör cirka 6 % av cellens totala volym.

Om en tillgänglig porvolym i testcellen antas på 15-20 % motsvarar den injekterade volymen askslurry (17 m^3) cirka 30-40 % av de hålrum som antas kunna fyllas. Testcellen är tätad vilket betyder att askan som injekterats inte borde ha spritt sig utanför cellen.

I testcellen med restavfall injekterades cirka 3,8 ton askslurry vid 6 meters djup innan injekteringsarbetet avslutades.

Viskositet, densitet och TS-halt

I Tabell 20 redovisas resultaten från analyserna av de prover som togs på injekteringsblandningen med aska och vatten under pilotförsöken på deponin. Små glasburkar togs med jämna mellanrum (totalt 66 stycken) och TS-halten i dessa har analyserats vid SwedPowers laboratorium i Nyköping vid 105 °C. Dessutom togs prover på askslurryn i 12 stycken 10 liters hinkar. För materialet i dessa hinkar bestämdes TS-halten, viskositeten samt densiteten vid ett laboratorium på Luleå tekniska universitet.

Tabell 20. TS-halt, densitet och viskositet för prover på injekteringsmaterialet med en blandning av aska och vatten. Beteckningarna t.ex. 1_N4_1 står för hål 1_injekteringsdjup 4 meter_prov 1.

Table 20. Content of dry material, density and viscosity for samples of grouting material with a mixture of ash and water. The name of the samples e.g. 1_N4_1 correspond to hole number 1_a depth of 4 meters_sample 1.

	TS burk %	TS hink %	densitet [t/m ³]	viskositet [s·Pa]	
				1:a mätningen	medel
1_N4_1	56				
1_N4_10	53	52	1,4	0,59	0,39
1_N4_2	54				
1_N4_3	53				
1_N4_4	11*				
1_N4_5	22*				
1_N4_6	33*				
1_N4_7	50				
1_N4_8	53				
10_N9_2	45				
10_N9_8	45				
11_N	45				
12_N3_32	46				
12_N4_10	47				
12_N4_32	51				
15_N4_25	41				
15_N9_10	38				
15_N9_11	39	40	1,3	0,01	0,01
15_N9_48	39	40	1,3	0,01	0,02
15_N9_49	35				
15_N9_66	42	40	1,3	0,13	0,10
2_N3_12	48	48	1,4	0,39	0,21
2_N3_2	47				
2_N3_20	47				
2_N3_4	49				
2_N9_1	40				
2_N9_12	49	48	1,4	0,81	0,49
2_N9_18	48				
2_N9_4	45				
2_N9_5	45				
2_N9_7	50				

	TS burk %	TS hink %	densitet [t/m ³]	viskositet [s·Pa]	
				1:a mätningen	medel
3_N5,5_21	50				
3_N5,5_7	49				
4_N	47				
4_N7_13		48	1,4	0,11	0,07
4_N9_11	49				
5_N6_10		49	1,4	0,01	0,01
5_N7_12	48	46	1,4	0,12	0,06
6_N5_4	48	50	1,4	0,07	0,05
6_N5_5	51				
6_N9_10	47				
6_N9_9	45				
7_N5_1	51				
7_N5_3	51				
8_N4_1	49				
8_N4_2	49				
8_N4_4	51	52	1,5	0,18	0,17
9_N5_1	46				
T1_N6_9	42				
T3_N5_13	45				
T3_N6_34	45	44	1,4	0,05	0,02
T3_N6_43	43				

* resultat kan vara felaktig (för låg TS)

H Utvärdering av pilotförsöken

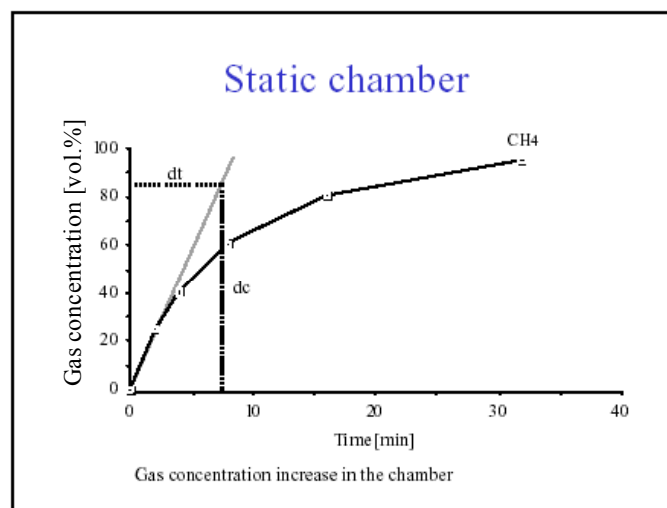
H.1 Gasmätningar före och efter injekteringen

Gasmätningar före injekteringen

Genomförande

På deponiytan antogs att metankoncentrationerna innan injekteringen troligen skulle ligga under 1 % (volym%), eftersom den enligt tidigare erfarenheter oftast ligger mellan 100 och 1000 ppm. För att mäta halter av denna storleksordning används lämpligen en GC (gaskromatograf).

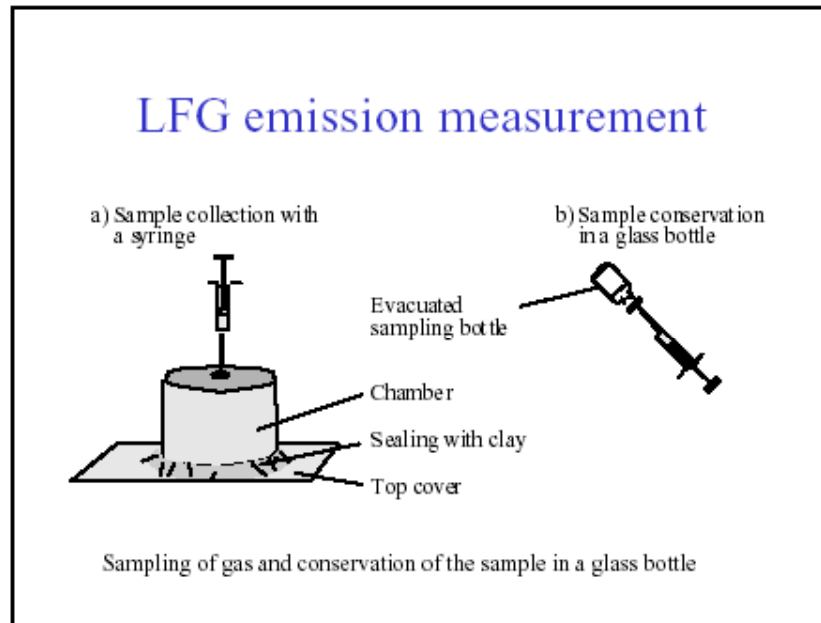
Planeringen var att få fram gasflödet på deponin genom mäta koncentrationen i en kammare inom ett visst tidsintervall och sedan kalkylera flödet (se Figur 45).



Figur 45. Koncentrationsförlopp i kammaren och bestämning av flödet.

Figure 45. Gas concentration increase in the chamber and determination of the flow.

Försökssupställningen med en kammare för uppsamling av gas illustreras i Figur 46.



Figur 46. Principiell skiss för gasmätning med kammare på deponiytan.

Figure 46. Principal figure for gas measurements with a chamber at the landfill surface.

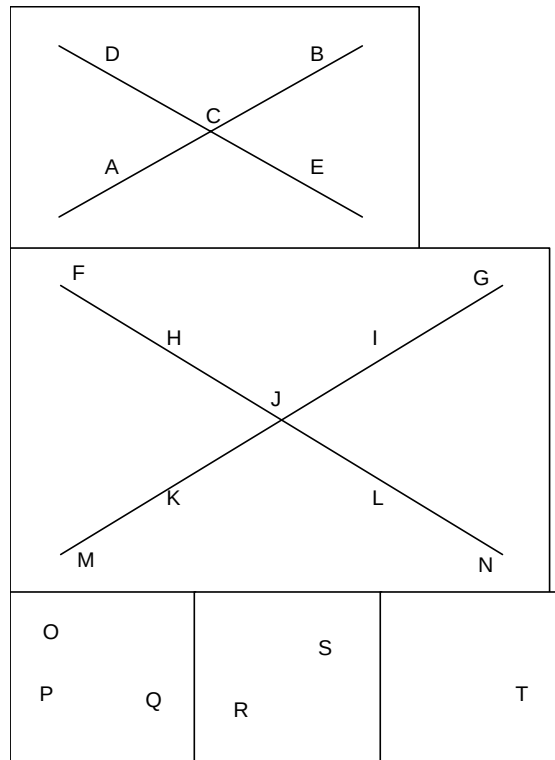
I Figur 47 visas 1 av de två hinkarna samt sprutan som användes för att samla upp gas samt en glasflaska (50 ml) för gasprovet. Volymen på hinkarna var 16 respektive 18 liter.



Figur 47. Utrustingen (hink, spruta och glasflaska) som användes för gasprovtagningen på deponin före injekteringen.

Figure 47. Equipment for gas measurements at the landfill before the grouting.

I Figur 48 visas en skiss över mätpunkterna för injekteringsområdet på deponin samt de tre testcellerna. På injekteringsytan med 3 meter mellan borrhålen togs gasprover vid 5 mätpunkter (A-E), på injekteringsytan med 5 meter mellan borrhålen togs gasprover vid 9 mätpunkter (F-N) och i de tre testcellerna togs gasprover vid 6 mätpunkter (O-T). Totalt markerades alltså 20 punkter för gasprovtagning.



Figur 48. Skiss över injekteringsområdet och testcellerna med mätpunkterna för gasprovtagning markerade.

Figure 48. The grouting area and the test cells with the points for gas measurements marked out.

Eftersom gasproduktionen påverkas av yttre faktorer såsom lufttycket gjordes mätningar för varje mätpunkt vid tre olika tillfällen under perioden 28 oktober till 5 november 2002.

Gasprovtagningen gick till på följande sätt:

- Hinken placerades upp och ner vid den markerade mätpunkten. Tätning mellan hinken och marken gjordes med lera.
- Efter 1 minut togs första gasprovet ut (50 ml) med hjälp av en spruta genom ett septum i hinken.
- Efter 5 minuter togs ett nytt 50 ml gasprov.
- Efter 10 minuter togs det sista gasprovet ut (50 ml).

De 180 glasflaskorna med gasprover (20 punkter * 3 dagar * 3 mätningar) skickades till laboratoriet på Luleå tekniska universitet för analys med hjälp av en gaskromatograf.

Resultat

Vid analysen av gasen i flaskorna kunde ingen metan (CH_4) detekteras. Anledningen till detta har inte kunnat fastställas. En möjlig förklaring kan vara att tätningen av hinken vid provtagningarna inte var tillräcklig. Gasflödet upp ur deponin kan även ha påverkats av att man på Tveta Återvinningsanläggning suger ut gas ur deponin med hjälp av nedgrävda rör så att det blir undertryck.

Gasmätningar efter injekteringen

Genomförande

Eftersom gasprovtagningen före injekteringen inte gav några resultat när det gäller gasproduktionen valdes att göra en annan typ av mätningar i mätomgången efter injekteringen. För dessa prover planerades mätning av både metanhalt och svavelvätehalten nere i deponin istället för på ytan.

För att ta gasprover nere i deponin användes en tre meter lång sond. På grund av tjäle i marken samt hårt kompakterat material var det dock svårt att få ner sonden i deponin. Istället valdes att göra gasprovtagningarna i de förborrade injekteringsrören, dels de som injekterats och dels de som inte injekterats.

Provtagningen skedde i tre olika moment:

- Metanhalt mättes direkt i injekteringshålen med hjälp av en 1,5 meter lång slang. Mätinstrumentet gav ungefärliga värden men för mer exakt analys krävs en gaskromatograf.
- Gasprover togs med en spruta till 50 ml glasflaskor genom att sonden stacks ner till cirka 1 meters djup i injekteringshålen. Flaskorna med gasprov skickades till Luleå tekniska universitet för analys av metanhalt med hjälp av en gaskromatograf.
- Svavelvätehalten mättes direkt i hålen med hjälp av Drägerrör. En förlängningsslang till pumpen gjorde det möjligt att mäta ner till 3 meters djup i hålen. Två olika mätintervall på Drägerrören användes: 10-200 ppm H_2S och 200-1000 ppm H_2S (Figur 49).



Figur 49. Dräger rör efter gasprovtagning. Avläsning på skalan för det mörkfärgade området ger H_2S -halten.

Figure 49. Dräger tubes for measurement of H_2S . The dark coloured area indicates the content of H_2S in the gas.

Gasmätningarna pågick under tre dagar i februari 2003. första dagen var det molnigt, blåsigt, snöfall och ett par minusgrader medan det under de två sista dagarna vindstilla, uppehåll och cirka $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. I slutet av dag 2 (2003-02-10) påbörjades utgrävningarna av deponin strax utanför det injekterade området vilket kan ha påverkar värdena vid gasmätningarna. Utgrävningarna pågick även under den tredje dagen för gasmätningarna.

Förutom de gasmätningar som gjordes i injekteringshålen togs även några gasprover med sonden in i deponin från sidan på olika djup vid utgrävningarna. En närmare beskrivning av hur och var dessa gasprover togs beskrivs i bilaga H.3 om utgrävningarna. Resultaten redovisas emellertid i Tabell 22 nedan.

Resultat

I Tabell 21 visas protokollet för gasmätningarna i injekteringshålen.

Tabell 21. Resultat från gasmätningarna i de injekterade och ej injekterade borrhålen på deponin. Placeringen av hålen och den injekterade mängden aska i respektive hål framgår i bilaga G.

Table 21. Results from the gas measurements in the grouted and the not grouted holes at the landfill area. The placement of the holes and the grouted amount of ash in the holes is described in appendix G.

Hål	Datum	CH ₄ , lab (GC)	CH ₄ i fält	Svavelväte, H ₂ S i fält (Drägerrör)	Kommentar
Hål 3	20030203		40%	3-4 ppm	10 cm djup (röröppning, täckt med CH ₄ -filter och hand)
	20030210		46%	2 ppm	1 m djup
Hål 2	20030203		40%	40 ppm	10 cm djup (röröppning, täckt med CH ₄ -filter och hand)
	20030210		36%	40 ppm	1m djup
Hål 10	20030203		40	>200 ppm	10 cm djup (röröppning, täckt med CH ₄ -filter och hand)
	20030210		30%	700 ppm	1,5 m djup
	20030212			1400 ppm	2,5 m djup , utgrävning pågick
	20030212			750 ppm	1m djup, utgrävning pågick
Hål 1	20030210		18%	<1 ppm	utgrävningen startat
Hål 14	20030210	24%	-	~1 ppm	Lite svart klet i röret. Metangasmätaren igensatt, ur funktion.
Ej Injekterat 1	20030210	28%	22%	>2000ppm	1.5-2m djup
	20030212			1500 ppm	1,5m djup, utgrävning pågick
Ej Injekterat 2	20030210	28%	40%	600 ppm, 500 ppm	
Ej Injekterat 3	20030210	-	70%	<10 ppm	Ca 1 meter ner var röret vattenfyllt. Ingen gas fanns i glasflaskan för mätning i lab. med GC.
Ej Injekterat 4	20030210	38%	40%	1500 ppm	
	20030212			1400 ppm	2,5 m djup, utgrävning pågick
Hål 7	20030210				Fyllt med stelnat injekteringsmaterial, snötäckt ca 70 cm
Hål 4	20030210				Krökt rör
Hål 15	20030210				Fyllt med stelnat injekteringsmaterial
Hål 11	20030210				Fyllt med stelnat injekteringsmaterial
Hål 9	20030210				Fyllt med mjukt injekteringsmaterial ca 0,5 m ner
Hål 6	20030210				Under plint/platta
Hål 5	20030210				Fyllt med stelnat injekteringsmaterial
Hål 8	20030210				Ej återfunnet
Hål 13	20030210				Svart klet i röret hindrade mätningar
Hål 12	20030210				Fyllt med mjukt injekteringsmaterial

Mätningar av svavelhalten gjordes i några hål både dag 1 och 2 då utgrävningarna bredvid injekteringsområdet ej startat och dag 3 då utgrävningsarbetet pågick för att se

om detta påverkade gasflödet. Inget av proven visade dock på en markant lägre koncentration av H_2S då utgrävningarna hade startat.

Inga gasmätningar kunde göras i de injekterade hålen 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12 och 13 främst på grund av de var fyllda med material och igensatta.

I Tabell 22 redovisas resultaten från gasproverna som togs in i deponin från sidan på olika djup i samband med utgrävningarna (mätpunkternas placering beskrivs i bilaga H.3). Proverna har analyserats på Luleå tekniska universitet. Resultaten är osäkra eftersom syrehalten i tre av proverna är högre än syrehalten i luft.

Tabell 22. Resultat från gasmätningarna in i deponin i samband med utgrävningarna. Beteckningarna på proverna och placeringen av mätpunkterna framgår i bilaga H.3.

Table 22. Results from the gas measurements in the deposit during the excavation. The names of the samples and the placement of the measuring points is described in appendix H.3.

Beteckning	O ₂ (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
A	15,8	25	33
B1	35,3	4	4
B2	31,6	15	10
C	16,7	26	34
D	31,7	15	10

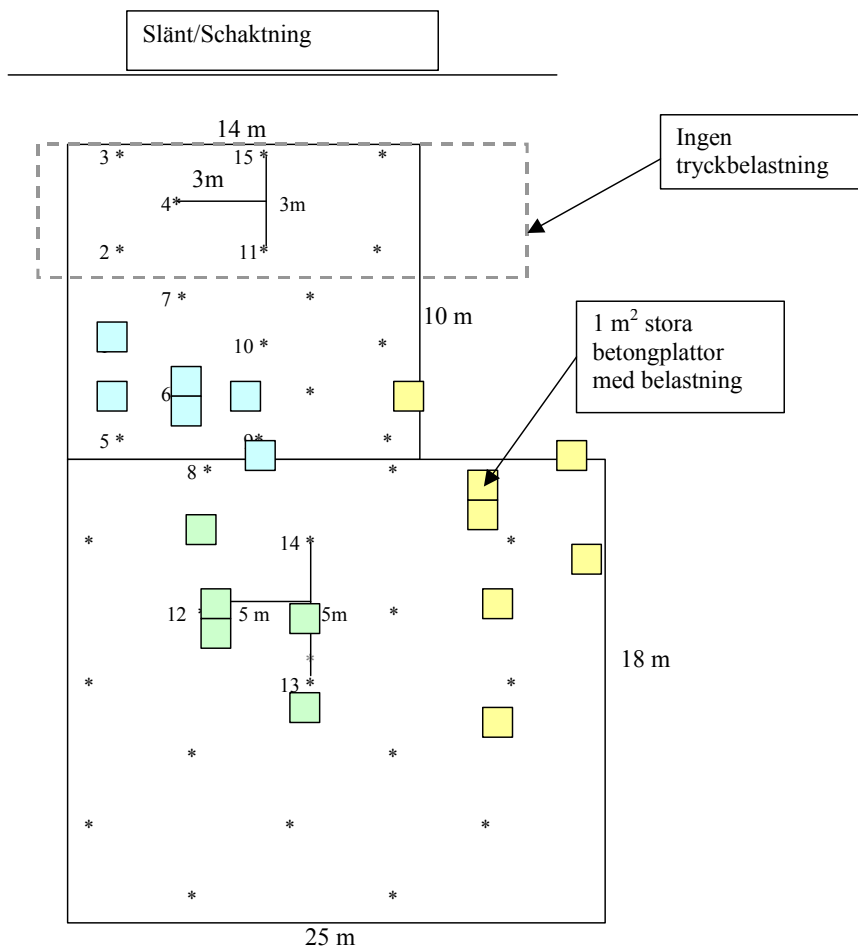
H.2 Sättningsmätningar

Efter att injekteringen avslutats genomföres ett belastningsförsök i syfte att se hur deponin reagerar på en belastning motsvarande ett sluttäckningsmaterial.

Genomförande

1 m² stora plattor i betong placerades på deponiområdet och belastades med 4,5 tons vikter, bestående av betongslipers, se Figur 7. Belastningen på 4,5 ton/m² antas motsvara belastningen av en sluttäckning. Plattorna på det injekterade området på deponin placerades dels för att ge belastning intill hålen och dels för att ge belastning mellan hålen. Syftet var att se om det fanns skillnader i sättningar i förhållande till avståndet till hålet.

Totalt placerades 18 stycken plattor ut fördelat på de injekterade områdena med 3 meters avstånd och 5 meters avstånd mellan hålen samt på ett icke injekterat område enligt skissen i Figur 50. De delar av det injekterade området där utgrävningar skulle ske lämnades fritt från belastning. Rören i de förborrade hålen för injekteringen fanns kvar i marken vid tidpunkten för belastningsförsöket.



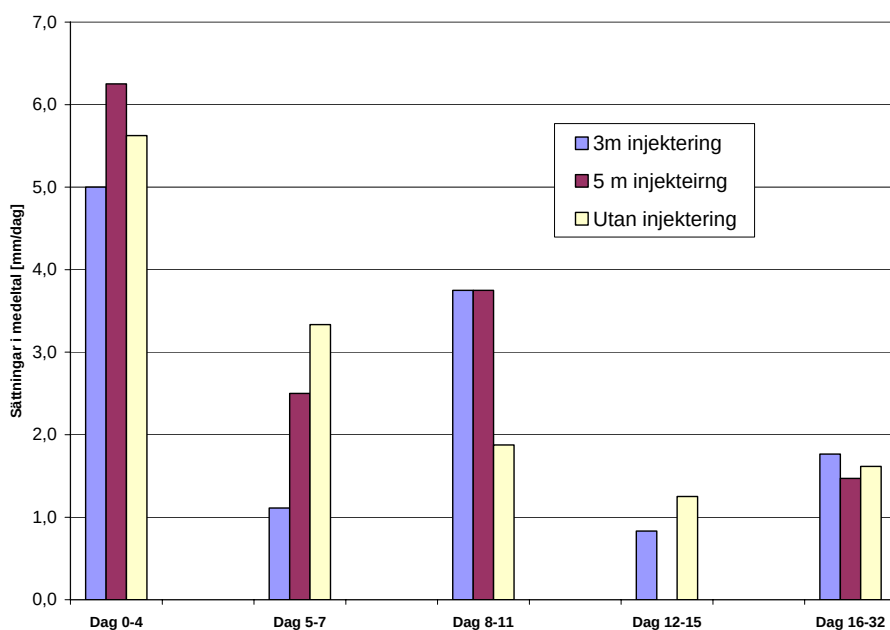
Figur 50. Skiss över injekteringsområdet med plattorna för sättningsmätningarna inritade.

Figure 50. The grouting area with the concrete slabs for settlements measurements marked.

Hål 1, 6, 9 och 12 hade belastningen nära hålet (hål 6 och 12 hade en dubbelplatta (2 m^3) för att fånga upp ett större område). På det injekterade området sattes dessutom plattor ut mellan hålen 13-14, 12-8, 9-10 samt 5-1, enligt Figur 50. 7 plattor placerades på det icke injekterade området, varav två bredvid varandra som en dubbelplatta.

Resultat

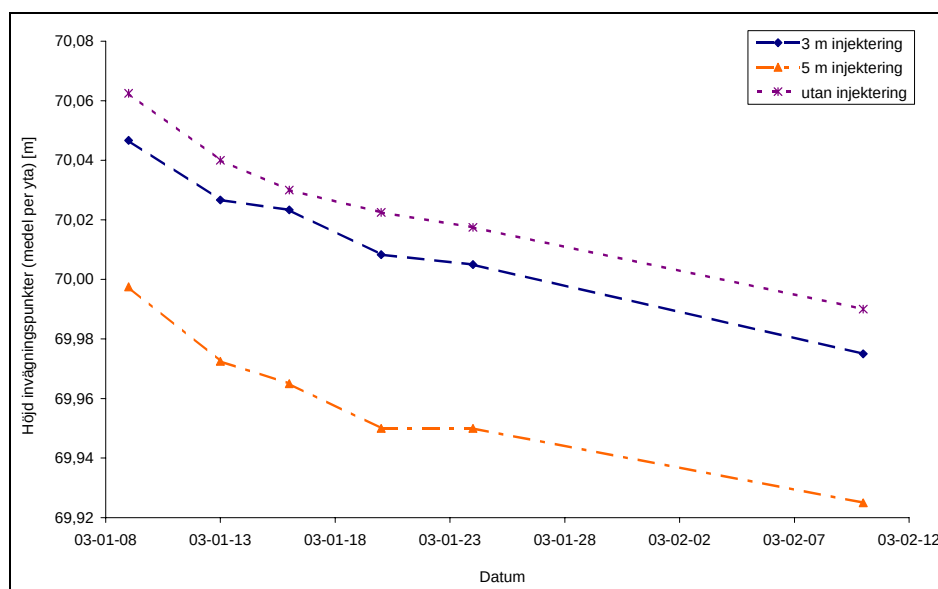
I Figur 51 illustreras hur mycket plattorna i genomsnitt har sjunkit per dag på de tre områdena (3 meter mellan injekteringshålen, 5 meter mellan injekteringshålen samt ett icke injekterat område) vid de fem olika mättillfällena från dag 0 till dag 32.



Figur 51. Sättningar av deponin i medeltal per dag för plattorna på de tre områdena (tätt injekterat, glest injekterat samt ej injekterat) och för de fem olika mätperioderna.

Figure 51. Settlements in average per day for the concrete slabs at the three different areas (densely grouted, sparsely grouted and not grouted) and for the five different measuring periods.

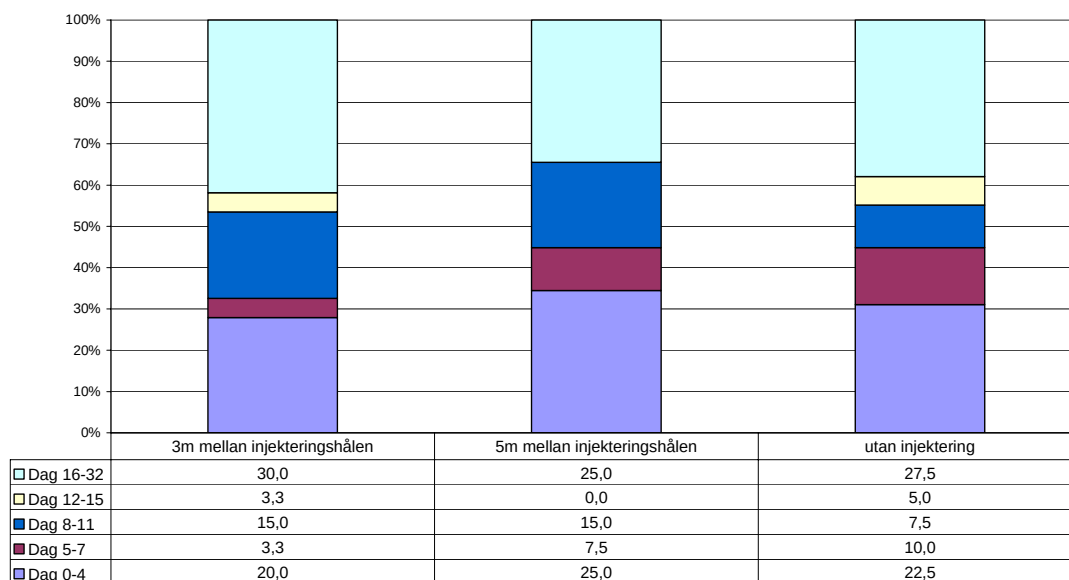
I Figur 52 visas även den genomsnittliga höjden för mätpunkterna i respektive område under den 32 dagar långa mätperioden.



Figur 52. Höjden för invägningspunkterna (medelvärde över alla mätpunkter per yta).

Figure 52. The height for the measuring points (average of all points in each area).

För mätintervallen 3-4 dagar, dvs fram till dag 15, ägde de största sättningarna på respektive område rum under den första perioden, se Figur 53. Vid en jämförelse mellan sättningarna dag 0-15 och dag 15-32 ägde i samtliga fall omkring 60 % av sättningarna rum i den första perioden.



Figur 53. Bilden visar hur stor del av sättningarna i medeltal som skedde under de olika mätintervallen för respektive område.

Figure 53. Percentage of the settlements that occurred during the different measurement intervals for each area.

H.3 Utgrävning av deponin

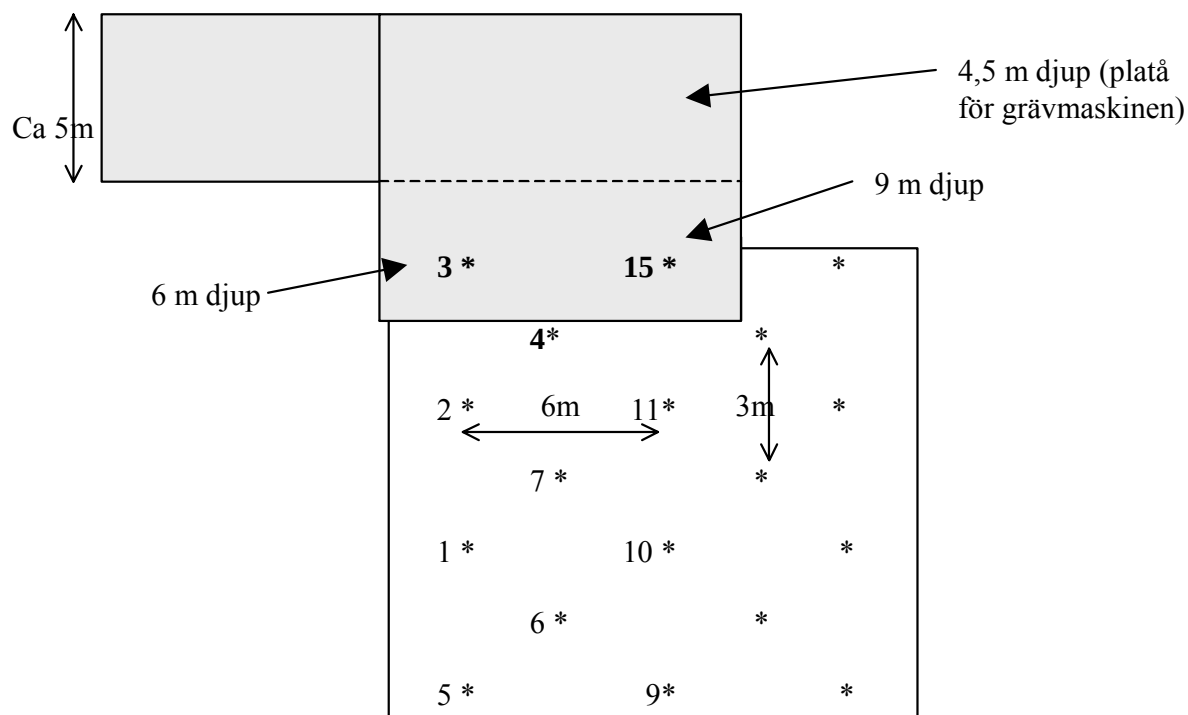
Genomförande

Uppföljning genom utgrävning av det injekterade området startade den 10/2 2003, cirka 2,5 månader efter att injekteringsarbetet avslutats.

Längs ena sidan av det injekterade området finns en sluttning där det lämpade sig att starta utgrävningarna genom att gräva ut ett brett schakt (se Figur 54). Ett cirka 5 meter brett och 4,5 meter djupt schakt grävdes ut så att en rak vägg erhöles cirka 2 meter framför hål 3 och 15 (vid den vågräta streckade linjen i Figur 54). Från denna plattform kunde sedan grävmaskinen komma åt att gräva djupare och närmare de injekterade hålen (se Figur 55). Schaktet skapades även för att få in tillräckligt med luft för att minska risken för antändning och inandning av giftiga gaser såsom svavelväte.

Utgrävningsarbetet fortsatte sedan in mot de injekterade hålen 3, 4 och 15 så att en ny 4,5 meter djup vertikal vägg erhöles först i nivå med hål 3 och 15 och därefter i nivå med hål 4. Därefter grävdes detta område ut ner till 6 meters djup och närmast hål 15 ner till 9 meters djup. Utgrävningsarbetet tog cirka 3 dagar och dokumenterades kontinuerligt med en digitalkamera. Dessutom togs ett flertal gasprover (se resultat i

bilaga H.1) och prover på det injekterade stelnade askmaterialet. Vädret var vindstilla med uppehåll och ett par minusgrader.



Figur 54. Skiss över injekteringsområdet. Utgrävning skedde av det skuggade området ner till maximalt 9 meters djup.

Figure 54. The grouting area. Excavating took place in the gray area down to a depth of maximum 9 meters.



Figur 55. Grävmaskinen som användes för utgrävningen av det injekterade området på deponin.

Figure 55. The excavator that was used for excavating of the grouted area at the landfill.

De injekterade mängderna askslurry i hålen närmast det utgrävda schaktet (hål 3, 15, 4, 2, 11 och 7) visas i Tabell 23. Totalt injekterades omkring 30 ton askslurry (21 m^3) i dessa sex hål.

Tabell 23. De injekterade mängderna askslurry samt injekteringsdjup för hålen närmast det utgrävda schaktet (hål 3, 15, 4, 2, 11 och 7).

Table 23. The grouted amounts of ash slurry and the grouting depths for the holes closest to the excavating area (hole 3, 15, 4, 2, 11 and 7)

Hål	Injekterad mängd askslurry (ton)	Injekteringsdjup (m)
3	2,6	5,5
15	6,6	9
	2,4	4
4	4,5	9
2	2,4	9
	4,2	3
11	5,2	4-7
7	2,1	3-5
Summa	30	

Resultat

Nedan preciseras närmare iakttagelserna vid de olika etapperna av utgrävningsarbetet.

4,5 meter djupt schakt med vertikal vägg cirka 2 m från hål 3 och 15 (Figur 56).

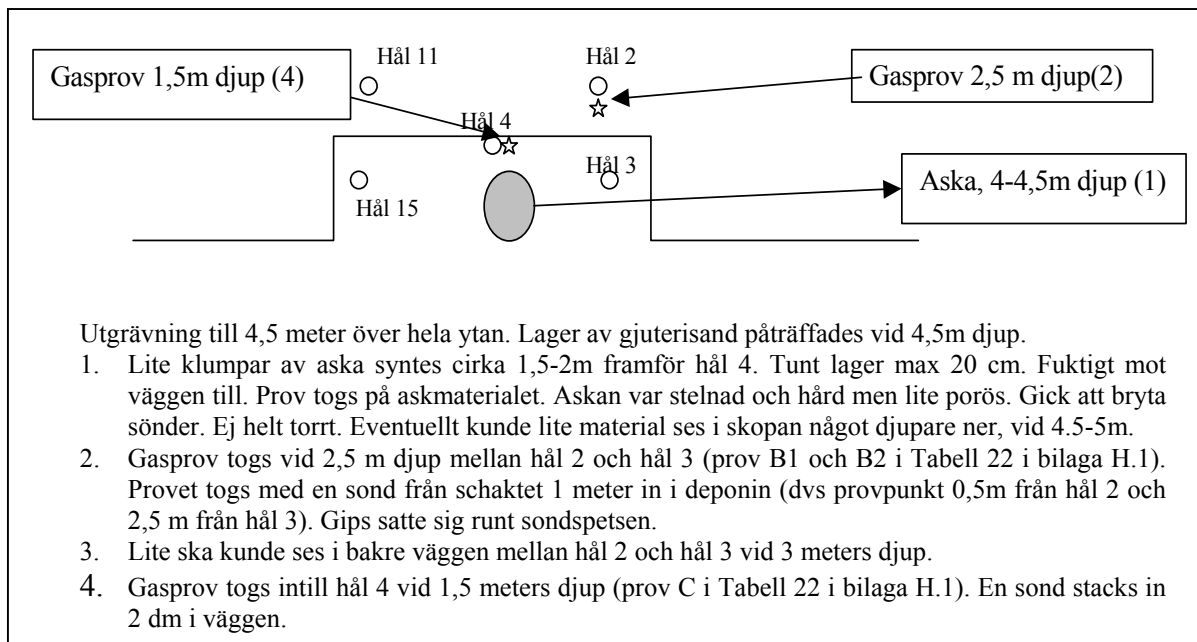
Inget askmaterial kunde ses. Materialet i deponin bestod främst opåverkat av industriavfall (träplankor, isolering, plast, gipsskivor mm). Ett gasprov togs med sond cirka 30 cm in i deponin nedanför hål 3 (prov A i Tabell 22 i bilaga H.1).



Figur 56. Vertikal vägg cirka 2 meter från hål 3 och 15. Materialet består mestadels av industriavfall med en hel del gipsskivor i.

Figure 56. Vertical wall about 2 meters from hole 3 and 15. The material consists mainly of industrial waste with gypsum boards.

4,5 meter djupt schakt med vertikal vägg i linje med hål 4 (Figur 58)



Figur 57. Skiss uppifrån över det utgrävda området ner till 4,5 meters djup.

Figure 57. Sketch from above of the excavated area down to a depth of 4,5 meters.



Figur 58. Schaktet ovanifrån vid 4,5 meters djup där ett lager av gjuterisand finns. Lite klumpar av injekterad aska kan ses mitt i schaktet framför hål 4.

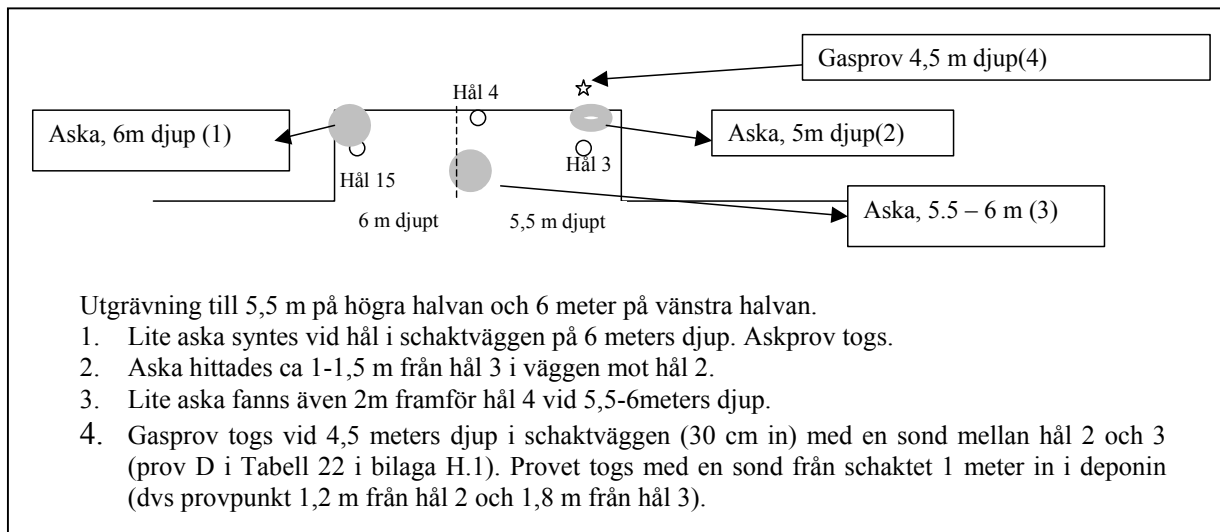
Figure 58. The shaft from above at a depth of 4,5 meters where there is a layer of foundry sand. Some lumps of grouted ash can be seen in the middle of the shaft in front of hole 4.



Figur 59. Klumpar av stelnad injekterad aska vid 4,5 meters djup framför hål 4. Materialet i väggen består främst av industriavfall med en del gips.

Figure 59. Lumps of hard ash at a depth of 4,5 meters in front of hole 4. The material in the wall consists mainly of industrial waste with some gypsum boards.

5,5-6 meter djupt schakt med vertikal vägg i linje med hål 4



Figur 60. Skiss uppifrån över det utgrävda området ner till 5,5-6 meters djup.

Figure 60. Sketch from above the excavated area down to a depth of 5,5-6 meters.



Figur 61. Utgrävt schakt framför hål 3, 4 och 15 ner till 5,5-6 meters djup.

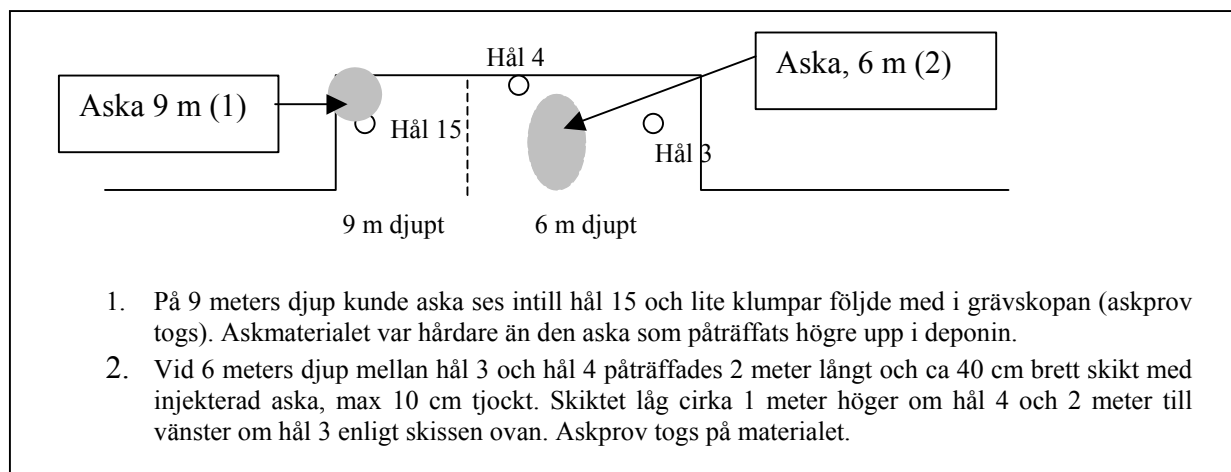
Figure 61. The shaft in front of hole 3, 4 and 15 down to a depth of 5,5-6 meters.



Figur 62. Klumpar av stelnad aska intill hål 15 vid 6 meters djup.

Figure 62. Lumps of hard ash near hole 15 at a depth of 6 meters.

6 meter djupt vid hål 3 och 4 och 9 meters djup vid hål 15



Figur 63. Skiss uppifrån över det utgrävda området ner till 6-9 meters djup.

Figure 63. Sketch from above of the excavated area down to a depth of 6-9 meters.



Figur 64. Foto taget ner i hålet som grävts ut ner till 9 meters djup intill hål 15. Lite klumpar av injekterat askmaterial följde med i grävskopan.

Figure 64. Picture taken down in the excavated hole down to a depth of 9 meters near hole 15. Some lumps of grouted ash was found in the material.

H.4 Utgrävning av testcellen

Testcellen med matavfall, där cirka 24 ton askslurry (17 m^3) injekterats, grävdes ut den 3 februari 2003. Vänster sida av cellen grävdes ut först ner till cellens botten (cirka 6 meter). Materialet i cellen bestod till största delen av svarta plastpåsar och en del jordmaterial. Längst ner i cellen var avfallet ganska blött och det droppade lite om avfallet som togs upp. Ingen aska kunde ses i avfallet som grävdes upp före cirka 5 meters djup. Mellan 4 och 6 meters djup hittades lite aska vid cellens ena vänstra hörn (Figur 65). Två prover togs på injekteringsmaterialet vid cirka 5,7 meters djup. Injekteringsmaterialet hade stelnat till viss del och hade en konsistens som liknade lera, d.v.s. som en fast men mjuk massa.

I den högra delen av cellen kunde ingen aska ses i avfallet eller på cellväggarna ner till cellens botten (cirka 6 m).

Det 6 meter långa injekteringsröret togs upp. 3 meter av röret nertill var fyllt med aska.



Figur 65. Injekterad aska i ena hörnet av testcellen med organiskt avfall.

Figure 65. Grouted ash in one corner of the test cell with organic waste.

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET



VÄRMEFORSK SERVICE AB
101 53 Stockholm
Tel 08-677 25 80
Fax 08-677 25 35
www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35