

# Täckning av deponier med aska och slam

– erfarenheter från tre fältförsök

*Maria Carling  
Märta Ländell  
Karsten Håkansson  
Elke Myrhede*





## VA-Forsk

VA-Forsk är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet. FoU-avgiften är för närvarande 1,05 kronor per kommuninnevånare och år. Avgiften är obligatorisk. Nästan alla kommuner är med i programmet, vilket innebär att budgeten årligen omfattar drygt åtta miljoner kronor.

VA-Forsk initierades gemensamt av Svenska Kommunförbundet och Svenskt Vatten. Verksamheten påbörjades år 1990. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten  
Ledningsnät  
Avloppsvattenrening  
Ekonomi och organisation  
Utbildning och information

VA-Forsk styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

|                               |                     |
|-------------------------------|---------------------|
| Anders Lago, ordförande       | Södertälje          |
| Olof Bergstedt                | Göteborgs VA-verk   |
| Roger Bergström               | Svenskt Vatten AB   |
| Daniel Hellström              | Stockholm Vatten AB |
| Stefan Marklund               | Luleå               |
| Mikael Medelberg              | Roslagsvatten AB    |
| Anders Moritz                 | Linköping           |
| Peter Stahre                  | VA-verket Malmö     |
| Jan Söderström                | Sv Kommunförbundet  |
| Göran Tägtström               | Borlänge            |
| Agneta Åkerberg               | Falkenberg          |
| Steinar Nybruket, adjungerad  | NORVAR, Norge       |
| Thomas Hellström, sekreterare | Svenskt Vatten AB   |

Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

VA-Forsk  
Svenskt Vatten AB  
Box 47607  
117 94 Stockholm  
Tfn 08-506 002 00  
Fax 08-506 002 10  
svensktvatten@svensktvatten.se  
www.svensktvatten.se

*Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.*

|                                                        |                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Rapportens titel:</b>                               | Täckning av deponier med aska och slam – erfarenheter från tre fältförsök                                                                                                                           |
| <b>Title of the report:</b>                            | Covering of landfills with ash and sludge – experiences from three field tests                                                                                                                      |
| <b>Rapportens beteckning<br/>Nr i VA-Forsk-serien:</b> | 2006-08                                                                                                                                                                                             |
| <b>Författare:</b>                                     | Maria Carling, Märta Ländell, Karsten Håkansson, Elke Myrhede, Geo Innova                                                                                                                           |
| <b>VA-Forsk-projektnr:</b>                             | 23-110                                                                                                                                                                                              |
| <b>Projektets namn:</b>                                | Täckning av deponier med blandning av avloppsslam och aska – etapp 2                                                                                                                                |
| <b>Projektets finansiering:</b>                        | VA-Forsk, RVF Utveckling, Vämreforsk, Tekniska Verken i Linköping, SRV Återvinning, Renova                                                                                                          |
| <b>Rapportens omfattning<br/>Sidantal:<br/>Format:</b> | 119<br>A4                                                                                                                                                                                           |
| <b>Sökord:</b>                                         | Tätskikt, aska, slam, beständighet, hydraulisk konduktivitet, fältförsök                                                                                                                            |
| <b>Keywords:</b>                                       | Barrier layer, ashes, sludge, durability, hydraulic conductivity, field tests                                                                                                                       |
| <b>Sammandrag:</b>                                     | Fältförsök i form av provytor med blandning av slam och aska i tätskikt visar att det är möjligt att uppfylla funktionskravet för en icke-farligt avfall deponi.                                    |
| <b>Abstract:</b>                                       | Field tests in the form of test areas using mixtures of sludge and ashes as barrier layers show that it is possible to fulfil the operational requirements for a landfill for non-hazardous wastes. |
| <b>Målgrupper:</b>                                     | Ägare till VA-anläggningar, energianläggningar och deponier (konsulter, miljömyndigheter)                                                                                                           |
| <b>Omslagsbild:</b>                                    | Packning av provyta med tätskikt av slam och aska vid SRV Återvinning. Fotograf: Rickard Wrene                                                                                                      |
| <b>Rapporten beställs från:</b>                        | Finns att hämta hem som pdf-fil från Svenskt Vattens hemsida <a href="http://www.svensktvatten.se">www.svensktvatten.se</a>                                                                         |
| <b>Utgivningsår:</b>                                   | 2006                                                                                                                                                                                                |
| <b>Utgivare:</b>                                       | Svenskt Vatten AB<br>© Svenskt Vatten AB                                                                                                                                                            |

## Förord

En förstudie (år 2001) samt etapp 1 av en huvudstudie (år 2001–2002) visade på både ekonomisk och teknisk potential vad gäller användning av slam och aska som tätskikt på deponier. I denna studie (etapp 2) har fältförsök genomförts med syfte att studera hantering, egenskaper och funktion i större skala.

Rapporten har utarbetats vid Geo Innova av Maria Carling (projektledare), Märta Ländell, Karsten Håkansson och Elke Myrhede. Flera andra har också arbetat i projektet och välvilligt bidragit till rapporten; Magnus Hammar och Marie Wikander, Tekniska Verken i Linköping, Rickard Wrene, SRV Återvinning, Malin Fält, Renova samt professor Bo Svensson, Linköpings universitet.

Projektet har finansierats av Värmeforsk, Svenska Renhållningsverksföreningen (RVF Utveckling), VA-Forsk samt de tre deltagande anläggningarna (Tekniska Verken i Linköping, SRV Återvinning i Huddinge samt Renova i Göteborg).

Till projektet har knutits en referensgrupp som under projekttiden lämnat värdefulla synpunkter. I referensgruppen har ingått Thomas Rihm, RVF, Stig Hård, GRYAAB, Magnus Berg/Karin Ifwer, ÅF, Kenneth Strandljung, Ragn-Sells, Anna Thuresson, VAFAB, Jan Olofsson, Länsstyrelsen Västra Götaland, Ulf Carlsson, Tekniska Verken, Cecilia Våg/Malin Fält, Renova, Rickard Wrene, SRV Återvinning samt Claes Ribbing, Värmeforsk.



# Innehåll

|                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Förord</b>                                                | <b>3</b>  |
| <b>Sammanfattning</b>                                        | <b>7</b>  |
| <b>Summary</b>                                               | <b>8</b>  |
| <b>1 Inledning</b>                                           | <b>9</b>  |
| 1.1 Bakgrund                                                 | 9         |
| 1.2 Beskrivning av forskningsområdet                         | 9         |
| 1.3 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet | 10        |
| 1.4 Mål och målgrupp                                         | 10        |
| 1.5 Genomförande                                             | 10        |
| <b>2 Beskrivning av ingående material</b>                    | <b>10</b> |
| 2.1 Aska                                                     | 11        |
| 2.2 Avloppsslam                                              | 12        |
| 2.3 Utförda undersökningar på ingående material              | 13        |
| <b>3 Egenskaper hos olika blandningar</b>                    |           |
| – laboratorieundersökningar                                  | <b>14</b> |
| 3.1 Provbeteckningar                                         | 14        |
| 3.2 Innehåll av metaller, organiska ämnen och näringsämnen   | 15        |
| 3.3 Vattenkvot, TS-halt och glödförlust                      | 17        |
| 3.4 Torrdensitet                                             | 18        |
| 3.5 Packningskurva                                           | 19        |
| 3.6 Hydraulisk konduktivitet                                 | 20        |
| 3.7 Hållfasthet                                              | 22        |
| 3.8 Ytutlakning                                              | 22        |
| 3.9 Diskussion – val av blandningar                          | 23        |
| <b>4 Provytor – erfarenheter från olika anläggningar</b>     | <b>24</b> |
| 4.1 Praktiskt utförande                                      | 25        |
| 4.2 Utläggning och packning                                  | 29        |
| 4.3 Installation av mätutrustning                            | 31        |
| 4.4 Utläggning av övriga skikt                               | 31        |
| 4.5 Kvalitetssäkring – utförandekontroll                     | 31        |
| 4.6 Arbetsmiljö                                              | 36        |
| 4.7 Prestanda – funktion                                     | 36        |
| 4.8 Kostnadsbedömning                                        | 40        |
| <b>5 Beständighet</b>                                        | <b>41</b> |
| 5.1 Påverkan av syre                                         | 41        |
| 5.2 Buffertkapacitet                                         | 42        |
| 5.3 pH-utveckling                                            | 43        |
| 5.4 Fältstudier vid Furulund                                 | 43        |
| 5.5 Nedbrytning – fältstudier                                | 44        |

|                  |                                                                                                                                               |            |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.6              | Beräkning av nedbrytningshastighet.....                                                                                                       | 44         |
| 5.7              | Diskussion.....                                                                                                                               | 46         |
| <b>6</b>         | <b>Hantering av ammoniak.....</b>                                                                                                             | <b>48</b>  |
| 6.1              | Erfarenheter.....                                                                                                                             | 48         |
| 6.2              | Försök.....                                                                                                                                   | 49         |
| 6.3              | Resultat.....                                                                                                                                 | 49         |
| <b>7</b>         | <b>Sammanfattande slutsatser.....</b>                                                                                                         | <b>50</b>  |
| <b>8</b>         | <b>Rekommendationer.....</b>                                                                                                                  | <b>52</b>  |
| <b>9</b>         | <b>Förslag till fortsatt arbete.....</b>                                                                                                      | <b>52</b>  |
| <b>10</b>        | <b>Referenser.....</b>                                                                                                                        | <b>54</b>  |
| <b>Bilaga A:</b> | <b>Beskrivning av provytornas utformning samt installerad mätutrustning.....</b>                                                              | <b>56</b>  |
| <b>Bilaga B:</b> | <b>Erfarenhetssammanställning från täckning av RGR-cell med aska/slamblandning som tätskikt, Gärsstad deponi hösten 2004.....</b>             | <b>62</b>  |
| <b>Bilaga C:</b> | <b>Erfarenhetssammanställning från anläggande av provyta för sluttäckning med tätskikt av flygaska och rötslam vid Sofielunds deponi.....</b> | <b>66</b>  |
| <b>Bilaga D:</b> | <b>Erfarenheter från täckning med slam och aska på Tagene deponi, Renova 2004–2005.....</b>                                                   | <b>73</b>  |
| <b>Bilaga E:</b> | <b>Ytutlakningsförsök.....</b>                                                                                                                | <b>75</b>  |
| <b>Bilaga F:</b> | <b>Undersökning av åldrat material, Tekniska Verken, september 2005.....</b>                                                                  | <b>83</b>  |
| <b>Bilaga G:</b> | <b>Metallhalter i lysimetrar och avrinningsytor.....</b>                                                                                      | <b>86</b>  |
| <b>Bilaga H:</b> | <b>Undersökning av nedbrytning i tätskikt.....</b>                                                                                            | <b>93</b>  |
| <b>Bilaga I:</b> | <b>Syretillgång och pH – effekter i olika konstruktioner av deponitäckningar.....</b>                                                         | <b>107</b> |
| <b>Bilaga J:</b> | <b>Tolkning av fältprovtagning av markprofiler vid Furulunds slamdeponi, hösten 2003.....</b>                                                 | <b>111</b> |
| <b>Bilaga K:</b> | <b>Förklaring av använda begrepp.....</b>                                                                                                     | <b>118</b> |

## Sammanfattning

Under de närmaste åren kommer ett stort antal deponier att avslutas som en följd av ny miljölagstiftning och höjda krav. Slam och askor är restmaterial med potential att användas som konstruktionsmaterial i deponier. Tidigare studier har visat på både ekonomisk och teknisk potential vad gäller användning av slam och aska som tätskikt på deponier. I denna studie har fältförsök genomförts med syfte att studera hantering, egenskaper och funktion i större skala. Fältförsöken har utförts vid tre olika anläggningar, vilket möjliggjort jämförelser av olika råmaterial och olika metoder för blandning och utläggning.

Projektet har finansierats av Värmeforsk, RVF Utveckling, VA-Forsk samt tre deltagande anläggningar (Tekniska Verken i Linköping, SRV Återvinning i Huddinge samt Renova i Göteborg) och har genomförts av Geo Innova i samarbete med Linköpings Universitet och de tre anläggningarna. Projektet har omfattat dels inledande laboratorieundersökningar på olika blandningar, dels utförande av provtytor samt viss uppföljning av funktionen hos provtytorna. Dessutom har studier gjorts avseende tätskiktens beständighet samt kring hantering av  $\text{NH}_3$ -avgång från slam/aska-blandning.

Sammanfattningsvis visar utförda laboratieförsök att egenskaperna hos olika askor, slam och blandningar varierar avsevärt. Det innebär att det är mycket viktigt att karakterisera både råmaterial och materialblandningar innan de används i fält i större skala. Erfarenheterna från provtytorna pekar på vikten av långsiktig planering för att få tillgång till material. Tre olika metoder för blandning av aska och slam har provats i större skala inom projektet; tvångsblandare, stjärnsikt och trumsikt. Samtliga har fungerat väl, med vissa inkörningsproblem. Utläggning och packning av det färdigblandade materialet har skett med hjälp av grävmaskin som bladade ut materialet, vilket fungerat väl. Väderleken är en viktig faktor för hur väl blandning och utläggning fungerar.

Uppföljning av provytan vid Tekniska Verken under ca ett år visar på ett flöde genom tätskiktet på ca  $12 \text{ l/m}^2 \cdot \text{år}$ , dvs. ytan uppfyller funktionskravet för en deponi för icke-farligt avfall. Mätningar av gassammansättningen i provtyornas olika skikt pekar på att en omsättning sker av det organiska materialet i tätskiktet. Nedbrytning av det organiska materialet behöver dock inte nödvändigtvis leda till en högre hydraulisk konduktivitet, eftersom utfällningar av t.ex.  $\text{CaCO}_3$  kan fungera som tätning av materialet. Ekonomiskt är tätskikt av slam/aska konkurrenskraftigt jämfört med konventionella material. Fortsatt uppföljning av provtytorna är angeläget för att bekräfta erhållna resultat avseende hydraulisk konduktivitet och beständighet.

Sammanfattningsvis bedöms tätskikt av slam och aska ha förutsättningar att fungera väl, förutsatt att vissa kvalitetskrav avseende råmaterial och utförande uppfylls. Det gäller t.ex. pH i blandningen som måste vara högt ( $\text{pH} > 11$ ) för att förhindra nedbrytning av det organiska materialet.

## Summary

In the coming years a large number of landfills will be closed as a result of new environmental regulations and more stringent requirements. Sludge and ash are wastes which could potentially be used as construction material. Previous studies have showed that there are both economic and technical advantages associated with the use of sludge and ash as a barrier layer on landfills. In this study, field tests have been performed with the aim of studying operational methods, properties and effectiveness associated with using sludge and ash on a larger scale. The field tests were carried out at three different plants.

The project has been financed by *Värmeforsk*, *RVF Utveckling*, *VA-Forsk*, as well as three participating plants (*Tekniska Verken* in Linköping, *SRV Återvinning* in Huddinge and *Renova* in Gothenburg). It has been managed by Geo Innova in cooperation with Linköping University and the three participating plants. The project has comprised initial laboratory investigations of different mixtures, construction of experimental areas, and monitoring of the operational effectiveness of the test areas. In addition, studies have been made of both the durability of the mixtures, and the management of  $\text{NH}_3$  emissions from the mixtures.

In general, the laboratory tests show that the properties of ash, sludge and mixtures vary considerably. This underlines the great importance of characterising both the raw materials and the mixtures prior to using them on a larger scale. Experience from the test areas indicates the importance of long-term planning so as to ensure availability of material. Different mixing and screening devices for mixing the ash and sludge have been tested on a large scale. Despite some initial problems, all methods worked well. The prepared mixtures were spread out over the test areas and compacted by means of excavator with a grading attachment.

Monitoring of the test area at *Tekniska Verken* for a period of one year shows a flow of  $12 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$  through the barrier layer; in other words the area fulfils the operational requirements for a landfill for non-toxic wastes. Analysis of the composition of the gas in the different layers of the test areas indicate that the organic material in the barrier layer is being degraded. Degradation of the organic material does not necessarily lead to a higher hydraulic conductivity, since precipitation of e.g. calcium carbonate, can act as a sealing agent. The use of sludge/ash as a barrier layer is economically competitive compared to conventional materials. Further investigations of the test areas are essential in order to verify the observed results, particularly as regards permeability and durability.

To sum up, barrier layers made of ash and sludge are supposed to work well, provided that specific quality requirements regarding raw materials and performance are fulfilled. This includes e.g. pH in the mixture which has to be high ( $\text{pH} > 11$ ) to prevent degradation of the organic matter.

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Under de närmaste åren kommer ett stort antal deponier att avslutas som en följd av ny miljölagstiftning och höjda krav. Tillgången på lämpliga material för täckning och tätning är begränsad, framför allt i storstadsregionerna. Slam och askor är restmaterial med potential att användas som konstruktionsmaterial. Ett kvalitativt sätt att använda slam och aska är att utnyttja deras goda tekniska egenskaper såsom låg permeabilitet (slam) och god bärighet (aska). En förstudie (Sundberg & Nilsson 2001) samt etapp 1 av en huvudstudie (Sundberg *et al.* 2002) visade på både ekonomisk och teknisk potential vad gäller användning av slam och aska som tätskikt på deponier.

Den inventering av erfarenheter som gjordes i etapp 1 visade på ett flertal projekt där man med gott resultat använt enbart slam eller slam med inblandning av något stabiliserande material som täckning på deponier (Sundberg *et al.* 2002). Uppmätt permeabilitet visade på låg genomsläpplighet för flertalet material,  $10^{-9}$ – $10^{-11}$  m/s. En av de viktigaste frågeställningarna är materialets beständighet. För att aska/slam-blandningen ska klara de funktionskrav som ställs på ett tät- eller tätskiktsmaterial även i ett längre tidsperspektiv, krävs att nedbrytningen av det organiska materialet sker mycket långsamt eller att en viss porositetsökning kan motverkas genom omlagring av materialet. De undersökningar som utfördes under etapp 1 pekade på ett mycket långsamt nedbrytningsförlopp i anaerob miljö. Områden som pekades ut som intressanta att studera vidare var bl.a. variationerna mellan olika askor och slam och hur dessa påverkar blandningarnas egenskaper, lämpliga blandningsförhållanden, metoder för utläggning och packning, permeabilitet i fält, möjliga släntlutningar, syrenedträngning i täckningen samt utlakning av näringsämnen, metaller och organiska ämnen.

## 1.2 Beskrivning av forskningsområdet

Intresset för att använda blandningar av slam och aska som material för täckning av deponier har ökat under de senaste åren. Flera andra projekt (med andra aktörer, men med delvis samma finansiärer) som studerat angränsande frågeställningar, har pågått parallellt med detta projekt. Projekten har kompletterat varandra. Dessa parallella projekt beskrivs kortfattat nedan:

### ***Pilotförsök med flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) som tätskikt (Máscik et al. 2005)***

Vid Dragmossen deponi i Älvkarleby kommun utfördes pilotförsök med tillverkning och utläggning av s.k. FSA i tätskiktet på försommaren 2004. Fältförsöket visar att FSA-material kan användas som tätskikt, förutsatt att de ingående materialerna klara uppställda kvalitetskrav. Efter ett års uppföljning är flödet genom tätskiktet lågt,  $< 5 \text{ l/m}^2 \cdot \text{år}$  på stora delar av provytan. Utförda försök i fält och laboratorium indikerar en god beständighet med avseende på nedbrytning av organiskt material.

### ***Nedbrytningshastigheten för tätskikt uppbyggda av slam och aska (Wikman et al. 2005)***

I projektet har nedbrytningen av organiskt material för två olika blandningar av slam och aska studerats med hjälp av laboratorieförsök. Resultaten tyder på att aska-slam-blandningar kan användas som tätskikt på deponier utan att nedbrytningen av organiskt material kommer att påverka täckningens funktion negativt.

### ***Flygaska och rötslam som tätskikt med efterbehandling av sandmagasin med vegetationsetablering (Greger 2005)***

Projektet studerar vilken inverkan ett tätskikt av slam och aska har på rotpenetration, syrediffusion samt läckage av metaller och näringsämnen. Olika aska/slam-blandningar undersöks dels i fält, dels i lysimetrar.

### 1.3 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

Etapp 1 av huvudstudien (Sundberg *et al.* 2002) visade på en stor ekonomisk och teknisk potential för användning av blandningar av slam och aska som tätskikt på deponier. För att en mer allmän användning skall bli aktuell krävs mer praktisk erfarenhet och systematisk dokumentation av erfarenheterna. I etapp 2 (denna studie) har därför fältförsök genomförts med syfte att studera hantering, egenskaper och funktion i större skala. Fältförsöken har utförts vid tre olika anläggningar, vilket möjliggjort jämförelser av olika råmaterial och olika metoder för blandning och utläggning.

Projektet har finansierats av Värmeforsk, RVF Utveckling, VA-Forsk samt tre deltagande anläggningar (Tekniska Verken i Linköping, SRV Återvinning i Huddinge samt Renova i Göteborg).

### 1.4 Mål och målgrupp

Det övergripande målet med projektet har varit att bana väg för bättre resursutnyttjande av avlopsslam och aska från förbränning av biobränslen, där materialens goda tekniska egenskaper tas till vara, samtidigt som andra ändliga materialresurser kan sparas.

Syftet med denna studie (etapp 2) har varit att ta fram lämpliga blandningar av slam och aska, undersöka det praktiska handhavandet i fält samt att verifiera och kvantifiera hydrauliska egenskaper och långsiktig beständighet. Ett annat syfte har varit att studera hur eventuella problem med ammoniakavgång kan hanteras. Målsättningen är att resultaten från projektet ska kunna utgöra underlag för rekommendationer både för utformning av tätskiktsskonstruktioner och för blandningsförfarande, utläggning och packning.

Målgrupp för projektet är ägare till VA-anläggningar (slamproducent), energianläggningar (askproducent) och deponier (användare/konsument). Kommunerna är ofta huvudman för både reningsverk, energianläggningar och deponi, vilket innebär att slammet och askan kan få avsättning inom den egna verksamheten.

### 1.5 Genomförande

Projektet har utförts i samarbete mellan Geo Innova, Linköpings Universitet, Tekniska Verken i Linköping, Renova samt SRV Återvinning. En referensgrupp bestående av representanter för finansörerna har också funnits. Projektet har omfattat dels inledande laboratorieundersökningar på olika blandningar, dels utförande av provytor på de tre anläggningarna samt viss uppföljning av funktionen hos provytorna. Uppföljningen av provytorna har varierat i tid vid de olika anläggningarna och haft olika omfattning. Dessutom har mindre studier gjorts av materialblandningarnas beständighet samt återvinning av näringsämnen från slammet.

I Bilaga K förklaras vissa av de begrepp som används i rapporten.

## 2 Beskrivning av ingående material

Slam och aska från olika anläggningar kan ha högst varierande egenskaper, vilket visats av bland annat Mascik m.fl. (2004), Bjurström m.fl. (2003) samt Arvidsson och Loorents (2005). Inom Värmeforsk har en databas, ALLASKA, sammanställts där olika askors egenskaper redovisas.

I tabell 2-1 (nedan) redovisas de material som använts vid de inledande laboratieförsöken samt vid byggandet av provytor. För SRVs försök användes slam från olika anläggningar, beroende på att tillgången på rötat slam förändrades. Likaså varierade askans sammansättning mellan projektets olika moment (se vidare Bilaga C). Från Tekniska Verken utfördes laboratorieundersökningar på två olika typer av slam, dels ett färskt slam, dels ett som lagrats utomhus i 2–3 år (deponerats) och därmed varit fryst. Materialen valdes ut utifrån vad som fanns tillgängligt i närheten av respektive anläggning. Tekniska Verken hade tillgång till eget material inom företaget, vilket visade sig bra, eftersom både SRV och Renova hade vissa problem att få tag på lämpligt material. Ur miljösynpunkt (utlakning) valdes i första hand

Tabell 2-1. Använda material i projektet.

| Anläggning                 | Aska                                       | Förbränningsanläggning            | Slam                                                                                        |
|----------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tekniska Verken, Linköping | Flygaska kol/gummi                         | KV1 P1, Linköping (rostereldning) | Rötat avloppsslam, Nykvarn (Linköping)<br>1) färskt<br>2) åldrat ca 2–3 år (frys/deponerat) |
| SRV Återvinning, Huddinge  | Flygaska returflis<br>Bottenaska returflis | BFB<br>Fortum Värme, Nynäshamn AB | Rötat avloppsslam,<br>1) Käppalaverket (Lidingö)<br>2) Himmerfjärdsverket (Grödinge)        |
| Renova, Göteborg           | Flygaska, pellets av "nytt" trä            | Göteborg Energi, pulverbrännare   | Rötat avloppsslam, Ryaverket (Göteborg)                                                     |

askor från förbränning av trä (undantaget Tekniska Verken).

Inom ramen för respektive anläggnings kontrollprogram har materialen analyserats på ett urval parametrar, vilket redovisas nedan.

## 2.1 Aska

I tabell 2-2 redovisas ett urval av ämnen för respektive aska (medelhalter alternativt intervall från

Tabell 2-2. Innehåll av spårämnen i flygaska (FA) samt bottenaska (BA) som används i projektet jämfört med andra träaskor.

| Ämne | Enhet    | Göteborg Energi (träpellets) | Fortum Värme Nynäshamn AB (FA RT-flis) | Fortum Värme Nynäshamn AB (BA RT-flis) <sup>3</sup> | TVAB 2002–2003 (FA kol/gummi/trä) | FA-trä-bränsle <sup>1</sup> | FA-returträ <sup>1</sup> |
|------|----------|------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Si   |          | 2,35 vikt-% <sup>2</sup>     | 9,4 % TS                               |                                                     | –                                 |                             |                          |
| Al   |          | 0,69 vikt-% <sup>2</sup>     | 3,1 % TS                               |                                                     | –                                 |                             |                          |
| Ca   |          | 23,5 vikt-% <sup>2</sup>     | 22 % TS                                |                                                     | –                                 |                             |                          |
| Fe   |          | 0,87 vikt-% <sup>2</sup>     | 2,2 % TS                               |                                                     | –                                 |                             |                          |
| K    |          | 10,1 vikt-% <sup>2</sup>     | 2,4 % TS                               |                                                     | –                                 |                             |                          |
| Mg   |          | 4,76 vikt-% <sup>2</sup>     | 1,9 % TS                               |                                                     | –                                 |                             |                          |
| Mn   |          | 2,30 vikt-% <sup>2</sup>     | 0,26 % TS                              |                                                     | –                                 |                             |                          |
| Na   |          | 0,61 vikt-% <sup>2</sup>     | 1,4 % TS                               |                                                     | –                                 |                             |                          |
| P    |          | 0,94 vikt-% <sup>2</sup>     | 0,33 % TS                              |                                                     | –                                 |                             |                          |
| Ti   |          | 0,03 vikt-% <sup>2</sup>     | 2,3 % TS                               |                                                     | –                                 |                             |                          |
| Ba   |          | 0,18 vikt-% <sup>2</sup>     | 0,5 % TS                               |                                                     | 0,06 % TS                         |                             |                          |
| As   | mg/kg TS | <20 <sup>2</sup>             | 3 180                                  | 155                                                 | 23                                | 1,7–134                     | 231–990                  |
| B    | mg/kg TS | –                            | 380                                    | –                                                   | –                                 | 168–500                     |                          |
| Cd   | mg/kg TS | 12 <sup>2</sup>              | 40                                     | 0,50                                                | 8,20                              | 3–33                        | 36–112                   |
| Co   | mg/kg TS | 5 <sup>2</sup>               | 55                                     | –                                                   | 250                               |                             |                          |
| Cr   | mg/kg TS | 33 <sup>2</sup>              | 2 680                                  | 386                                                 | 51                                | 17–180                      | 120–744                  |
| Cu   | mg/kg TS | 141 <sup>2</sup>             | 2 760                                  | 2920                                                | 280                               | 29–306                      | 380–6 100                |
| Hg   | mg/kg TS | –                            | 3,8                                    | 0,01                                                | 0,54                              | 0,1–2,7                     | 2,9–15                   |
| Mo   | mg/kg TS | <10 <sup>2</sup>             | 11                                     | –                                                   | 5,4                               |                             |                          |
| Ni   | mg/kg TS | 19 <sup>2</sup>              | 95                                     | 32                                                  | 63                                | 7–100                       | 35–201                   |
| Pb   | mg/kg TS | 40 <sup>2</sup>              | 3 860                                  | 685                                                 | 570                               | 17–386                      | 1 500–11 800             |
| Sb   | mg/kg TS | –                            | –                                      | 46                                                  | 54                                |                             |                          |
| Se   | mg/kg TS | –                            | –                                      | –                                                   | 15                                |                             |                          |
| V    | mg/kg TS | 9 <sup>2</sup>               | 69                                     | 52                                                  | –                                 | 10–106                      | 48–80                    |
| Zn   | mg/kg TS | 2 050 <sup>2</sup>           | 19 600                                 | 5740                                                | 47 800                            | 420–3 400                   | 8 660–37 100             |

<sup>1</sup> Från (Bjurström *et al.* 2003). Observera att underlaget är begränsat (ett fåtal anläggningar med olika typer av förbränningsprocess).

<sup>2</sup> Analyserna har utförts på prov inaskat på laboratorium.

<sup>3</sup> Analys höst 2004 i Värmeforsk-projekt (Bjurström & Wikman 2005).

kontrollprogram på respektive anläggning), jämfört med ”normala” värden från litteraturen. Egenskaperna hos askan varierar beroende på bl.a. bränsle (och ursprung), förbränningstyp och driftsbetingelser.

För organiska ämnen saknas data.

## 2.2 Avloppsslam

I tabell 2-3 redovisas halten av några utvalda spårämnen i avloppsslam (Eriksson 2001). Av rapporten framgår inte om de analyserade slamproven utgörs av rötat avloppsslam eller avloppsslam som behandlats

på annat sätt. En jämförelse visar att de här använda slammen med hänsyn till metallinnehåll är representativa för svenska reningsverk.

Organiska ämnen i avloppsslam finns beskrivet bl.a. i Naturvårdsverkets rapport 5217 (Samsøe-Petersen 2003). I rapporten beskrivs ett antal ämnesgrupper som är intressanta ur föroreningsynpunkt vid användning av avloppsslam på åkermark. I tabell 2-4 sammanfattas resultat från en svensk undersökning m a p organiska föroreningar i avloppsslam. Endast ett fåtal ämnen har analyserats både i undersökningen av Samsøe-Petersen (2003) och inom ramen för de olika anläggningarnas kontrollprogram, varför en jämförelse av halterna är svår att göra.

Näringsämnena och fysikalisk-kemiska parametrar från tidigare undersökningar, redovisas i tabell 2-5.

Tabell 2-3. Uppmätta halter av spårämnen i avloppsslam från GRYAAB, Käppala samt Tekniska Verken, jämfört med ”normala” halter i avloppsslam från svenska reningsverk (angivet som 10 resp 90 % percentil, (Eriksson 2001)). Analyser av Tekniska Verkens deponerade slam avser förhållandena då slammet ”producerades”.

| Ämne | Enhet    | GRYAAB<br>(apr 2003–<br>feb 2004)<br>medelhalt | Käppala,<br>(jan–sep<br>2003)<br>medelhalt | TVAB<br>Färskt rötslam<br>(aug 2002 + jan<br>2003) | TVAB<br>Deponerat/fryst<br>rötslam (sep<br>2000–jan 2001) | Svenska<br>reningsverk |
|------|----------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------|
| Ag   | mg/kg TS | 5,5                                            |                                            | 3,8                                                | 9,7                                                       | –                      |
| As   | mg/kg TS | 4,8                                            | –                                          | –                                                  | –                                                         | 2,5–7,5                |
| B    | mg/kg TS | 11                                             | 17                                         | –                                                  | –                                                         | 8–150                  |
| Cd   | mg/kg TS | 1,0                                            | 0,9                                        | 1,5                                                | 1,2                                                       | 0,78–1,7               |
| Co   | mg/kg TS | 9,9                                            |                                            | 7,7                                                | 7,9                                                       | –                      |
| Cr   | mg/kg TS | 28                                             | 20                                         | 20                                                 | 12                                                        | 14–54                  |
| Cu   | mg/kg TS | 403                                            | 379                                        | 300                                                | 290                                                       | 140–570                |
| Hg   | mg/kg TS | 1,0                                            | 1,0                                        | 0,52                                               | 0,65                                                      | 0,4–1,8                |
| Ni   | mg/kg TS | 25                                             | 17                                         | 18                                                 | 19                                                        | 9–26                   |
| Pb   | mg/kg TS | 34                                             | 22                                         | 26                                                 | 43                                                        | 17–45                  |
| V    | mg/kg TS | –                                              | –                                          | –                                                  | –                                                         | 5–37                   |
| Zn   | mg/kg TS | 623                                            | 503                                        | 540                                                | 660                                                       | 320–700                |
| TS   | %        | 31,0                                           | 19,2                                       | 31                                                 | 24                                                        | 16–27                  |

Tabell 2-4. Organiska ämnen i avloppsslam i Sverige 2001 (Samsøe-Petersen 2003). Medelvärde från 19 prov (50 prov för bromerade flamskyddsmedel) från avloppsreningsverk. Halter i mg/kg TS.

| Ämnesgrupp                            | GRYAAB<br>(2003–<br>2004) | Käppala<br>(2003) | TVAB<br>Färskt<br>(aug 2002 +<br>jan 2003) | TVAB<br>Deponerat/fryst<br>(sep 2000–jan<br>2001) | Svenska<br>renings-<br>verk<br>2001 |
|---------------------------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------|
| PAH                                   | 1,5                       | 0,8               | 0,55                                       | 2                                                 | 1,1                                 |
| PCB                                   | 0,047                     | 0,06              | 0,045                                      | 0,050                                             | –                                   |
| 4–nonylfenol                          | 26                        | 24                | 28                                         | 23                                                | 3,9*                                |
| Bromerade flamskyddsmedel             | –                         | –                 | –                                          | –                                                 | 0,47                                |
| Klorerade paraffiner                  | –                         | –                 | –                                          | –                                                 | <2,0                                |
| Klorbensener                          | –                         | –                 | –                                          | –                                                 | <0,28                               |
| Klorfenoler                           | –                         | –                 | –                                          | –                                                 | <0,9                                |
| DEHP (di–2–(etylhexyl) ftalat)        | –                         | –                 | –                                          | –                                                 | 6,6                                 |
| EDTA                                  | –                         | –                 | –                                          | –                                                 | 3,8                                 |
| EOX                                   | –                         | –                 | –                                          | –                                                 | 6,1                                 |
| LAS (linjära alkyl bensen sulfonater) | –                         | –                 | –                                          | –                                                 | 252                                 |
| Organiska tennföreningar              | –                         | –                 | –                                          | –                                                 | 0,65                                |
| PCDD/PCDF (dioxiner o furaner)        | –                         | –                 | –                                          | –                                                 | 0,0013                              |
| Perfluorooktansulfonat                | –                         | –                 | –                                          | –                                                 | 0,08                                |
| Ftalater                              | –                         | –                 | –                                          | –                                                 | 7,3                                 |
| triklosan                             | –                         | –                 | –                                          | –                                                 | 1,2                                 |

\* medel år 1998 var 23 mg/kg TS.

Tabell 2-5. Innehåll av kväve och fosfor samt pH och glödförlust för de olika rötslammen.

| Ämne       | Enhet   | GRYAAB<br>(apr 2003–feb 2004)<br>medelhalt | Käppala<br>(jan–sep 2003)<br>medelhalt | TVAB<br>Färskt slam (aug<br>2002 + jan 2003) | TVAB<br>Deponerat/fryst slam<br>(sep 2000– jan 2001) |
|------------|---------|--------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| N–tot      | g/kg TS | 40                                         | 37                                     | 39                                           | 36                                                   |
| NH4–N      | g/kg TS | 10                                         | 13                                     | 10                                           | 8,1                                                  |
| P–tot      | g/kg TS | 28                                         | 49                                     | 32                                           | 35                                                   |
| pH         |         | 8,0                                        | 7,6                                    | 8,2                                          | 7,9                                                  |
| GF (550°C) | % av TS | 53                                         | 65                                     | 61                                           | 60                                                   |

## 2.3 Utförda undersökningar på ingående material

Enstaka kompletterande laboratorieundersökningar har inledningsvis utförts på de ingående materialen. På askorna har TS, kompktdensitet och kornstorleksfördelning undersökts och i något fall också pH. På slam från Tekniska Verken och SRV (från Käppala-verket) har TS och kompktdensitet (korndensitet) undersökts medan endast TS uppmätts på slam från Renova (Ryaverket, GRYAAB).

### Resultat

Vattenkvot för ursprungsmaterialen har analyserats och räknats om till TS-halt, se tabell 2-6 (nedan). För samtliga askor är TS-halten hög. TS-halten för slammen varierar mellan 17 och 34 %. I tabell 2-6 redovisas även uppmätt kompktdensitet. Osäkerheten i resultat är större hos slammen än hos askorna. Askorna från Tekniska Verken och SRV har ungefär lika kompktdensitet. Observera att askorna av praktiska skäl varit befuktade vid senare fältförsök, vilket medfört en lägre TS-halt. Även vid de kompletterande laboratorieförsök som utfördes våren 2005 på material från Renova, var askan befuktad.

Tabell 2-6. TS-halt och kompaktdensitet för ingående material, laboratorieförsök höst 2003.

| Material                | Slam   |       |                                       | Aska   |       |                                       |
|-------------------------|--------|-------|---------------------------------------|--------|-------|---------------------------------------|
|                         | TS (%) | w (%) | Kompaktdensitet (ton/m <sup>3</sup> ) | TS (%) | w (%) | Kompaktdensitet (ton/m <sup>3</sup> ) |
| TV färskt slam          | 26     | 291   | 1,85                                  |        |       |                                       |
| TV fryst/deponerat slam | 34     | 193   | 2,02*                                 |        |       |                                       |
| TV aska                 |        |       |                                       | 98     | 2,0   | 2,49                                  |
| SRV slam                | 17     | 496   | 1,77                                  |        |       |                                       |
| SRV aska                |        |       |                                       | 99     | 0,4   | 2,45                                  |
| RE slam                 | 30     | 233   | –                                     |        |       |                                       |
| RE aska                 |        |       |                                       | 100    | 0     | 2,82                                  |

\* stor spridning.

pH i aska från Tekniska Verken och den aska som SRV använde i labförsöken var ca 12, se tabell 2-7.

Tabell 2-7. pH och glödförlust i askor använda i labförsök.

| Material | pH   | GF, 550 °C (% av TS) |
|----------|------|----------------------|
| TV aska* | 12   | 24                   |
| SRV aska | 12,4 | –                    |
| RE aska  | –    | –                    |

\* medel 2002–2003.

Undersökning av kornstorleksfördelning på flygaskorna har utförts som tvättsiktning. Renovas flygaska (Göteborgs Energi) innehåller mindre andel finmaterial än flygaska från Tekniska Verken och SRV Återvinning (Fortum Värme). Samtliga flygaskor har en hög andel material motsvarande finjord (silt- och lerfraktion), mellan 70 och 80 % utgörs av material <0,063 mm.

Vid de inledande laboratorieförsöken (hösten 2003) var den flygaska som användes för SRV Återvinnings blandningar en ren flygaska-fraktion. Vid fältförsöken sommaren 2005 ingick även den s.k. ecoaskan i fraktionen med flygaska. Den bottenaska som ingick i materialblandningen vid fältförsöken vid SRV Återvinning hade en grov struktur, där ca 90% utgjordes av material i kornstorleken 2–8 mm.

### 3 Egenskaper hos olika blandningar – laboratorieundersökningar

I syfte att få fram en blandning med lämpliga proportioner av slam/aska utfördes inledningsvis en rad olika laboratorieundersökningar på material från de tre olika anläggningarna.

#### 3.1 Provbeteckningar

Vid samtliga laboratorieförsök och analyser har följande beteckningar (tabell 3-1) använts för de olika blandningarna (se också tabell 2-1). Blandningsproportionerna är angivna som % av TS. Efter utvärdering av inledande försök, utfördes kompletterande undersökningar av ytterligare några blandningar. Dessa blandningar är markerade kursivt i tabellen. Bl.a. gjordes försök med inblandning av bottenaska i SRV:s blandning för att förbättra hållfasthetsegenskaperna.

Tabell 3-1. Provbeteckningar på blandningar. Kursiverade blandningar avser komplement där endast ett urval undersökningar utförts.

| Provbeteckning         |                                                |                         |
|------------------------|------------------------------------------------|-------------------------|
| <b>Tekniska Verken</b> |                                                |                         |
| Material               | 1 flygaska + 2 slam (färskt + deponerat/fryst) |                         |
| Blandning              | 40 % flygaska + 60 % slam (färskt)             | TV40                    |
|                        | 50 % flygaska + 50 % slam (färskt)             | TV50                    |
|                        | 60 % flygaska + 40 % slam (färskt)             | TV60                    |
|                        | 40 % flygaska + 60 % slam (fryst/deponerat)    | TV40fr                  |
|                        | 50 % flygaska + 50 % slam (fryst/deponerat)    | TV50fr                  |
|                        | 60 % flygaska + 40 % slam (fryst/deponerat)    | TV60fr                  |
| <b>Renova</b>          |                                                |                         |
| Material               | 1 flygaska + 1 slam                            |                         |
| Blandning              | 40 % flygaska + 60 % slam                      | RE40                    |
|                        | 50 % flygaska + 50 % slam                      | RE50                    |
|                        | 60 % flygaska + 40 % slam                      | RE60                    |
|                        |                                                |                         |
|                        | 30 % flygaska + 70 % slam                      | RE30 (-05) <sup>1</sup> |
|                        | 40 % flygaska + 60 % slam                      | RE40 (-05) <sup>1</sup> |
| <b>SRV Återvinning</b> |                                                |                         |
| Material               | 1 flygaska + 1 slam (+ 1 bottenaska)           |                         |
| Blandning              | 40 % flygaska + 60 % slam                      | SRV40                   |
|                        | 50 % flygaska + 50 % slam                      | SRV50                   |
|                        | 60 % flygaska + 40 % slam                      | SRV60                   |
|                        |                                                |                         |
|                        | 30 % flygaska + 40 % bottenaska + 30 % slam    | SRV30-40 <sup>2</sup>   |
|                        | 40 % flygaska + 40 % bottenaska + 20 % slam    | SRV40-40 <sup>2</sup>   |
|                        | 40 % flygaska + 45 % bottenaska + 15 % slam    | SRV40-45 <sup>2</sup>   |
|                        | 40 % flygaska + 50 % bottenaska + 10 % slam    | SRV40-50 <sup>2</sup>   |

<sup>1</sup> askan för dessa kompletterande provblandningar var befuktad och provtogs från lagrad hög utomhus.

<sup>2</sup> askorna för dessa kompletterande provblandningar var torra och togs direkt från askutmatning.

### 3.2 Innehåll av metaller, organiska ämnen och näringsämnen

De olika blandningarna har analyserats med avseende på metaller, glödförlust, organiska ämnen och näringsämnen. Analyserna har utförts av Analytica. De organiska ämnena avser mineralolja, PCB, klorerade pesticider, PAH, BTEX, klorerade alifater samt klorfenoler. Analys av organiska ämnen har endast utförts på en blandning från respektive anläggning (50 % aska, 50 % slam).

#### Resultat

För flertalet av de analyserade organiska ämnena är halterna under rapporteringsgränsen. I tabell 3-2 (nedan) listas ämnen där något prov uppvisar halter över rapporteringsgränsen. I dagsläget saknas relevanta riktvärden för användning av material, men halterna är generellt låga eller mycket låga, undantaget tyngre oljefraktioner i blandning från SRV.

Även halterna av metaller är i flertalet fall förhållandevis låga, se tabell 3-3. Några undantag finns, där är metallhalterna mycket höga i blandningarna, vilket bedöms beror på de höga halterna av vissa metaller i de nyttjade askorna. En ökad andel aska ger i flertalet fall också högre metallhalter i blandningen.

Tabell 3-2. Organiska ämnen där något prov har halter över rapporteringsgränsen. Halt i mg/kg TS.

|                     | RE50   | SRV50  | TV50fr | TV50   |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| Fraktion >C10-C12   | 37     | 14     | 110    | 24     |
| Fraktion >C12-C16   | 240    | 110    | 280    | 85     |
| Fraktion >C16-C35   | 560    | 3 200  | 1000   | 470    |
| S:a xylener         | <0,050 | <0,050 | <0,050 | 0,17   |
| S:a TEX             | <0,085 | <0,085 | <0,09  | 0,84   |
| S:a PAH cancerogena | 0,33   | 0,054  | 1,0    | <0,070 |
| S:a PAH övriga      | 1,7    | 0,31   | 14     | 4,8    |
| 2-monoklorfenol     | <0,020 | <0,020 | <0,020 | 0,034  |
| 2,4-diklorfenol     | <0,040 | <0,040 | <0,040 | 0,052  |

Tabell 3-3. Metallhalter (mg/kg TS) i blandningar av aska och slam från Tekniska Verken, Renova och SRV. Från Tekniska Verken har både blandning med färskt och med fryst/deponerat slam undersökts.

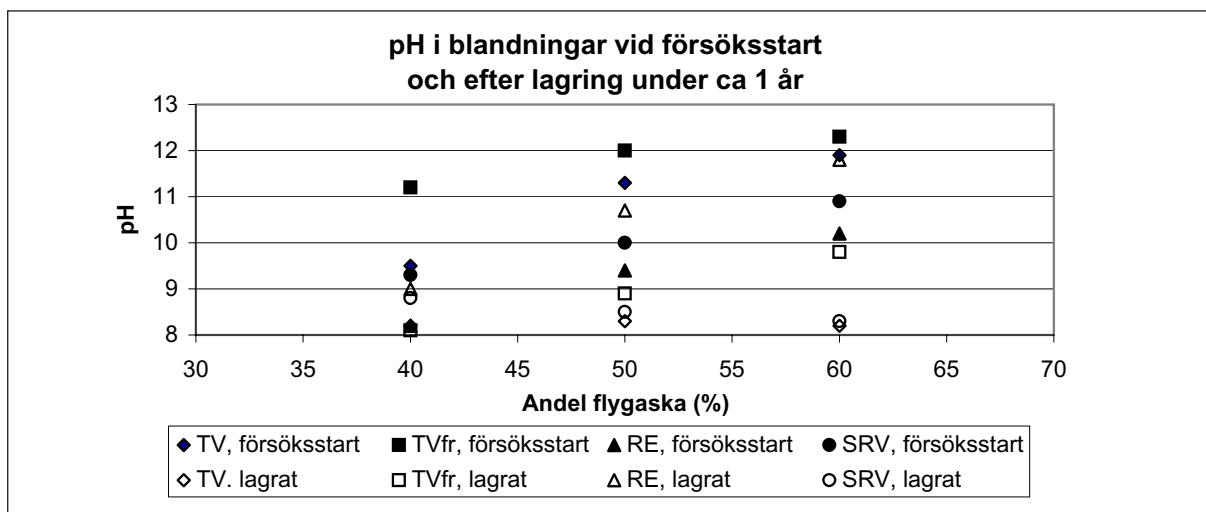
|    | TV40   | TV50   | TV60   | TV40fr | TV50fr | TV60fr |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| As | 21     | 14     | 20     | 24     | 17     | 20     |
| Cd | 6,2    | 4,9    | 7,2    | 5,7    | 6,1    | 7,2    |
| Cr | 82     | 97     | 86     | 80     | 91     | 78     |
| Cu | 409    | 352    | 397    | 343    | 319    | 328    |
| Pb | 371    | 311    | 434    | 328    | 397    | 465    |
| Sb | –      | –      | –      | –      | –      | –      |
| Zn | 10 800 | 13 900 | 14 000 | 10 600 | 14 400 | 17 500 |

|    | RE40 | RE50 | RE60 | SRV40 | SRV50 | SRV60 |
|----|------|------|------|-------|-------|-------|
| As | –    | <3   | –    | 450   | 610   | 821   |
| Cd | –    | 6,0  | –    | 7,09  | 8,1   | 11,45 |
| Cr | –    | 51   | –    | 549   | 310   | 816,5 |
| Cu | –    | 300  | –    | 781,5 | 950   | 1 010 |
| Pb | –    | 19   | –    | 568,5 | 720   | 915   |
| Sb | –    | –    | –    | 29,5  | –     | 49,3  |
| Zn | –    | 1430 | –    | 3 100 | 3 400 | 4 675 |

Tabell 3-4. pH och halt av kväve och fosfor (% av TS) vid försöksstart, samt pH efter ca ett års lagring (med visst lufttillträde). Laboratorieblandade prover.

|                      |       | TV40 | TV50 | TV60 | TV40fr | TV50fr | TV60fr |
|----------------------|-------|------|------|------|--------|--------|--------|
| <b>Försöksstart</b>  | pH    | 9,5  | 11,3 | 11,7 | 11,2   | 12,0   | 12,3   |
|                      | N-tot | 2,4  | 0,99 | 0,90 | 1,2    | 0,83   | 0,76   |
|                      | P-tot | 2,1  | 1,6  | 1,6  | 1,7    | 1,8    | 1,1    |
| <b>Efter lagring</b> | pH    | 8,2  | 8,3  | 8,2  | 8,1    | 8,9    | 9,8    |

|                      |       | RE40 | RE50 | RE60 | SRV40 | SRV50 | SRV60 |
|----------------------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| <b>Försöksstart</b>  | pH    | 8,2  | 9,4  | 10,2 | 9,3   | 10,0  | 10,9  |
|                      | N-tot | –    | 1,2  | –    | 3,0   | 2,3   | 1,8   |
|                      | P-tot | –    | 1,84 | –    | 3,2   | 2,4   | 2,1   |
| <b>Efter lagring</b> | pH    | 9,0  | 10,7 | 11,8 | 8,8   | 8,5   | 8,3   |



Figur 3-1. pH i laboratorieblandningar vid försöksstart samt efter ca 1 års lagring.

I tabell 3-4 och figur 3-1 (ovan) redovisas pH samt innehållet av kväve och fosfor i blandningarna vid försöksstart samt pH efter omkring ett års lagring. Lagringen skedde i rumstemperatur i vanliga plastpåsar (ej diffusionstäta). Blandningarna med deponerat/fryst slam har ett högt pH, omkring 11–12. Lägst pH (pH 9,5) av Tekniska Verkens blandningar har blandningen med 60 % färskt slam och 40 % aska (TV40). Blandningarna från Renova och SRV har generellt lägre pH. För blandningarna från Tekniska Verken och SRV har pH sjunkit kraftigt under lagringen, vilket beror på reaktion med koldioxid (från luften och från nedbrytning av organiskt material) och bildandet av kalciumkarbonat. För att förhindra att pH sjunker i blandningen är det därför viktigt både att förhindra lufttillträde och att nedbrytning påbörjas (se vidare under avsnitt 5.3).

### 3.3 Vattenkvot, TS-halt och glödförlust

Vattenkvot, TS-halt och glödförlust har analyserats som komplement till övriga miljötekniska analyser enligt gängse metoder. Analyserna är utförda både av SGI och Analytica.

#### Resultat

TS-halt och glödförlust vid "naturliga förhållanden" har analyserats i två–tre prov av respektive blandning, se tabell 3-5. Proverna är uttagna från samma blandningstillfälle, men av tabellen framgår att TS-halt och glödförlust varierar för samma blandning, vilket innebär att blandningarna är relativt heterogena.

Med ökande andel aska ökar TS-halten, vilket är naturligt. En jämförelse visar att TS-halt, vattenkvot

Tabell 3-5. TS-halt, vattenkvot och glödförlust i olika blandningar i "naturligt" tillstånd (dvs. utan torkning eller tillsats av vatten).

| TS (%) |       |    | w (%)   |     | GF, 550 °C (% av TS) |       |
|--------|-------|----|---------|-----|----------------------|-------|
| medel  |       |    | medel   |     | org.mtrl             | medel |
| TV40   | 36–39 | 37 | 155–177 | 167 | 43–45                | 44    |
| TV50   | 40–46 | 43 | 119–152 | 131 | 38–39                | 39    |
| TV60   | 47–52 | 49 | 91–113  | 104 | 35–40                | 38    |
| TV40fr | 41–48 | 44 | 110–143 | 124 | 35–41                | 38    |
| TV50fr | 49–53 | 51 | 88–102  | 95  | 33–34                | 34    |
| TV60fr | 48–59 | 54 | 70–110  | 86  | 30–40                | 35    |
| SRV40  | 25–26 | 26 | 279–295 | 289 | 38–39                | 38    |
| SRV50  | 29–31 | 30 | 223–241 | 235 | 33–34                | 33    |
| SRV60  | 34–35 | 34 | 190–193 | 192 | 28–29                | 28    |

Fortsättning på tabell 3-5.

| TS (%) |       |    | w (%)   |     | GF, 550 °C (% av TS) |       |
|--------|-------|----|---------|-----|----------------------|-------|
| medel  |       |    | medel   |     | org.mtrl             | medel |
| RE40   | 40–42 | 41 | 140–149 | 145 | –                    | –     |
| RE50   | 46–52 | 48 | 94–116  | 109 | 40–41                | 41    |
| RE60   | 50–53 | 51 | 90–101  | 96  | –                    | –     |

och torrdensitet är i samma storleksordning som i blandningar i andra undersökningar (t.ex. Máscik *et al.* 2003).

### 3.4 Torrdensitet

Torrdensiteten och vattenkvot har uppmätts vid flera olika labförsök där materialens geotekniska egenskaper undersökts.

#### Resultat

Resultaten redovisas i tabell 3-6. Vattenkvoten avser ”naturligt tillstånd”, dvs. utan torkning eller tillsats av vatten. För CRS- och enaxliga tryckförsök packades materialet in för hand, medan tung instampning användes vid packningsförsöken.

För blandning med fryst/deponerat slam har högst torrdensitet uppmätts för 50 % askinblandning vilket är något anmärkningsvärt. Av tabellen framgår att torrdensiteten generellt ökar med ökad inblandning av aska, vilket är förväntat (undantag TV50fr vid packningskurva och RE50 vid tryckförsök, se kommentar ovan). Torrdensiteten är också högre för

Tabell 3-6. Uppmätt torrdensitet och vattenkvot vid olika försök (försöksstart).

| Packningskurva |                                     |          | CRS-försök                          |          | Enaxliga tryckförsök                |          |
|----------------|-------------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|
|                | Torrdensitet<br>(t/m <sup>3</sup> ) | w<br>(%) | Torrdensitet<br>(t/m <sup>3</sup> ) | w<br>(%) | Torrdensitet<br>(t/m <sup>3</sup> ) | w<br>(%) |
| TV40           | 0,43                                | 177      | 0,46                                | 172      | 0,45                                | 169      |
| TV50           | 0,47                                | 152      | 0,54                                | 141      | 0,49                                | 147      |
| TV60           | 0,57                                | 113      | 0,63                                | 112      | 0,55                                | 129      |
| TV40fr         | 0,56                                | 123      | 0,60                                | 128      | 0,59                                | 116      |
| TV50fr         | 0,66                                | 95       | 0,69                                | 100      | 0,65                                | 102      |
| TV60fr         | 0,61                                | 110      | 0,63                                | 79       | 0,70                                | 82       |
| SRV40          | –                                   | –        | 0,29                                | 295      | 0,28                                | 293      |
| SRV50          | –                                   | –        | 0,35                                | 241      | 0,34                                | 240      |
| SRV60          | –                                   | –        | 0,42                                | 192      | 0,41                                | 192      |
| SRV 30-40      | –                                   | –        | –                                   | –        | 0,50                                | 152      |
| SRV 40-40      | –                                   | –        | –                                   | –        | 0,66                                | 107      |
| SRV 40-45      | –                                   | –        | 0,79                                | 82       | 0,82                                | 76       |
| SRV 40-50      | –                                   | –        | 0,99                                | 54       | 1,03                                | 52       |
| RE40           | –                                   | –        | 0,50                                | 140      | 0,42                                | 149      |
| RE50           | 0,55                                | 108      | 0,51                                | 116      | 0,48                                | 116      |
| RE60           | –                                   | –        | 0,53                                | 90       | 0,47                                | 101      |
| RE30 (-05)     | –                                   | –        | 0,42                                | 189      | 0,42                                | 187      |
| RE40 (-05)     | –                                   | –        | 0,46                                | 173      | 0,46                                | 170      |

blandningarna med Tekniska Verkens deponerade/frysta slam än med det färska slammet, vilket kan förklaras av att den högre TS-halten för det frysta/deponerade slammet. Blandningarna med material från SRV har låg torrdensitet och hög vattenkvot, vilket gör att dessa blandningar har lösare konsistens än övriga. Mot denna bakgrund gjordes kompletterande försök med inblandning av bottenaska, vilket gav en högre torrdensitet.

Torrdensitet och vattenkvot skiljer sig något åt mellan de olika labförsöken (dvs. mellan olika blandningsomgångar), vilket tyder på viss heterogenitet i de ingående materialen. Storleksordningen är dock densamma. Någon tydlig skillnad i torrdensitet mellan material inpackade för hand (CRS- och enaxliga tryckförsök) och med tung instampning (packningskurva) syns inte, vilket är något anmärkningsvärt. Torrdensiteten är generellt något högre vid CRS-försöken än vid de båda andra försöken.

### 3.5 Packningskurva

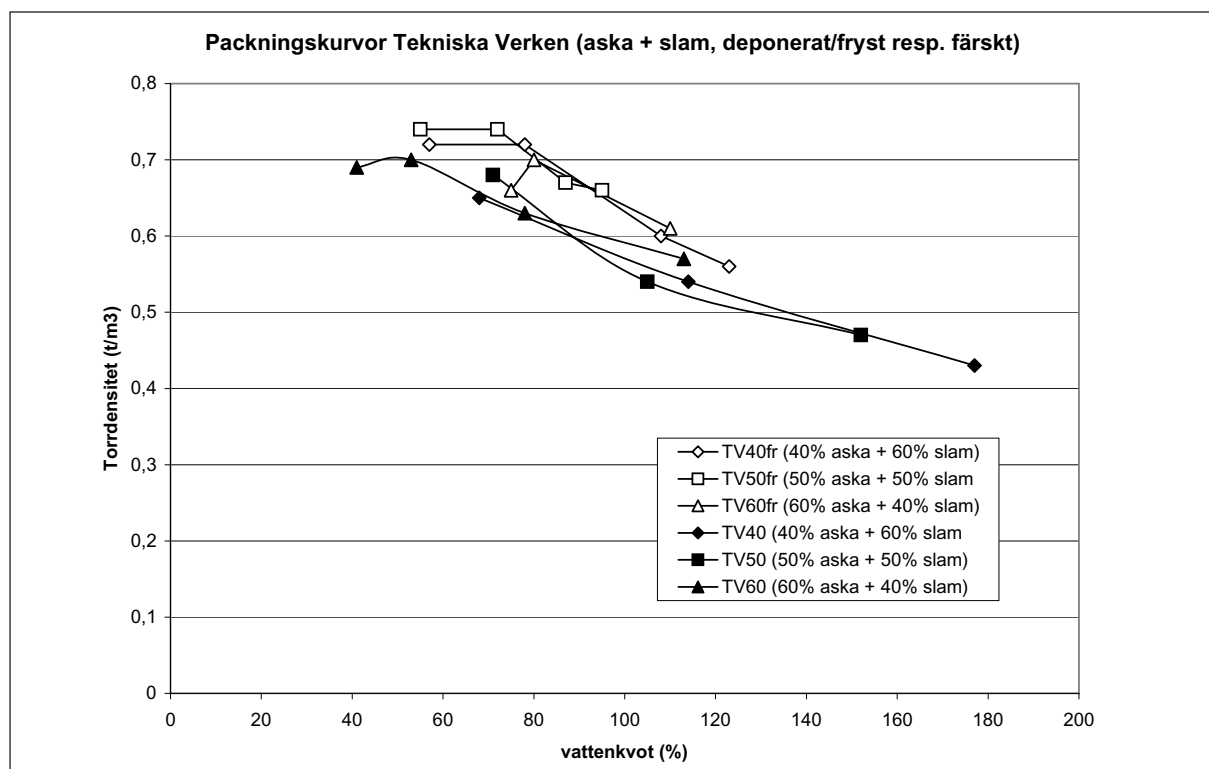
För att studera packningsegenskaperna har packningsförsök utförts på materialblandningar från Tekniska

Verken. Packningen utfördes med tung instampning (modifierad Proctor). Även på Renovas blandning 50 % aska/50 % slam utfördes packningsförsök.

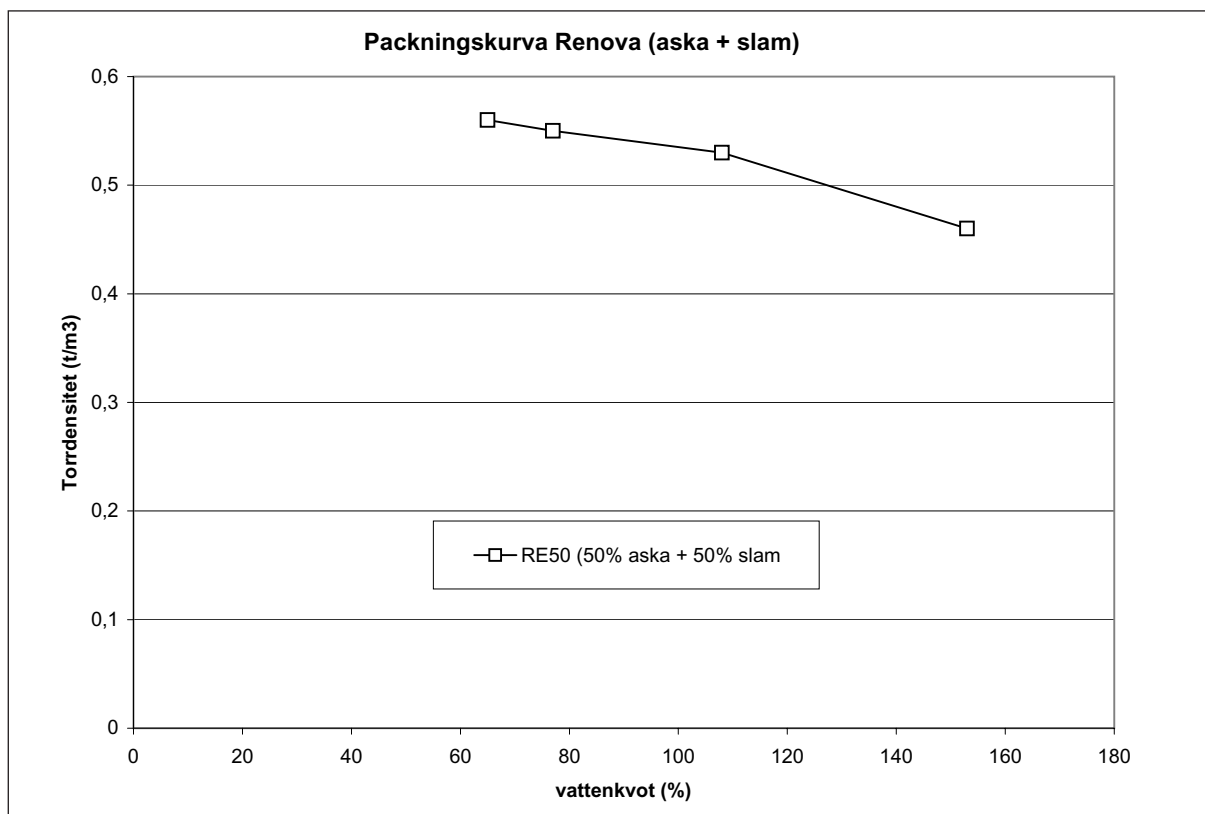
#### Resultat

I figur 3-2 redovisas packningskurvor på materialblandningar från Tekniska Verken. Av figurerna framgår att den optimala vattenkvoten ligger mycket lägre än vad som är rimligt att uppnå (eftersom slammet har en viss TS-halt från början). Blandningarna med det frysta/deponerade slammet har generellt en högre torrdensitet än blandningar med färskt slam vid samma vattenkvot (se avsnitt 3.4). I figur 3-2 framgår hur kurvorna ansluter till varandra, dvs. de olika blandningarna med olika andel aska uppvisar likartade packningskurvor. Det innebär att torrdensiteten i stor utsträckning styrs av vattenkvot (TS-halt) snarare än andel inblandad aska. Optimal vattenkvot för blandningarna med fryst/deponerat slam är enligt figur 3-2 omkring 70–80 % (dvs. TS-halt 55–59 %). För blandningar med färskt slam syns optimal vattenkvot endast för blandningen TV60.

Packningskurva för material från Renova redovisas i figur 3-3 (nedan). Optimal vattenkvot för materialet kan inte utläsas av kurvan. Vid den packning som utfördes vid lägst vattenkvot hade materialen torkats något före försök.



Figur 3-2. Packningskurvor för blandningar av aska och fryst/deponerat slam (TV40fr, TV50fr, TV60fr) samt aska och färskt slam (TV40, TV50, TV60) från Tekniska Verken.



Figur 3-3. Packningskurva för blandning av aska och slam från Renova.

### 3.6 Hydraulisk konduktivitet

Bestämning av hydraulisk konduktivitet gjordes genom CRS-försök. Försöken utfördes vid SGI. Inpackningen skedde för hand i ödometerring vid befintlig ("naturlig") vattenkvot. P.g.a. materialens karaktär utfördes vissa försök med en lägre deformationshastighet än vad som anges i standard. I vissa försök erhöles också högre portryck än vad som tillåts enligt standarden. Detta bedöms dock inte ha någon betydelse för utvärdering av den hydrauliska konduktiviteten (Larsson, muntlig uppgift).

#### Resultat

Resultaten redovisas i tabell 3-7.

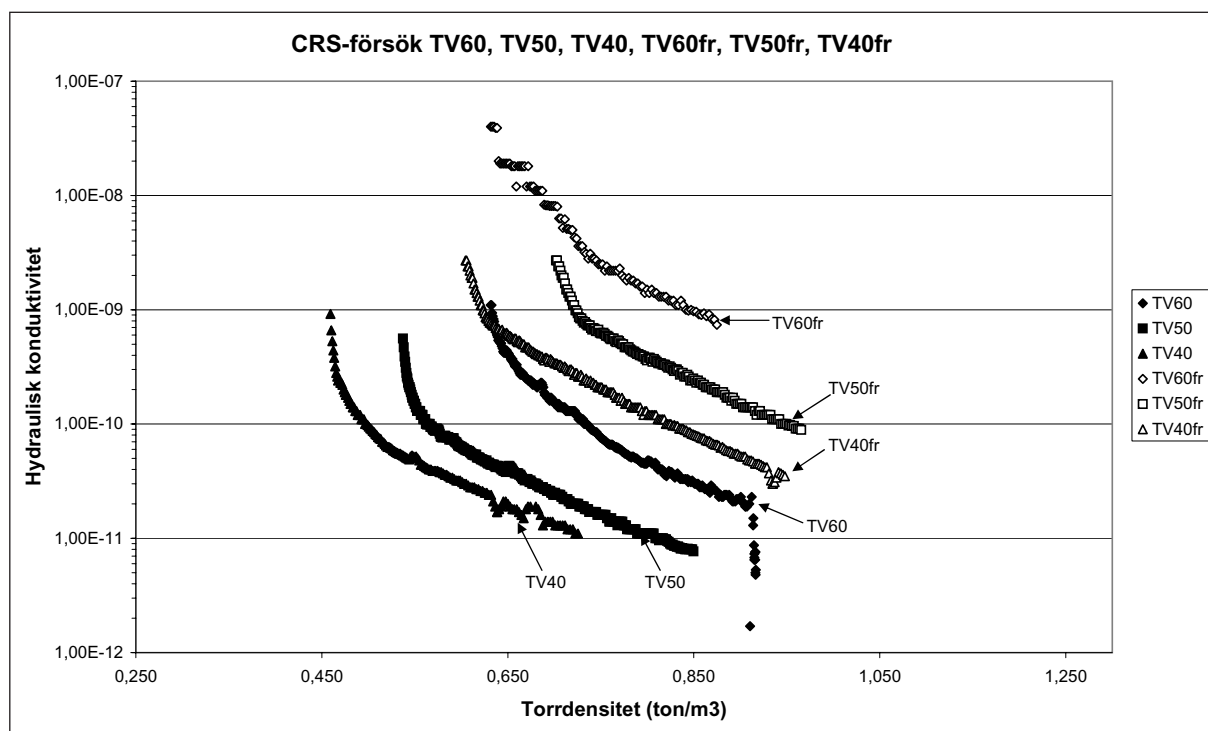
Av tabellen framgår att för blandningarna med material från Tekniska Verken är den hydrauliska konduktiviteten i storleksordningen  $1-5 \cdot 10^{-10}$  m/s för samtliga blandningar med färskt slam, liksom för blandningar från SRV. Blandningarna med deponerat/fryst slam har 10–50 ggr högre hydraulisk konduktivitet än motsvarande blandningar med färskt slam (dvs. mindre tät). Blandningen från Renova med 40 % aska har hydraulisk konduktivitet i nivå med blandningar från SRV och Tekniska Verken

(färskt slam). De båda andra blandningarna från Renova har högre hydraulisk konduktivitet. Kompletterande försök på Renovas blandningar ger likartade resultat (hydraulisk konduktivitet  $\approx 10^{-10}$  m/s). Inblandning av bottenaska i SRV:s blandning ger en högre hydraulisk konduktivitet.

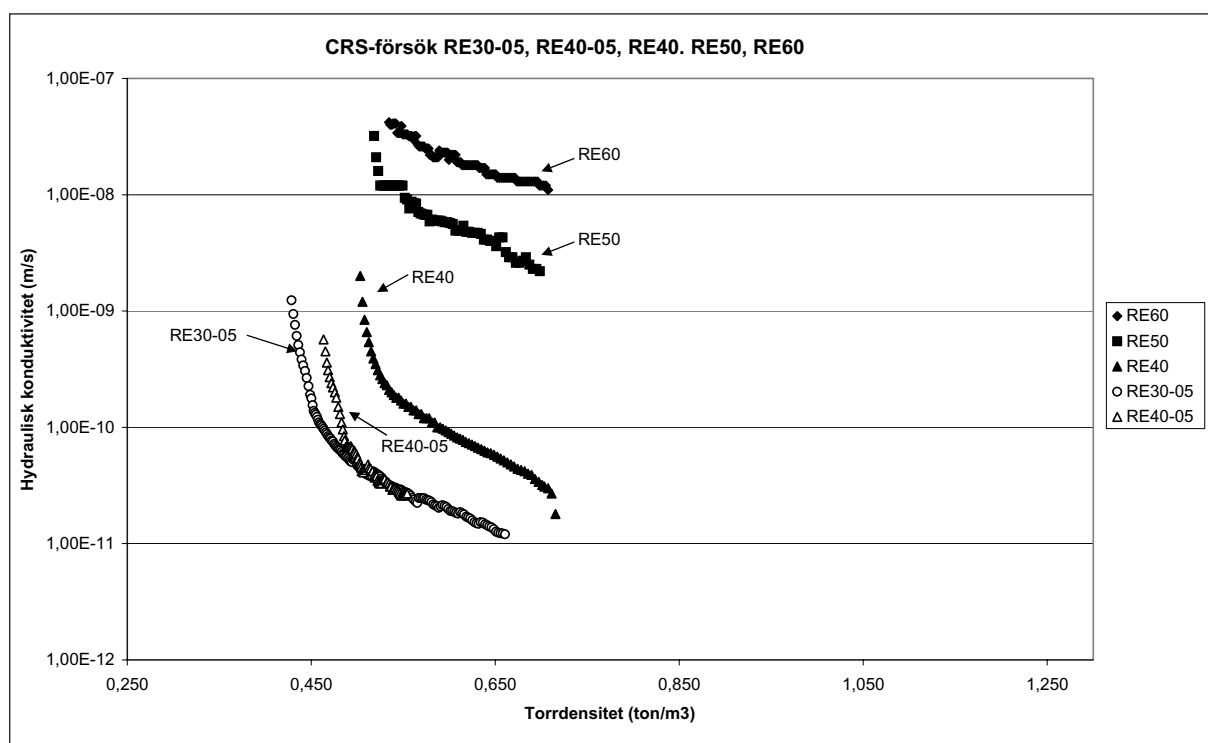
I figur 3-4 och figur 3-5 redovisas hydraulisk konduktivitet som funktion av torrdensitet för de olika materialblandningarna från Tekniska Verken och Renova. Mönstret är likartat för de olika blandningarna, dvs. en högre andel aska i blandningen ökar inte den hydrauliska konduktiviteten i någon nämnvärd utsträckning. Undantaget är Renovas blandningar, där en högre andel aska ger betydligt högre hydraulisk konduktivitet (jämför tabell 3-7). För flertalet blandningar är kurvorna relativt branta i början, vilket innebär att måttlig ökning av torrdensiteten (t.ex. genom packning eller konsolidering p.g.a. överlast) kan ge en betydligt lägre hydraulisk konduktivitet. Den hydrauliska konduktivitet som är angiven i tabell 3-7 är utvärderad enligt standard, där hänsyn bl.a. tas till kompressionen, och utgörs inte av första mätpunkten. SRV:s inblandning av bottenaska ger en högre torrdensitet, men ingen nämnvärd skillnad i permeabilitet.

Tabell 3-7. Hydraulisk konduktivitet uppmätt i CRS-försök.

| Provbeteckning | Torrdensitet, före försök (t/m <sup>3</sup> ) | Vattenkvot, före försök (%) | Hydraulisk konduktivitet (m/s) |
|----------------|-----------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| TV40           | 0,46                                          | 172                         | $1,4 \cdot 10^{-10}$           |
| TV50           | 0,54                                          | 141                         | $1,4 \cdot 10^{-10}$           |
| TV60           | 0,63                                          | 112                         | $4,5 \cdot 10^{-10}$           |
| TV40fr         | 0,60                                          | 128                         | $1,2 \cdot 10^{-9}$            |
| TV50fr         | 0,70                                          | 100                         | $2 \cdot 10^{-9}$              |
| TV60fr         | 0,63                                          | 79                          | $2 \cdot 10^{-8}$              |
| SRV40          | 0,29                                          | 295                         | $2 \cdot 10^{-10}$             |
| SRV50          | 0,35                                          | 241                         | $2,1 \cdot 10^{-10}$           |
| SRV60          | 0,42                                          | 192                         | $3 \cdot 10^{-10}$             |
| SRV40-45       | 0,79                                          | 82                          | $1 \cdot 10^{-9}$              |
| SRV40-50       | 0,99                                          | 54                          | $2 \cdot 10^{-9}$              |
| RE40           | 0,50                                          | 140                         | $3,6 \cdot 10^{-10}$           |
| RE50           | 0,51                                          | 116                         | $1,3 \cdot 10^{-8}$            |
| RE60           | 0,53                                          | 90                          | $4 \cdot 10^{-8}$              |
| RE30 (-05)     | 0,42                                          | 189                         | $1,3 \cdot 10^{-10}$           |
| RE40 (-05)     | 0,46                                          | 173                         | $1 \cdot 10^{-10}$             |



Figur 3-4. Hydraulisk konduktivitet som funktion av torrdensitet. Resultat från CRS-försök för material från Tekniska Verken.



Figur 3-5. Hydraulisk konduktivitet som funktion av torrdensitet. Resultat från CRS-försök för material från Renova.

### 3.7 Hållfasthet

Den odränerade skjuvhållfastheten har undersökts genom enaxliga tryckförsök på samtliga blandningar, dels 1 dag efter blandning, dels 30 dagar efter blandning. Försöken utfördes på SGI. Provkropparna som undersökts dag 30 har lagrats i kylrum (+8 °C).

#### Resultat

I tabell 3-8 redovisas resultaten. Hållfastheten för blandningar från Tekniska Verken är jämförbar med vad som uppmätts i andra undersökningar (t.ex. Cronquist 2002), blandningar från SRV har lägre hållfasthet, medan blandningar från Renova har något högre hållfasthet. Som väntat ger en ökad inblandning av aska också en ökad skjuvhållfasthet. Skjuvhållfastheten är också högre i blandningarna med deponerat/fryst slam än i blandningarna med färskt slam, vilket förmodas ha att göra med den lägre vattenkvoten i dessa blandningar. Av tabellen framgår också att skjuvhållfastheten i flertalet fall ökar vid lagring, dvs. materialet härdar. Anmärkningsvärt är den lägre hållfastheten som uppmätts i Renovas prover från -05. En trolig förklaring är att materialet har en lägre TS-halt än vid försöken 2004, genom lagring utomhus. Därmed har en del av härdningskapaciteten gått förlorad. Liknande erfarenheter redovisas av i projektet FACE där olika flygaskors

egenskaper jämförs (Máscik *et al.* 2004).

Cronquist (2002) anger att skjuvhållfastheten för material på plant underlag bör vara 8 kPa och ca 15–20 kPa för material som läggs i slänter, vilket är baserat på att mäktigheten hos lager ovan tätskiktet är ca 1,5 m.

### 3.8 Ytutlakning

Konstruktion med tätskikt görs i avsikt att minska perkolationen genom materialet. Det innebär att en del av det infiltrerande vattnet kommer att rinna av på tätskiktets överyta antingen via dräneringslagret, om sådant finns, eller på tätskiktets översida. Med de uppmätta hydrauliska konduktiviteterna är det troligt att den dominerande processen vid utlakning styrs av ämnens diffusion till det avrinnande vattnet snarare än genomströmning. För att studera den diffusionsstyrda utlakningen har ytutlakningsförsök genomförts på aska-slamblandningar från Tekniska Verken och SRV Återvinning.

Resultaten visar att en stor del av ämnena för flertalet undersökta prov, inte uppvisar en urlakning som kan klassificeras som diffusionsstyrd. För dessa ämnen är det andra faktorer (än tiden) som styr utlakningen och resultaten av ytutlakningsförsöken kan

Tabell 3-8. Skjuvhållfasthet uppmätt genom enaxliga tryckförsök.

| Provbeteckning | Torr densitet<br>(t/m <sup>3</sup> ) | Vattenkvot<br>(%) | TS-halt<br>(%) | Skjuvhållfasthet,<br>dag 1<br>kPa | Skjuvhållfasthet,<br>dag 30<br>kPa |
|----------------|--------------------------------------|-------------------|----------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| TV40           | 0,45                                 | 169               | 37             | 7,1                               | 13                                 |
| TV50           | 0,49                                 | 147               | 40             | 18                                | 24                                 |
| TV60           | 0,55                                 | 129               | 44             | 25                                | 44                                 |
| TV40fr         | 0,59                                 | 116               | 46             | 20                                | 29                                 |
| TV50fr         | 0,65                                 | 102               | 50             | 38                                | 41                                 |
| TV60fr         | 0,70                                 | 82                | 55             | 65                                | 60                                 |
| SRV40          | 0,28                                 | 293               | 25             | 1,9                               | –                                  |
| SRV50          | 0,34                                 | 240               | 29             | 3,0                               | –                                  |
| SRV60          | 0,41                                 | 192               | 34             | 3,7                               | –                                  |
| SRV30-40       | 0,50                                 | 152               | 40             | 3,4                               | –                                  |
| SRV40-40       | 0,66                                 | 107               | 48             | 5,6                               | –                                  |
| SRV40-45       | 0,82                                 | 77                | 57             | 9,9                               | 25                                 |
| SRV40-50       | 1,03                                 | 53                | 66             | 36                                | 64                                 |
| RE40           | 0,42                                 | 149               | 40             | 40                                | –                                  |
| RE50           | 0,48                                 | 116               | 46             | 39                                | -                                  |
| RE60           | 0,47                                 | 101               | 48             | 53                                | -                                  |
| RE30(-05)      | 0,42                                 | 187               | 35             | 8,9                               | -                                  |
| RE40(-05)      | 0,46                                 | 170               | 37             | 9,8                               | -                                  |

därför inte användas för att prognostisera utlakningen på längre sikt. Sammantaget visar resultaten att halterna av nickel, arsenik och bly inledningsvis kan ge upphov till halter motsvarande allvarligt tillstånd enligt Naturvårdsverkets bedömningsgrunder för förorenade områden (Naturvårdsverket 1999). Halterna avtar emellertid med tiden. Efter sluttäckningens färdigställande kan halterna vara höga under en begränsad tid. Om detta medför oacceptabel miljöpåverkan bör det avrinnande vattnet under denna tid tas omhand utifrån lokala förutsättningar och i enlighet med förordningen om deponering av avfall.

De ämnen som lakas ut kommer dels att återfinnas i de små mängder vatten som perkolerar ned genom tätskiktet och dels i de stora mängder vatten som transporteras på tätskiktets översida. Halterna i det avrinnande vattnet är beroende av mängden avrinnande vatten. Det innebär att halterna i det avrinnande vattnet kommer att variera beroende på nederbördsintensitet, totalnederbörd samt tätskiktets hydrauliska konduktivitet.

Resultat och utvärdering av utförda ytutlakningsförsök redovisas i Bilaga E.

### 3.9 Diskussion – val av blandningar

Labförsöken på blandningar av slam och aska påbörjades hösten 2003. I samtliga labförsök användes torr aska. Dessa kompletterades sedan med ytterligare försök hösten 2004, där inblandning av bottenaska i SRV:s blandningar undersöktes, för att om möjligt öka blandningarnas skjuvhållfasthet. Även i dessa försök användes torr aska. Ytterligare kompletterande försök gjordes på Renovas blandningar våren 2005. Den aska som användes då hade tagits från hög utomhus, dvs. var befuktad.

Sammanfattningsvis visar de utförda laboratorieförsöken att egenskaperna hos olika askor, slam och blandningar varierar avsevärt. Det innebär att det är mycket viktigt att karakterisera både råmaterial och materialblandningar innan de används i fält i större skala. Resultaten visar att parametrar som torrdensitet och vattenkvot skiljer sig åt mellan olika laboratorieförsök, dvs. blandningarna (som tillverkades på lab) är heterogena till sin karaktär. Man kan anta att blandning i fält också ger ett heterogent material.

Den hydrauliska konduktiviteten varierade för samtliga blandningar mellan  $10^{-10}$ – $10^{-8}$  m/s. Tekniska Verkens blandningar med färskt slam gav en lägre hydraulisk konduktivitet än blandningarna med fryst/deponerat slam. Den inblandning av bottenaska som gjordes i SRV:s blandningar gav en högre hydraulisk konduktivitet, men också en högre hållfasthet. Kurvorna från CRS-försöken visar att en måttlig ökning av torrdensiteten kan ge betydligt tätare material (dvs. lägre hydraulisk konduktivitet). Detta skulle kunna ske genom en väl utförd packning eller konsolidering genom överlast. Att packa materialet ute i fält visade sig dock vara praktiskt svårt (se vidare avsnitt 4.2). Med undantag för Renovas blandningar så ökade inte den hydrauliska konduktiviteten nämnvärt genom en ökad andel aska. Detta innebär att det snarare är askans och slammets inneboende egenskaper än andel aska, som styr den hydrauliska konduktiviteten.

En ökad inblandning av aska ger ökad skjuvhållfasthet (observera att torr aska användes vid samtliga försök utom för RE30(–05) och RE40(–05)). Skjuvhållfastheten påverkas av vilken aska som används. I Värmeforsk-rapport 870 (Máscik *et al.* 2004) pekas på att förutom askans vattenkvot kan även innehållet av CaO ha betydelse. Skillnaden i skjuvhållfasthet mellan Tekniska Verkens blandningar med färskt respektive fryst/deponerat slam visar att även slammets vattenkvot har betydelse, vilket också konstaterats av Máscik m.fl. (2003).

Med utgångspunkt från resultaten från laboratorieundersökningarna valdes blandningar ut för att undersöka i fält på provytor. Kravet var att blandningen skulle ha så låg permeabilitet som möjligt och ändå ha tillräcklig hållfasthet. För Tekniska Verken valdes att använda färskt slam istället för fryst/deponerat, eftersom färskt slam gav en lägre permeabilitet. Provet med 50 % inblandning av aska bedömdes ha tillräcklig skjuvhållfasthet. Eftersom blandningarna i de inledande labförsöken för SRV Återvinning hade en mycket dålig skjuvhållfasthet, gjordes kompletterande labförsök med inblandning av bottenaska. Blandningen SRV40–45 bedömdes ha tillräcklig täthet och acceptabel skjuvhållfasthet. Värt att notera är att denna blandning endast innehöll 15 % slam och ändå erhöles den hydrauliska konduktiviteten  $10^{-9}$  m/s. Renovas blandning RE40 bedömdes ha bäst egenskaper.

Följande blandningar föreslogs att användas för provytorna:

#### **Tekniska Verken**

TV50

50% flygaska + 50 % slam (färskt)

#### **SRV Återvinning**

SRV 40–45

40 % flygaska + 45 % bottenaska + 15 % slam

#### **Renova**

RE40

40 % flygaska + 60 % slam

De råmaterial som användes vid provytorna skiljde sig i viss utsträckning från de som användes vid de inledande laboratorieundersökningarna. Detta berodde bl.a. på tillgången på material som förändrades under projektidens gång (höst 2003–sommar 2005) och på förutsättningarna för lagring av erforderlig mängd material. Det slam som SRV använde vid sin provyta kom från Himmerfjärdsverket, medan slammets som användes vid labförsöken (höst 2003 och höst 2004) kom från Käppalaverket. Slammets från Himmerfjärdsverket hade en högre TS-halt (ca 25 %) än Käppalaslammet (ca 17 %), vilket är positivt för blandningens egenskaper. Vid de försök som utfördes hösten 2004 med inblandning av bottenaska utgjordes fraktionen med bottenaska av en blandning av bäddaska och eco-aska. Vid fältförsöken var askutmatningen ombyggd och bottenaska-fraktionen utgjordes endast av bottenaska (dvs. en grövre fraktion), medan eco-askan sammanfördes med flygaska-fraktionen. Det är möjligt att blandning av flygaska/eco-aska och slam från Himmerfjärdsverket skulle ge högre hållfasthet än vad som uppmättes i de labförsök då flygaska och Käppala-slam blandades.

## **4 Provytor – erfarenheter från olika anläggningar**

Vid tre anläggningar har användandet av slam/aska-blandning använts i fullskala vid provytor. Vid provytorna har blandningar av slam och aska använts i tätskiktet. Provyternas utformning samt installerad mätutrustning redovisas i Bilaga A. I Bilaga B–D

har respektive anläggning sammanfattat sina erfarenheter från anläggandet av provytorna.

Provytorna anlades september–november 2004 (Tekniska Verken) och juni 2005 (SRV Återvinning). Provytan vid Renova påbörjades i september 2005 med blandning och utläggning av tätskikt, men var i november 2005 ännu inte helt färdigställd (dränkskikt och skyddsskikt saknas). Uppföljningen av provytorna har blivit kort inom ramen för detta projekt, eftersom ursprunglig tidplan av olika anledningar blivit förskjuten.

## 4.1 Praktiskt utförande

### 4.1.1 Förförsök

Både vid Tekniska Verken och SRV Återvinning utfördes förförsök innan provytorna anlades. Syftet var att i mindre skala undersöka lämplig blandningsmetod.

#### **Tekniska Verken**

Tekniska Verken lät utföra två olika blandningsförsök våren 2004. Det första försöket utfördes vid en blandningsstation vid Högbypark norr om Stockholm. Råmaterial från Tekniska Verken i Linköping fraktades upp för försöken. En förblandning gjordes med hjullastare, varefter det förblandade materialet lastades i en matningsficka med rörliga delar. Materialet fördes sedan via transportband till blandningskammaren. Problem uppstod både vid förblandningen där materialet fastnade i skopan (vilket innebar att proportioneringen av råmaterialen blev osäker) och vid matningsfickan där material fastnade. Det material som kom ut från blandningskammaren tycktes dock välblandat och påminde till konsistensen om murbruk. Slutsatsen från försöket var att den testade utrustningen inte fungerade tillfredsställande.

På Gärstad deponi (Tekniska Verken i Linköping) utfördes senare ett blandningsförsök med trumsikt (0–42 mm). Försöket föll inte väl ut, blandningen blev heterogen med slamkulor överdragna av aska.

#### **SRV Återvinning**

Rekommendationerna utifrån de inledande labbförsöken var att blanda bottenaska, flygaska och slam. Helt torr flygaska dammar oacceptabelt när den

hanteras öppet. SRVs ursprungliga tanke var att utnyttja den betongblandarstation som Swerock har placerad vid Sofielunds avfallsanläggning. Blandarstationen har ett slutet system för inmatning och blandning. Bedömningen var dock att det skulle bli problem med inmatningen av slammet. Hösten 2004 utfördes därför försök med förblandning av bottenaska och rötslam dels i kompostmixer (av typen satsblandare), dels med rotorskopa. Målsättningar var att detta förblandade material skulle kunna matas in i blandningsstationens materialfickor. Slutsatsen var att både kompostmixern och rotorskopan kan användas för blandning av materialen, men att det förblandade material inte hade sådan konsistens att det skulle kunna matas in i blandningsstationen. Kompletterande försök gjordes då med förblandning och befuktning av bottenaska och flygaska i blandarstationen, vilket fungerade väl. Askblandningen blandades därefter med slam med hjälp av skopa (hjullastare), varefter det skopblandade materialet kördes genom en stjärnsikt. Syftet med skopblandningen var att möjliggöra en noggrannare proportionering av materialen än vad som är möjligt i stjärnsikten. Metoden med förblandning av flyg- och bottenaska och därefter inblandning av slam i stjärnsikt bedömdes som bra och kom senare att användas för anläggandet av provytan (se nedan).

### 4.1.2 Lagring

Eftersom aska huvudsakligen genereras under den kalla delen av året var det nödvändigt att lagra aska för att få ihop tillräckliga mängder för blandningen. Den ursprungliga tanken var att försöka lagra aska torrt för att kunna utnyttja askans härdningskapacitet bäst, men detta var inte praktiskt möjligt med de askmängder som var aktuella. Istället skedde i samtliga fall lagring av råmaterialet till blandningarna (både aska och slam) utomhus i högar under ett par veckor – ett par månader. Vid Tekniska Verken hade askan under lagringen varit övertäckt med plast, vid Renova låg askan öppen. Vid Renova bildades en tunn skorpa av härdad aska på askhögen, men under denna skorpa var askan ”pulveraktig”. Vid SRV skedde förblandning och befuktning av flygaska och bottenaska vid fem tillfällen under en månads tid. Denna askblandning lagrades sedan utomhus under ett par veckor innan slam/aska-blandningen tillverkades. Anledningen var att man då kunde tillverka hela

slam/aska-blandningen samtidigt och lägga ut hela tätskiktet på en gång. På detta sätt undveks skarvar i tätskiktet.

Lagringen utomhus och det faktum att samtliga askor var befuktade innebar att askans TS-halt var lägre i fältförsöken jämfört med de inledande laborieförsöken. Tidigare erfarenheter pekar på att lagrad aska kan ge lägre skjuvhållfasthet jämfört med färsk aska (Cronquist 2002).

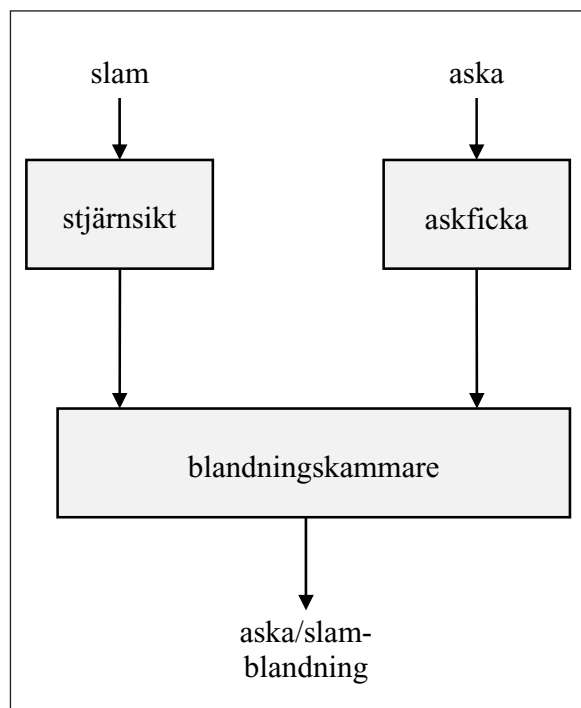
Vid Tekniska Verken och SRV Återvinning skedde utläggning av tätskiktet i direkt anslutning till att materialet blandades. Av praktiska skäl lagrades aska/slam-blandningen ca två veckor vid Renova innan utläggning skedde.

#### 4.1.3 Blandningsutrustning

Tre olika typer av blandningsutrustning har använts vid de olika försöken. Utrustningarna skiljer sig åt bland annat med avseende på blandningsmetod, teknisk utformning samt komplexitet.

##### **Tekniska Verken**

Den utrustning som användes vid Tekniska Verken var ett modifierat asfaltverk, speciellt ombyggt för ändamålet. Blandningen skedde enligt flödesschemat i figur 4-1.



Figur 4-1. Flödesschema för blandning vid Tekniska Verken.

Slammet matades via en stjärnsikt till ett transportband (figur 4-2–figur 4-3).

Askans matades direkt via en askficka till ett annat transportband. Transportbanden ledde till en blandningsstation där omblandning av råmaterialen skedde med hjälp av skovlar. I figur 4-4 visas utmatningen av färdigblandat material från blandningskammaren.



Figur 4-2. Illastning av slam till stjärnsikten, Tekniska Verken, september 2004.



Figur 4-3. Utmatning av slam från stjärnsikten till transportbandet.



Figur 4-4. Utmatning av slam/aska-blandning från blandningskammaren.

Dosering av råmaterial skedde grovt genom en kontinuerlig vägning av råmaterialen och manuell justering av transportbandens hastighet. Under senare delen av blandningsperioden infördes ett styrsystem med logger. Loggern fungerade inte tillfredsställande. I slutet av blandningsperioden hade man problem med att askfickan satte igen och då gjordes förblandning med skopa (slam:aska 2:1,5) och materialet

matades via stjärnsikten på ett gemensamt transportband till blandningsstationen. Efter blandning kördes materialet direkt upp till provytan för utläggning och packning.

De problem med blandningsmetod och blandningsutrustning som förekom vid Tekniska Verken var bl.a.:

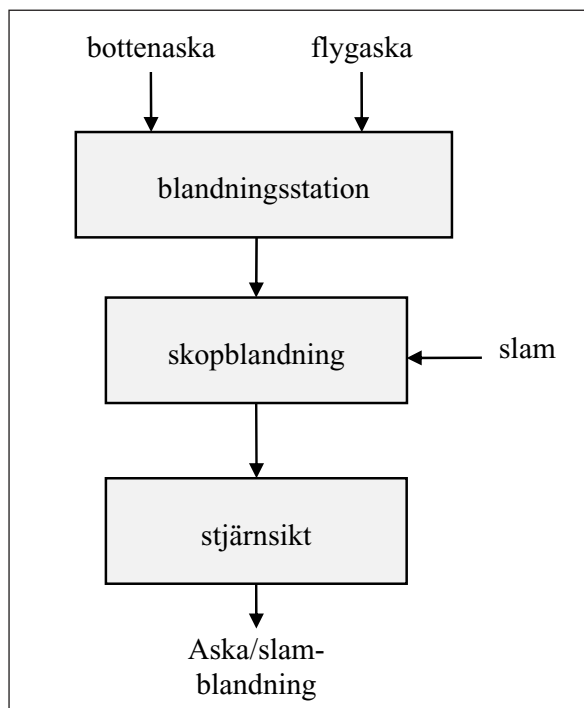
- inledningsvis en alltför kompakt blandning, vilket gjorde att skovlarna fick modifieras
- inledningsvis problem med dosering av aska och slam → styrsystem och loggning infördes först senare
- skrot i råmaterialet orsakade driftsstopp
- regnigt väder gjorde askan svårhanterlig → förblandning med lastmaskin

Trots de problem som förekom verkade metoden ge en homogen blandning (utifrån okulär besiktning).

Tillverkning av aska/slam-blandning samt utläggning av tätskiktet tog ca fem veckor, inklusive flera dagars driftsstopp. Tidsåtgången var mycket mer än beräknat. En anledning var att man inledningsvis hade stora problem med att få utrustningen att fungera.

### SRV Återvinning

Vid SRV Återvinning användes en enklare blandningsmetod än vid Tekniska Verken. Blandningsprocessen presenteras i figur 4-5.



Figur 4-5. Flödesschema för blandning vid SRV Återvinning.

Bottenaska och flygaska blandades först i en särskild blandningskammare (sluten satsblandare vid betongstation). Vid askblandningen tillsattes vatten för att minska damningen. Askblandningen lagrades därefter i hög. Slam och askblandning grovblandades sedan med skopa med hjälp av lastmaskin, varefter hela blandningen kördes en gång genom en stjärnsikt (figur 4-6). Rejektet återfördes till sikten.



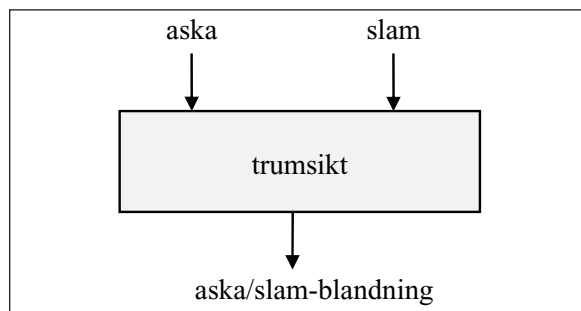
Figur 4-6. Blandning av aska och slam i stjärnsikt vid SRV Återvinning.

Proportioneringen av de två askorna skedde genom invägning, medan proportionerna vid inblandning av slam skedde med hjälp av skopa. Inledningsvis blandades två skopor slam och en skopa askblandning. Efter okulär besiktning ändrades proportionerna till 2,5:1, vilket gav en något "blötare" blandning. Blandningen fungerade i stort sett väl och gav ett relativt homogent material, men med inslag av "asköverdragna slamkuler". (Vid utläggning och packning smetades dessa slamkuler ut.) Efter blandning kördes materialet direkt upp till provytan för utläggning och packning. Blandning och utläggning av tätskiktet tog ca 5 dagar i anspråk.

### Renova

Blandningsprocessen vid Renova var enkel, se figur 4-7.

Vid Renova användes en enkel trumsikt (0–20 mm) utan rengöringsborste, för blandning av slam



Figur 4-7. Flödesschema för blandning vid Renova.



Figur 4-8. Vid Renova användes en trumsikt för blandning av slam och aska.

och aska, figur 4-8. Slam och aska matades i trumsikten med hjälp av hjullastare. Blandningsförhållandet var tre skopor slam och en skopa aska. Blandningen kördes två gånger genom trumsikten. Andra omgången tillfördes det rejekt som matats ut ur trumsikten och som mest bestod av aska.

Trumsikten fungerade väl och den färdiga slam/aska-blandningen bedömdes okulärt vara relativt

homogen. I figur 4-9 syns omblandning i trumsikten samt utmatning av färdig blandning. Att blanda hela omgången med material tog ca en och en halv dag. Den färdiga blandningen lagrades drygt två veckor innan utläggning på den närbelägna provytan skedde.



Figur 4-9. Omblandning och utmatning från trumsikt vid Renova.

## 4.2 Utläggning och packning

### *Tekniska Verken*

Den färdiga materialblandningen transporterades med dumper från blandningsstationen och tippades på provytan. På provytan användes en grävmaskin som bladade ut materialet. Under första delen av anläggningsperioden kunde grävmaskinen köra på materialet, men under senare delen var bärigheten inte tillräcklig. Det är svårt att avgöra om detta beror på materialblandningens kvalitet i sig, eller om väderleken (regn) påverkade hållfastheten negativt. Utläggningen skedde i två lager om ca 25 cm vardera, med packning emellan.

Packning skedde dels med bandgående grävmaskin, dels med skopa. På provytans branta parti (1:3) var lutningen alltför kraftig för maskinen, och packning skedde endast med hjälp av skopa. Under senare delen av anläggningsperioden då bland annat väderleken gjorde materialet blötare, kunde endast skopa användas för packningsarbetet. Även detta var tidvis svårt och materialet betedde sig plastiskt.

### **SRV Återvinning**

Materialet transporterades med lastbil från blandningsstationen direkt ut till provytan (figur 4-10), där en grävmaskin bladade ut materialet i två lager om ca 20 cm med packning emellan. Materialet hade tillräcklig bärighet för att kunna köras på med grävare med larvfötter.

Packning skedde dels genom att maskinen körde över materialet, dels med hjälp av skopa, se figur 4-11. I slänten fungerade packning med larver endast bitvis.

Banden sattes igen av material som häftade vid, med slirning som följd. Däremot fungerade packning med skopa bra. På den övre plana ytan provades även slätvältning (dragen av lastmaskin), men försöket avbröts då lastmaskinen gjorde djupa spår i ytan.

### **Renova**

Utläggningen av tätskiktet utfördes av hjullastare som körde upp det blandade materialet och en grävmaskin som packade det med skopan. Tätskiktet var



Figur 4-10. Utläggning av slam/aska-blandning vid SRV Återvinning, juni 2005.



Figur 4-11. Packning av tätskiktet i slänt på SRV Återvinning.

så pass kladdigt att det inte bedömdes som möjligt att lägga ut det i två omgångar, vilket innebar att hela skiktet (ca 40 cm) lades ut på en gång. Utläggningen tog ca en och en halv dag.

### 4.3 Installation av mätutrustning

I samband med att provytorna anlades installerades olika typer av mätutrustning, för att möjliggöra uppföljning av provytornas funktion. Mätutrustningen utgörs av:

*Lysimetrar* Lysimetrar installerades på provytorna både över och under tätskiktet. Lysimetrar används både för kontroll av hur mycket vatten som rinner igenom respektive skikt, samt för provtagning och analys av vatten.

*Uppsamlings-  
ytor* Uppsamlingsytor installerades ovan tätskiktet på två – tre platser. Syftet är främst att ta prov och analysera vatten som rinner på tätskiktet ovanpå, men även mängden vatten kan kontrolleras.

*”Grund-  
vattenrör”* Genom att mäta grundvattennivån i de rör som installerats på provytan, kan både vattentrycket ovan tätskiktet och om tätskiktet är vattenmättat kontrolleras.

*Gasprober* Gasprober installerades i täckningens olika skikt (avfall, tätskikt, dränsikt, skyddsskikt). Analys av syre, koldioxid och metan kan ge information om ev. nedbrytning.

*Sättnings-  
pegel* Sättningspegel installerades under och över tätskiktet samt i övre delen av skyddsskiktet. Genom avvägning av peglarna kan ev. sättningar i täckningen kontrolleras.

Installation av mätutrustning är mer utförligt beskrivet i Bilaga A.

### 4.4 Utläggning av övriga skikt

Efter att tätskiktet lagts färdigt lades övriga skikt på (geotextil, dränlager och skyddslager).

#### *Tekniska Verken*

Över tätskiktet lades ett materialskiljande lager i form av geotextil. Som dränsikt användes vid Tekniska Verkens provyta bergkross på en delyta och slaggrus på en delyta (se vidare Bilaga A). Som jämförelse anlades också en delyta utan dränsikt.

Till skyddsskiktet användes förorenade jordmassor som behandlats på deponin (oljeskadad jord) samt metallförorenad jord. Utläggningen av skyddsskiktet försvarades av att bärigheten var begränsad, och endast larvgående maskiner kunde användas.

#### *SRV Återvinning*

Då tätskiktet lagts ut lades geotextil, dränlager samt skyddslager på. Geotextilen fungerar som materialskiljande lager mellan tätskikt och dränlager. Dränlager utgjordes av bergkross och skyddslager av ospecifierade schaktmassor. Av olika anledningar lades delar av skyddsskiktet på först efter ca 3 månader. I figur 4-12 (nästa sida) syns hur skyddsskikt påförs på den flacka delen av provytan.

#### *Renova*

Vid Renova hade vid denna rapports färdigställande (november 2005) de övriga skikten ännu inte lagts på.

### 4.5 Kvalitetssäkring – utförandekontroll

Den ursprungliga tanken var att kvalitetssäkra den färdiga blandningen redan vid blandningstillfället genom en noggrann dosering och en väl fungerande blandningsmetod. För de blandningsmetoder som sedan användes vid de olika anläggningarna blev doseringen grov och justerades utifrån okulär besiktning av den färdiga materialblandningen. Det styrsystem för dosering som infördes vid Tekniska Verken fungerade i stora drag, men loggningen gav underliga resultat.

I utförandebeskrivningen för varje provyta ställdes krav på torrdensitet, med utgångspunkt från resultaten



Figur 4-12. Utläggning av skyddsskikt på SRVs provyta.

vid de inledande laboratorieundersökningarna (hösten 2003 och hösten 2004). Kravet på lägsta torrdensitet valdes ut utifrån uppnådd hydraulisk konduktivitet ( $10^{-10}$  m/s) vid CRS-försök. Som jämförelse har även en kravnivå för torrdensitet motsvarande den hydrauliska konduktiviteten  $10^{-9}$  m/s använts vid utvärderingen.

Då konventionella material används, ställs normalt också krav på vattenkvot med utgångspunkt från den optimala vattenkvoten erhållen från packningskurva. För material av typen slam/aska är detta inte lika relevant, eftersom optimal vattenkvot inte kan erhållas utan att torka materialet (jämför figur 3-2).

En enkel kvalitetskontroll skedde genom att TS-halten i den färdiga blandningen mättes flera gånger under blandningsförfarandet. Med undantag för blandningen vid Tekniska Verken som skedde under flera veckor, tog blandningen endast ett par dagar och det var därför svårt att utifrån resultat på TS kunna justera blandningens kvalitet. På SRV Återvinning undersöktes även skjuvhållfastheten i fält med hjälp av fallkonustrutning.

Torrdensiteten i det packade tätskiktet undersöktes i fält med hjälp av isotopmätning (CPN) samt som komplement med gropgrävning.

Resultaten sammanfattas nedan.

### Tekniska Verken

TS-halt på ingående material ("råmaterial") i fält varierade i enlighet med resultaten i tabell 4-1. TS-halt på slam är generellt högre (dvs. materialet är torrare) vid blandningen i fält än vid labförsöken. Den flygaska som användes för provytan var befuktad och lagrad utomhus, medan flygaskan som användes i labförsöken togs ut helt torrt.

Tabell 4-1. TS-halt i "råmaterial" (slam respektive aska).

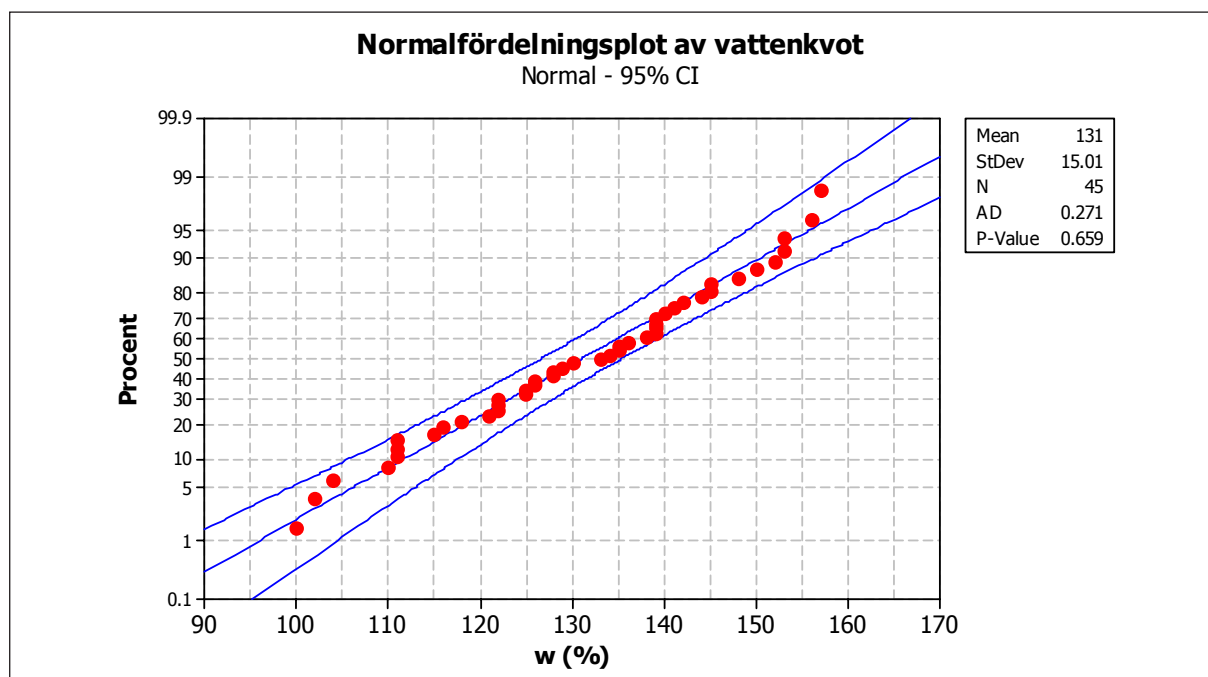
|        | Provyta, höst-04 |              | Lab, höst-03 |              |
|--------|------------------|--------------|--------------|--------------|
|        | TV slam          | TV flyg-aska | TV slam      | TV flyg-aska |
| TS (%) | 27–42            | 57–67        | 26           | 98           |

Materialkravet på den färdiga blandningen sattes utifrån de tidigare laboratorieresultaten till en torrdensitet på minst  $0,55 \text{ t/m}^3$  (för den hydrauliska konduktiviteten  $10^{-10}$  m/s).

Uppmätt TS-halt i färdig blandning redovisas i tabell 4-2. Vid de båda tillfällen då tätare provtagning genomfördes varierade vattenkvoten mellan 111–152 %. En statistisk analys visar att värden för vattenkvoten är normalfördelade, se figur 4-13. Både vattenkvot och glödförlust i fältprov är jämförbara med vad som uppmättes i blandning på lab (tabell 3-6), men variationen är större i fält.

Tabell 4-2. TS-halt och vattenkvot i färdig blandning.

|                | Provyta, höst-04 |                               | Lab, höst-03 |
|----------------|------------------|-------------------------------|--------------|
|                | TV slam+aska     | TV slam+aska<br>(medel, n=44) | TV50         |
| TS (%)         | 39–50            | 43                            | 40–46        |
| w (%)          | 100–157          | 131                           | 119–152      |
| GF, 550 °C (%) | 38–40            | –                             | 38–39        |
| pH             | 9,2              | –                             | 11,3         |



Figur 4-13. Normalfördelningsplot av vattenkvot, provyta Tekniska Verken.

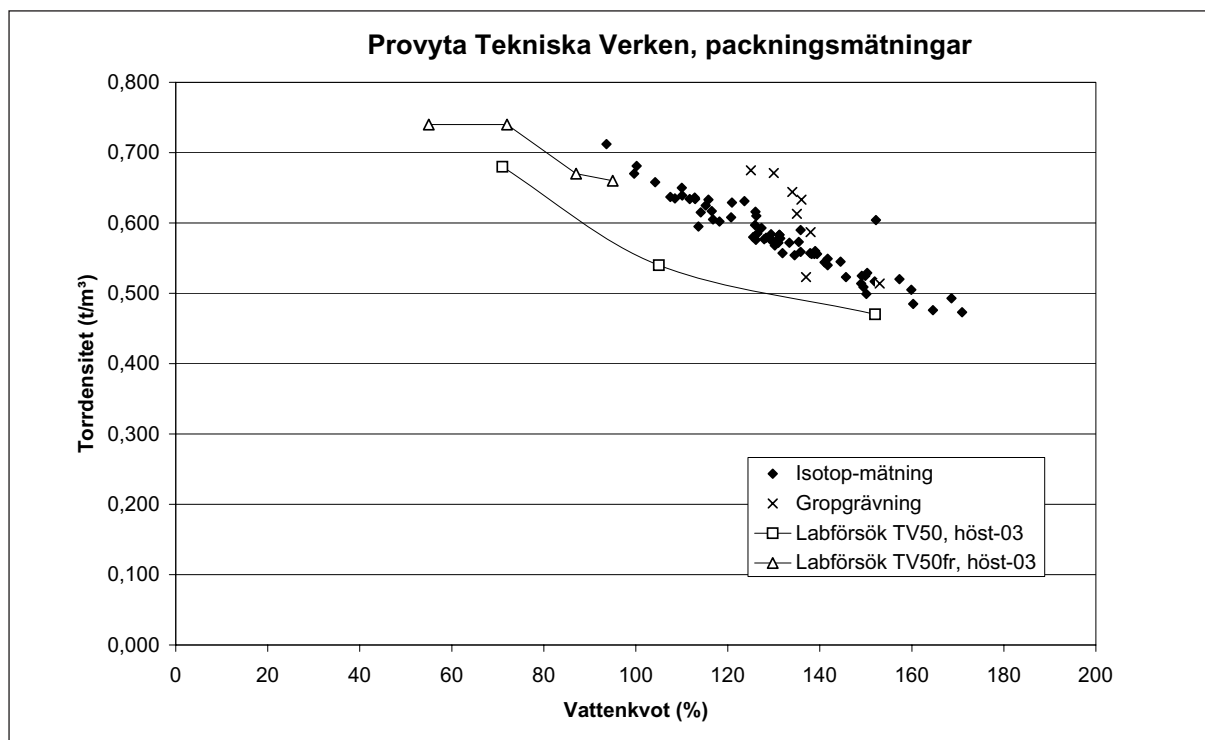
Isotopmätningarna gav en torrdensitet på i medeltal  $0,57 \text{ t/m}^3$  och vattenkvot 133 %. Av isotopmätningarna framgår att materialblandningen är mycket heterogen, torrdensiteten varierar mellan  $0,41\text{--}0,71 \text{ t/m}^3$  och vattenkvoten 93–213 %. Mätning av torrdensiteten genom gropgrävning gav överlag högre värden på torrdensiteten ( $0,51\text{--}0,68 \text{ t/m}^3$ ) och vattenkvoten (125–153%). En förklaring till skillnaden kan vara att man vid isotopmätningen mäter ca 25–30 cm ner i materialet, dvs. i gränssnittet mellan första och andra delskiktet medan gropgrävningen utfördes 0–15 cm ner från tätskiktets överyta. Ca 70 % av värdena på torrdensitet uppmätt genom isotopmätning uppfyller materialkravet på  $0,55 \text{ t/m}^3$ . Sätts materialkravet istället till torrdensitet  $> 0,54 \text{ t/m}^3$  (motsvarande den hydrauliska konduktiviteten  $10^{-9} \text{ m/s}$  vid de inledande CRS-försöken) uppfylls kravet vid ca 76% av mätpunkterna.

I figur 4-14 (nedan) redovisas resultat från *in situ*-mätningar av torrdensiteten i det utlagda tätskiktet,

tillsammans med resultat från packningsförsök i lab. Resultaten från fältmätningarna följer samma mönster som resultaten från de inledande laboratorieundersökningarna. Torrdensiteten är något högre i fält än i lab vid samma vattenkvot, vilket åtminstone teoretiskt betyder att materialet är bättre packat i fält än vad som åstadkommits på lab. Variationen i torrdensitet och vattenkvot behöver dock inte nödvändigtvis spegla skillnader i packning, utan kan också spegla spridning i blandningens sammansättning.

Jämfört med tidigare utförda CRS-försök motsvaras torrdensiteten  $0,57 \text{ ton/m}^3$  av den hydrauliska konduktiviteten  $1 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ .

Den faktiska skjuvhållfastheten och hydraulisk konduktiviteten i fält mättes i laboratorium genom enaxligt tryckförsök respektive CRS-försök på två olika prov som togs ut vid olika tillfällen under blandningsperioden, se tabell 4-3. Resultaten är jämförbara med dem som tidigare uppmäts på laboratorieblandade prover (jämför tabell 3-7 och tabell 3-8).



Figur 4-14. Resultat från packningsmätningar vid Tekniska Verkens provyta.

Tabell 4-3. Skjuvhållfasthet och hydraulisk konduktivitet uppmätt i slam/aska-blandning vid Tekniska Verkens provyta, jämfört med laboratorieblandning.

| Provyta, höst-04               |        | Lab, höst-03       |                      |
|--------------------------------|--------|--------------------|----------------------|
| Skjuvhållfasthet (kPa)         | Dag 1  | 21                 | 18                   |
|                                | Dag 30 | 32                 | 24                   |
| Hydraulisk konduktivitet (m/s) |        | $4 \cdot 10^{-10}$ | $1,4 \cdot 10^{-10}$ |

### SRV Återvinning

TS-halt och glödförlust analyserades vid två tillfällen på råmaterialen, tabell 4-4. Att TS-halten i blandningen med flygaska och bottenaska är lägre än för

de båda materialen separat beror på befuktning vid blandningen.

Även i det färdigblandade materialet mättes vattenkvot/TS-halt regelbundet (totalt 56 prov), tabell 4-5.

Tabell 4-4. Uppmätt TS-halt och glödningsförlust i "råmaterial" (slam respektive askblandning).

|                | SRV<br>slam | SRV flygaska +<br>bottenaska | SRV<br>flygaska | SRV<br>bottenaska |
|----------------|-------------|------------------------------|-----------------|-------------------|
| TS (%)         | 22–25       | 87–90                        | 99,5            | 93                |
| GF, 550 °C (%) | 22          | 6                            | –               | –                 |

Tabell 4-5. TS-halt och vattenkvot i färdig blandning vid provyta, jämfört med laboratorieblandning.

|               | Provyta, sommar-05 |                                | Labförsök, höst-04 |
|---------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|
|               | SRV slam+aska      | SRV slam+aska<br>(medel, n=56) | SRV 40-45          |
| TS (%)        | 47–64              | 56                             | 56–57              |
| w (%)         | 55–113             | 78                             | 76–82              |
| GF, 550°C (%) | 17                 | –                              | –                  |
| pH            | 10,2               | –                              | –                  |

Tabellen visar att TS-halten i materialet blandat i fält är jämförbart med TS-halt i laboratorieblandade prov (tabell 3-6). Den stora spridningen i resultat från fält beror på att "receptet" på blandningsförhållandena aska/slam ändrades under blandningsperioden från 2:1 till 2,5:1 (skopor slam/skopor aska).

Utförandekravet på den färdiga blandningen sattes till en torrdensitet på minst 0,95 ton/m<sup>3</sup> (utifrån den hydrauliska konduktiviteten 10<sup>-10</sup> m/s vid de inledande CRS-försöken).

Isotopmätning gav en torrdensitet på i medeltal 0,92 ton/m<sup>3</sup> (0,80–1,1) och gropgrävning 0,85 ton/m<sup>3</sup> (0,58–1,3). Med utförandekravet på 0,95 ton/m<sup>3</sup> uppfyller endast 36 % av mätpunkterna från isotopmätningen kravet. Sätts kravet istället till 0,79 t/m<sup>3</sup> (motsvarande den hydrauliska konduktiviteten 10<sup>-9</sup> m/s) uppfylls kravet hos samtliga provpunkter vid isotopmätningen.

Hydraulisk konduktivitet och skjuvhållfasthet undersöktes på lab på ett prov från den färdiga blandningen, tabell 4-6, genom CRS-försök respektive enaxliga tryckförsök. Resultaten är jämförbara med dem som tidigare uppmätts vid de inledande laboratieförsöken (se vidare tabell 3-8).

Tidigare utförda CRS-försök gav vid en torrdensitet på 0,92 ton/m<sup>3</sup> den hydrauliska konduktiviteten 2·10<sup>-10</sup> m/s, vilket stämmer dåligt med resultaten från CRS-försök på fältprov där den hydrauliska konduktiviteten är ca tio gånger högre. En förklaring till detta kan vara att råmaterialen delvis var annorlunda vid labförsöken jämfört med vid blandningen i fält. T.ex. kom slammet från en annan leverantör och hade

en annan TS-halt, och de använda askorna hade också olika sammansättning, se vidare avsnitt 3.9.

Vid SRV:s provyta utfördes även kontroll av skjuvhållfastheten i fält med hjälp av fallkonutrustning. Skjuvhållfastheten uppmätt i fält varierar mellan 23 och 44 kPa, dvs. något högre än vad som senare uppmättes på ett prov i lab. Fältresultaten visar dock att variationen kan vara stor.

### Renova

TS-halt i råmaterialen redovisas i tabell 4-7. Resultaten visar att flygaskan som används i fält har en betydligt lägre TS-halt än vad som uppmättes i den torra aska som användes vid laboratieförsöken. Provytans aska har lagrats utomhus utan täckning. Den lägre TS-halten kan förväntas påverka de geotekniska egenskaperna.

TS-halt i det färdigblandade materialet redovisas i tabell 4-8 (nedan nästa sida). TS-halten är lägre i det material som läggs ut på provytan jämfört med laboratorieblandade material.

Medelvärde för torrdensiteten vid Renovas provyta var enligt isotopmätning 0,32 t/m<sup>3</sup> (vattenkvot 314 %). Max- och minvärde för torrdensiteten var 0,42 respektive 0,13 t/m<sup>3</sup>. Resultaten är betydligt under det materialkrav som ställts upp utifrån de inledande laboratieförsöken (0,57 t/m<sup>3</sup> utifrån labundersökningar höst-03 och 0,46 t/m<sup>3</sup> utifrån labundersökningar vår-05).

Skjuvhållfasthet och hydraulisk konduktivitet mättes i prov från färdigblandat material i fält, se tabell 4-9 (nedan nästa sida). Den hydrauliska

Tabell 4-6. Skjuvhållfasthet och hydraulisk konduktivitet i färdig blandning, jämfört med laboratorieblandning.

|                                |        | Provyta, sommar-05   | Labförsök, höst-04 |
|--------------------------------|--------|----------------------|--------------------|
| Skjuvhållfasthet (kPa)         | Dag 1  | 12                   | 9,9                |
|                                | Dag 30 | 18                   | 25                 |
| Hydraulisk konduktivitet (m/s) |        | 1,5·10 <sup>-9</sup> | 1·10 <sup>-9</sup> |

Tabell 4-7. TS-halt och glödförlust i "råmaterial" (slam respektive aska).

|                | Provyta, höst-05 |                 | Lab, höst-03 |                 |
|----------------|------------------|-----------------|--------------|-----------------|
|                | Renova slam      | Renova flygaska | Renova slam  | Renova flygaska |
| TS (%)         | 28               | 64–67           | 30           | 100             |
| GF, 550 °C (%) | 50–51            | 36              | 53*          | –               |
| pH             | 8,4              | 10,5            | 8,0*         |                 |

\*medelhalt uppmätt i kontrollprogram.

Tabell 4-8. TS-halt i färdigblandat material vid provytan och vid tidigare labundersökningar.

|                | Provyta,<br>höst-05 | Labförsök,<br>höst-03 | Labförsök,<br>vår-05 |
|----------------|---------------------|-----------------------|----------------------|
|                | Renova slam+aska    | RE40                  | RE40 (-05)           |
| TS (%)         | 35                  | 40–42                 | 36–37                |
| w (%)          | 185                 | 140–149               | 170–173              |
| GF, 550 °C (%) | 39                  | –                     | –                    |
| pH             | 9,1                 | 8,2                   | –                    |

Tabell 4-9. Skjuvhållfasthet och hydraulisk konduktivitet i färdigblandat material vid provytan, jämfört med tidigare laboratorieundersökningar.

|                                |        | Provyta,<br>höst-05 | Labförsök,<br>höst-03 | Labförsök,<br>vår-05 |
|--------------------------------|--------|---------------------|-----------------------|----------------------|
| Skjuvhållfasthet (kPa)         | Dag 1  | 2,2                 | 40                    | 9,8                  |
|                                | Dag 30 | 3,3                 | –                     | –                    |
| Hydraulisk konduktivitet (m/s) |        | $1 \cdot 10^{-10}$  | $3,6 \cdot 10^{-10}$  | $1 \cdot 10^{-10}$   |

konduktiviteten är i samtliga prov låg, runt  $10^{-10}$  m/s. Den skjuvhållfasthet som uppmätts i det fältblandade provet är låg, vilket kan innebära att man kan komma att få problem med hållfastheten på provytan.

Damning från den torra flygaskan kan utgöra ett annat arbetsmiljöproblem. Vid blandningen vid Tekniska Verken hösten -04 var damningen tidvis påtaglig (väderleksberoende). Vid SRV Återvinning beslöt man att befukta askan (blandning av bottenaska och flygaska) p.g.a. damningsproblematiken.

## 4.6 Arbetsmiljö

Vid blandning av flygaska och slam bildas ammoniak. Vid Tekniska Verken var ammoniaklukten störande/irriterande inom en radie av ca 3 m från blandningskammaren. Även vid SRV Återvinning var ammoniaklukten störande och gav upphov till obehag hos personalen. Mätning med diffusionsprovtagare visar på  $\text{NH}_3$ -halter mellan 6–27  $\text{mg/m}^3$  i anslutning till blandningsutrustningen vid SRV Återvinning. Det hygieniska gränsvärdet är 18  $\text{mg/m}^3$  för en arbetsdag (nivågränsvärde) och 35  $\text{mg/m}^3$  för 5 minuters exponering (takgränsvärde). Vid blandningen hos Renova var ammoniaklukten inte lika påträngande och kunde knappast betecknas som störande, utom invid rejekten från trumsikten. Med en portabel gasvarnare uppmättes  $\text{NH}_3$ -halter på 21  $\text{mg/m}^3$  på denna plats. Diffusionsprovtagare visar på  $\text{NH}_3$ -halter mellan 2–15  $\text{mg/m}^3$ .

Inför framtida blandningar är det lämpligt att rekommendera att gasvarnare används av personalen.

Hantering av ammoniak diskuteras vidare under avsnitt 6.

## 4.7 Prestanda – funktion

### 4.7.1 Uppföljning – täthet

Den hydrauliska konduktiviteten är en av de viktigaste egenskaperna hos materialet. Den faktiska hydrauliska konduktiviteten i fält i tätskiktet vid *Tekniska Verken*s provyta har uppmätts dels genom att kolvprover togs upp efter att materialet legat ute i ett år (se vidare Bilaga F), dels genom de lysimetrar som registrerar infiltrerad nederbörd.

#### Hydraulisk konduktivitet i kolvprover

I tabell 4-10 (nästa sida) redovisas den hydrauliska konduktivitet som uppmätts på kolvprover från tätskiktet vid *Tekniska Verken*s provyta. Materialet hade då legat ute knappt ett år.

En jämförelse med det prov som togs i samband med utläggningen av tätskiktet (höst-04, jämför tabell 4-3) visar att den hydrauliska konduktiviteten i de nu tagna proverna är ca 5 ggr högre. Det bör observeras

Tabell 4-10. Hydraulisk konduktivitet uppmätt i CRS-försök på ett år gammalt material från tätskikt, Tekniska Verken.

| Provbeteckning | Provplats              | Torr densitet före försök (ton/m <sup>3</sup> ) | Vattenkvot före försök (%) | Hydraulisk konduktivitet (m/s) |
|----------------|------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| BH1:1          | Dränskikt av bergkross | 0,56                                            | 123                        | $2 \cdot 10^{-9}$              |
| BH2:3          | Inget dränskikt        | 0,59                                            | 113                        | $2 \cdot 10^{-9}$              |

att proverna är tagna som stickprov och det är svårt att enbart utifrån dessa två prov dra några generella slutsatser om att hydraulisk konduktiviteten blivit sämre.

Den uppmätta torrdensiteten är jämförbar med de som uppmättes vid utläggningen (medelvärde 0,57 ton/m<sup>3</sup>).

#### Hydraulisk konduktivitet utifrån lysimetrar

Det vatten som perkolerat ner genom täckningen har samlats upp i lysimetrar både över och under tätskiktet. I figur 4-15 redovisas den mängd vatten som perkolerat ner genom tätskiktet till en av lysimetrarna vid Tekniska Verkens provyta. Omräknat till l/m<sup>2</sup> · år motsvarar det 12 l/m<sup>2</sup> · år (beräknat på de tio första månaderna). För delytan utan dränskikt är motsvarande mängd 20 l/m<sup>2</sup> · år. Båda lysimetrarna klarar därmed funktionskravet för deponi för icke-farligt avfall (50 l/m<sup>2</sup> · år). Det bör observeras att mängderna kan komma att ytterligare avta med tiden, när en del av det vatten som materialblandningen innehåller från början, pressats ur. En sådan utveckling har man sett vid t.ex. Dragmossen (Máscik *et al.* 2005). Det

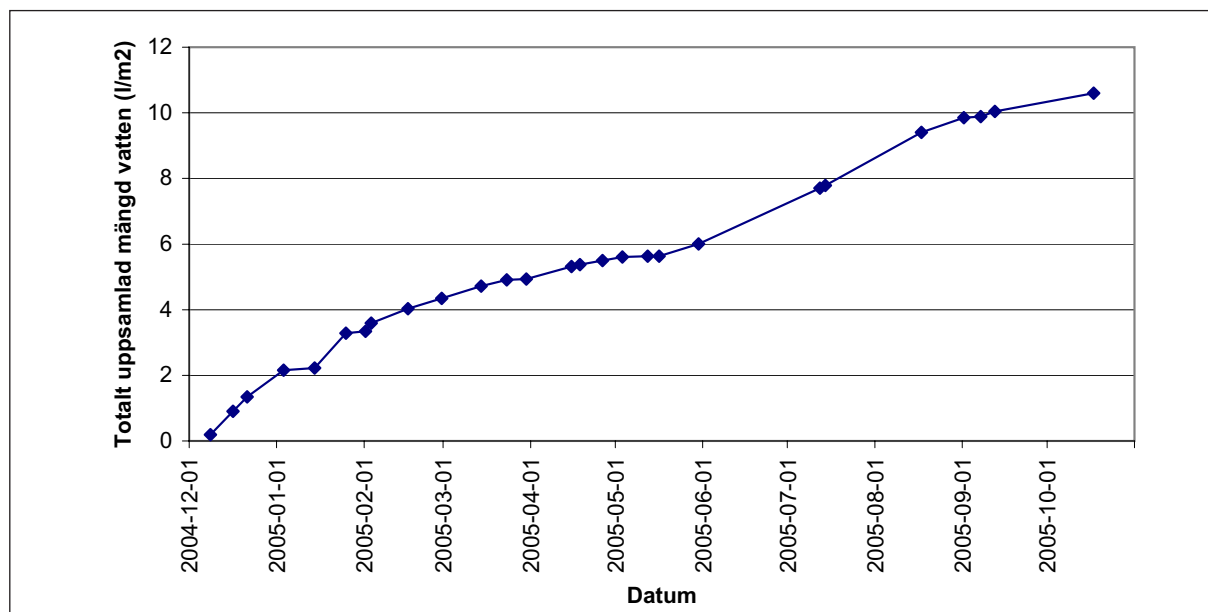
är tydligt att den delyta som saknar dränskikt och där en vattenmättad zon funnits direkt ovanpå tätskiktet (se nedan) har en högre perkolation p.g.a. den högre gradienten (vattentrycket).

#### SRV Återvinning

För SRV Återvinning gäller att lysimetern under tätskiktet i det flacka partiet under täckningens första tre månader (juni–september 2005) inte tagit emot något vatten. En liten mängd vatten har mätts upp i motsvarande lysimeter över tätskiktet. Däremot har lysimetrarna både över och under tätskiktet i det branta partiet tagit emot vatten.

#### "Grundvattennivåer"

Grundvattennivån ovan tätskiktet har undersökts genom de grundvattenrör som installerats på provytan. Mätningar under perioden december 2004–september 2005 vid Tekniska Verken sammanfattas i tabell 4-11 (nästa sida). Både inom det område där det dränerande lagret utgörs av slaggrus och inom det område av provytan där dränerande lager saknas, har en vattenmättad zon funnits ovan tätskiktet större



Figur 4-15. Totalt uppsamlad mängd vatten i lysimeter under tätskiktet vid Tekniska Verkens provyta under perioden december 2004–oktober 2005. Delyta med dränskikt.

Tabell 4-11. Observationer i grundvattenrör på Tekniska Verkens provyta, dec 2004–sep 2005.

| Gv-rör 1                            | Gv-rör 2                           | Gv-rör 4                          | Gv-rör 5                  |
|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| Dränmtrl: bergkross<br>Lutning 1:20 | Dränmtrl: bergkross<br>Lutning 1:3 | Dränmtrl: slaggrus<br>Lutning 1:3 | Odränerat<br>Lutning 1:20 |
| torr                                | Fukt i botten                      | 0–14 cm vatten                    | 1–27 cm vatten            |

delen av mätperioden. Den vattenmättade zonen kan ha flera olika konsekvenser för tätskiktets funktion. Dels förhindras syretillförsel via diffusion, vilket minskar risken för nedbrytning av materialet (se avsnitt 5.1 nedan), dels kan gradienten över tätskiktet orsaka ett ökat flöde genom tätskiktet.

Med utgångspunkt från observerade vattennivåer ovan tätskiktet och uppmätt hydraulisk konduktivitet från labundersökningar på upptagna prov från provytan, kan flödet genom tätskiktet beräknas utifrån Darcys lag ( $q = K \cdot i$ ) se tabell 4-12. Beräkningarna ger ett flöde som är större än vad som faktiskt mätts upp i lysimetrarna. Det kan bland annat bero på att den hydrauliska konduktiviteten generellt är lägre än vad det enskilda prov som undersökts på lab visar.

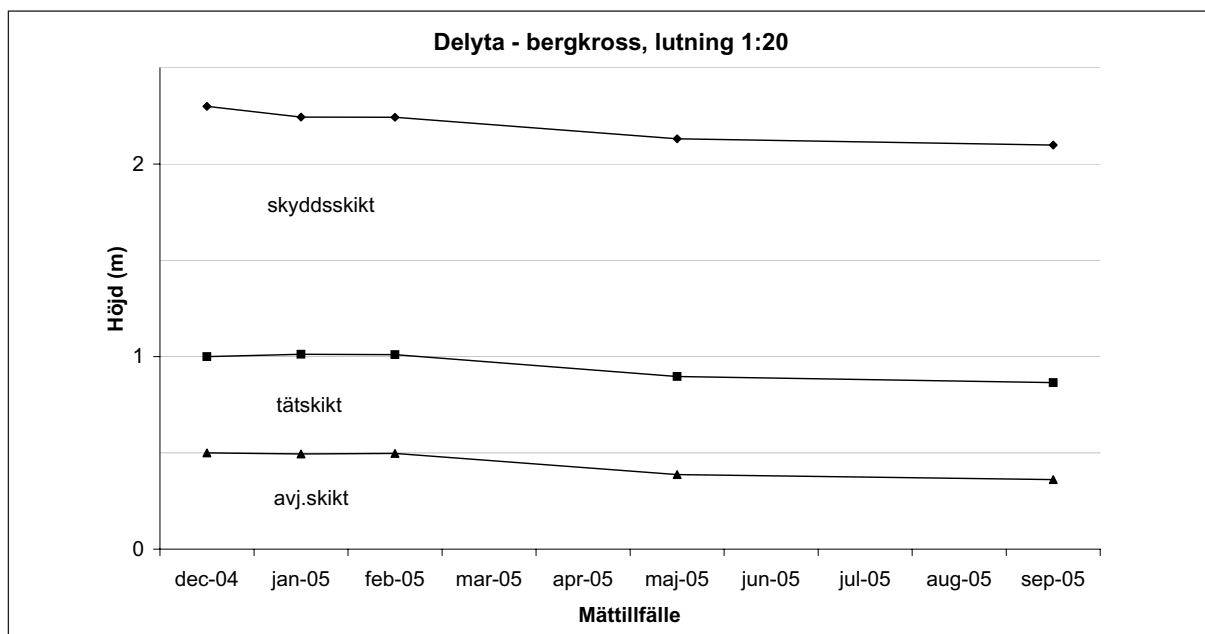
Vid den avläsning av ”grundvattennivåer” som gjordes i september 2005 vid *SRV:s* provyta var samtliga grundvattenrör torra, dvs. ingen vattenmättad zon fanns över tätskiktet.

#### 4.7.2 Sättning

Eventuella sättningar i de olika skikten har följts upp under ett år vid *Tekniska Verkens* provyta med hjälp av sättningspeglar som vägts av vid fyra tillfällen i fyra olika punkter. Resultaten visar på små rörelser i tätskiktet, sättningar på mellan 1–2 cm har mätts upp, dvs. ca 2–4 %. Någon tydlig skillnad mellan de olika delytorna (ev. dräneringslager, lutning) syns inte. Ett exempel på sättningarna redovisas i figur 4-16.

Tabell 4-12. Antagna värden (utifrån mätningar i fält och på lab) samt beräknat flöde genom tätskiktet vid Tekniska Verkens provyta.

|                       | Gradient, $i$ | Hydraulisk konduktivitet (m/s) | Beräknat flöde ( $\text{l/m}^2 \cdot \text{år}$ ) |
|-----------------------|---------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|
| Dränlager – bergkross | 1             | $2 \cdot 10^{-9}$              | 63                                                |
| Odränerat             | 1,54          | $2 \cdot 10^{-9}$              | 97                                                |



Figur 4-16. Sättningsmätning i de olika skikten vid Tekniska Verkens provyta.

Vid den kontroll av tätskiktet som gjordes i samband med kolvprovtagning i september 2005 uppmättes tätskiktets tjocklek till 0,3–0,55 m. Vid utläggningen lades slam/aska-blandning till en tjocklek av minst 0,5 m. Skillnaden kan bero konsolidering av materialet alternativt att det på någon plats blivit tunnare än avsett vid utläggning.

#### 4.7.3 Hållfasthet

Skjuvhållfastheten har undersökts på två prov från tätskiktet vid *Tekniska Verken* provyta som legat ute ca ett år. Resultaten är jämförbara med vad som uppmättes på ett prov i samband med utläggningen, se tabell 4-13.

Tabell 4-13. Skjuvhållfasthet på prov i samband med utläggning av tätskikt samt ett år efter utläggning.

| Prov                                   | Skjuvhållfasthet (kPa)    |
|----------------------------------------|---------------------------|
| Prov ett år efter utläggning (höst-05) | 27–36                     |
| Prov vid utläggning (höst-04)          | 21 (dag 1)<br>32 (dag 30) |

#### 4.7.4 Utlakning

Halterna av organiska ämnen, metaller samt kväve och fosfor har mätts i uppsamlat vatten från lysimetrar under och över tätskiktet samt från de s.k. avrinningsytorna (samlar upp vatten som rinner av på tätskiktets yta, i eventuellt dränlager).

Vid *Tekniska Verken* har analys utförts på vatten från januari respektive maj 2005. Vid *SRV Återvinning* har analys utförts på vatten från juni respektive september 2005. För både lysimetervatten och vatten från avrinningsytor gäller att halterna av näringsämnen (kväve och fosfor) är mycket höga, se exempel i tabell 4-14. Halterna är högre i vatten

från lysimeter under tätskiktet än från lysimeter över tätskiktet, vilket är naturligt. Som jämförelse redovisas även ”normala” halter i obehandlat lakvatten vid Gärstad deponi (*Tekniska Verken*).

Metallhalterna är generellt högre än naturliga halter i svenska vattendrag. Halterna är likartade vid de båda anläggningarna (*Tekniska Verken* och *SRV*). Någon signifikant skillnad mellan de olika delytorna (ev. dränlager, lutning) går inte att se. Antalet mät-tillfällen är för få för att man ska kunna se några tendenser avseende t.ex. minskande halter. Analysresultaten redovisas i Bilaga G.

Organiska ämnen har endast analyserats vid ett mätillfälle (*Tekniska Verken*, januari 2005 och *SRV* juni/september 2005). Resultaten visar överlag på låga halter som ligger långt under Naturvårdsverkets riktvärden för grundvatten vid förorenade bensinstationer (*Naturvårdsverket* 1998). Måttliga halter av klorfenoler har påvisats i vatten från lysimetrar respektive avrinningsytor både vid *Tekniska Verken* och *SRV*. Halterna vid *SRV* är generellt något lägre. Vid de inledande laboratorieundersökningarna höst-03 detekterades klorfenoler i slam/aska-blandning från *Tekniska Verken* (jämför tabell 3-2). *SRV*:s laboratorieblandning är inte jämförbar med den som användes vid provytan.

#### 4.7.5 Nedbrytning

Eventuell nedbrytning av det organiska materialet hos slam/aska-blandningen har utvärderats dels utifrån gasmätningar i fält (*Bilaga H*), dels utifrån kontroll av det material som grävdes upp efter ca ett år (*Bilaga F*).

I tabell 4-15 (nästa sida) redovisas uppmätt pH, TS-halt och glödförlust i tätskiktsmaterial ett år efter utläggning. Jämfört med resultat för prover tagna i samband med utläggning av provytan är TS-halten nu något högre. pH är lägre i det ett år gamla tätskiktsmaterialet från provytan, jämfört med pH vid utläggning, och markant lägre jämfört med

Tabell 4-14. Kväve och fosfor i vatten från avrinningsytor resp. lysimetrar.

|              | Tekniska Verken<br>(jan + maj 2005) |           | Tekniska Verken,<br>lakvatten 2005 | SRV<br>(juni + sept 2005) |           |
|--------------|-------------------------------------|-----------|------------------------------------|---------------------------|-----------|
|              | Avrinningsyta                       | Lysimeter |                                    | Avrinningsyta             | Lysimeter |
| N-tot (mg/l) | 110–660                             | 730–5300  | 100                                | 220–1000                  | 390–4100  |
| P-tot (mg/l) | 1–2,8                               | 0,67–4,7  | <1                                 | 1,6–12                    | 2,5–7     |

Tabell 4-15. pH, TS-halt och glödförlust i tätskiktsmaterial ett år efter utläggning vid Tekniska Verkens provyta.

| Delyta                        | pH      | w (%)     | TS (%)   | GF, 550 °C<br>(% av TS) |
|-------------------------------|---------|-----------|----------|-------------------------|
| Tätskikt med dränskikt        | 8,0–8,5 | (30)*–115 | 47–(77)* | (13)*–39                |
| Tätskikt utan dränskikt       | 8,5–8,6 | 61–108    | 48–62    | 32–39                   |
| Prov från utläggning, höst-04 | 9,2     | 100–157   | 39–50    | 38–40                   |
| Labförsök, höst-03            | 11,3    | 119–152   | 40–46    | 38–39                   |

\* slam/aska-blandning med inslag av bergkross från dränskiktet

provblandning på laboratorium. Detta kan förväntas ha betydelse för materialets beständighet och eventuell nedbrytning.

Vid okulär kontroll kunde konstateras att slam/aska-blandningen var mörkt brun, nästan svart och luktade svagt av ammoniak. Jämfört med materialet vid utläggning kunde inga skillnader konstateras vid okulär kontroll.

För att undersöka om eventuell nedbrytning av organiskt material sker i tätskiktet har gassammansättningen i täckningens olika skikt analyserats. Vid mikrobiell nedbrytning konsumeras syre, medan metan och koldioxid bildas. Om inte syre finns tillgängligt, förväntas nedbrytningen ske i mycket långsam takt.

Vid Tekniska Verken har gassammansättningen analyserats vid fem olika tillfällen (december 2004, februari, maj, juni och september 2005) och vid SRV vid ett tillfälle (september 2005). Resultaten redovisas i sin helhet i Bilaga H.

Resultaten från Tekniska Verkens provyta visar förekomst och därmed en sannolik bildning av metan i avfallet. Avfallet består av rökgasreningsrest, som enligt laboratorieanalyser innehåller en andel organiskt material (glödningsförlust: 11 %; Hammar, muntlig uppgift). Vidare är pH för rökgasreningsresten hög (10–12) vilken antas ha en hämmande effekt på nedbrytningen. Att metan har uppmätts i avfallet (rökgasreningsresten) är något anmärkningsvärt. Andra studier (Lindberg, muntlig uppgift) har pekat på mycket låg metangasbildning i aska. Metan har även uppmätts i tät- och skyddsskiktet. Metan i tätskiktet kan antingen ha bildats där eller ha diffunderat från det underliggande avfallet. Även det omvända kan ha skett, dvs. att metan bildas i tätskiktet och diffunderar till avfallet. I dränskiktet är det dock inte sannolikt att metanbildning kan fortgå,

metan i detta skikt antas ha diffunderat från underliggande material. Metanbildning kan troligen fortgå i den övre delen av tätskiktets profil (i kontakt med dränskiktet), där eventuellt perkolerat vatten i dränlagret kan bidra till en pH-neutralisering av materialet.

Utifrån de resultat som erhållits från gasprover tagna vid Tekniska Verken går det inte att säkert avgöra om mikrobiell nedbrytning pågår i tätskiktet. Den koncentration av metan som uppmätts i tät- och dränskikt kan härröra från avfallet, men avfallet innehåller relativt liten mängd organiskt material och nedbrytning av detta material hade inte förväntats.

Slutsatsen från gasmätningarna tillsammans med uppmätta pH för färsk och åldrad blandning kan konstateras att det sannolikt pågår en omsättning av det organiska materialet i tätskiktet på provytorna. I relation till tidigare laboratieförsök utförda inom etapp 1 av projektet (Sundberg *et al.* 2002) var utgångs-pH i materialblandningen lägre (pH 9,2 i blandning i fält, höst 2004). Detta är ett skäl till att nedbrytning sker i material i fält, men inte kunde ses i laboratorium vid de tidigare undersökningarna. För att få en beständighet som är tillräcklig för tätskikt på deponier, är blandningen av slam och aska därmed kritisk, dvs. det är viktigt att ett högt pH erhålls.

Beständighet diskuteras också övergripande i avsnitt 5.

## 4.8 Kostnadsbedömning

För att tätskikt av aska och slam ska vara aktuellt i större skala krävs, förutom att blandningen har

tillfredsställande tekniska och miljömässiga egenskaper, också att det är kostnadsmässigt konkurrenskraftigt. Anläggningskostnaden för tätskikt av aska/slam är högre än för jämförbara konventionella material (t.ex. lergeomembran). För provytorna inom projektet varierade anläggningskostnaden mellan 50–220 kr/m<sup>2</sup>. I detta ingår kostnad för blandning, transport, utläggning och packning, men inte merkostnader i form av t.ex. mätutrustning. Skillnaden mellan de olika anläggningarna och provytorna antas bero på blandningsmetod, transportavstånd från blandningsstället till själva provytan och tidsåtgången för blandning och utläggning. Anläggningskostnaden för ett tätskikt av lergeomembran bedöms till 50 kr/m<sup>2</sup> (Wrene, muntlig uppgift). För att kunna lägga geomembran krävs dock ett relativt kostsamt förarbete i form av utjämningskikt. Denna kostnad tillkommer och är anläggningsspecifik. I kalkylen för den totala kostnaden måste också alternativkostnaden för aska och slam tas med, liksom eventuella effekter av skatteåterbäring. När hänsyn tas till dessa faktorer blir totalkostnaden för tätskikt av aska/slam lägre än för konventionella material. SRV Återvinning uppskattar totalkostnaden för tätskiktet av aska/slam till ca 40 kr/m<sup>2</sup> (Wrene, muntlig uppgift).

## 5 Beständighet

Beständigheten hos ett material definieras som kapaciteten att motstå nedbrytning och utlakning, dvs. materialets fysikaliska integritet. Det innebär att beständigheten kan utvärderas med avseende på i vilken utsträckning materialet har minskat sin halt av organiska ämnen över tiden. I detta projekt har fokus legat på nedbrytningen av material i tätskiktet samt i någon mån de kemiska förändringar som påverkar nedbrytningen. I avsnitt 5.7 diskuteras beständigheten hos ett par andra studier med liknande inriktning. För fullständighetens skull redovisas också andra faktorer som har betydelse för tätskiktets funktion och som har samband med beständigheten.

Nedbrytningen sker huvudsakligen under inverkan av mikroorganismer. Om syre finns närvarande sker den största nedbrytningen med hjälp av syre, även om

andra oxidationsmedel finns tillgängliga som också kan stå för en oftast mindre del av nedbrytningen, till exempel nitrat. Detta betyder att man kan utnyttja skillnaden i koncentrationer av syre på olika nivåer för att uppskatta den aeroba nedbrytningen. Nedbrytning sker också under anaeroba förhållanden. För att undersöka anaerob nedbrytning kan man på samma sätt utvärdera i vilken grad halten av organiskt material minskat över tiden. Om detta inte är möjligt kan man undersöka förekomst av andra gaser som bildas vid anaerob nedbrytning t.ex. metan. Det kan vara svårare att utvärdera sådana mätningar, än mätningar av syreprofiler. För syre är atmosfären den enda källan och den har dessutom konstant halt. För metan kan det finnas flera källor på olika nivåer och det är därför svårt att avgöra om halterna beror på en verklig källa eller på produktion på den aktuella nivån.

### 5.1 Påverkan av syre

Nedbrytning av organiskt material i slam/askablandningen är beroende av bl.a. tillgången på syre och pH i blandningen. Nedbrytning kommer att fortgå även i frånvaro av syre, men i betydligt lägre takt än då syre finns tillgängligt. De flesta mikroorganismer i slam och ”normala” jordar har pH-optimum mellan 6 och 8, dvs. de tillväxer snabbast i detta intervall. I alkalina miljöer utvecklas dock mikroorganismer med högre pH-optima. Eftersom mikroorganismerna i ett skikt av slam och aska har sitt huvudsakliga ursprung i slammet, bedöms nedbrytning därför vara långsam så länge pH är högt och syretillgången är låg. Vid en ökning av syretillgången som orsakar ett sänkt pH, kan en ökning av nedbrytningshastigheten förväntas.

Tillförsel av syre till tätskiktet väntas ske genom diffusion och transport med perkolerande vatten. Mängden syre som kan transporteras med vatten är liten, och minskar med stigande temperatur. Diffusionen kan bli betydligt större. Faktorer som påverkar diffusionens storlek är materialets porositet (beror bl.a. av packning), vattenmättningen i skiktet, skiktets nivå under markytan, överliggande materials beskaffenhet (bl.a. porositet) och skador på skiktet i form av rotpenetration och grävning av människor eller djur.

Tillförseln av syre till tätskiktet har beräknats i tre olika exempel, se vidare Bilaga I. Tillförseln av syre via *perkolerande vatten* beräknas till 2,2–3,5 g/(m<sup>2</sup> · år) för en icke-farligt avfall-deponi (tillåten mängd perkolerande vatten 50 l/m<sup>2</sup> · år) och 0,22–0,35 g/(m<sup>2</sup> · år) för en farligt avfall-deponi. Tillförseln av syre via *diffusion* har beräknats till 10–20 kg/(m<sup>2</sup> · år) beroende på täckningens utformning.

Skillnaden mellan mängden syre som tillförs via perkolerande vatten och via diffusion är stor och tillförseln av syre till materialet begränsas effektivast genom att diffusionen minimeras. Detta kan åstadkommas t.ex. genom att tätskiktet är vattenmättat så stor del av tiden som möjligt och att överliggande skikt är täta och har relativt stor mäktighet. Ett annat sätt kan vara att använda ett enkelt plastgeomembran över tätskiktet.

## 5.2 Buffertkapacitet

Nära knuten till frågan om beständighet är frågan om buffertkapacitet i materialet. Buffertkapacitet innebär ett materials förmåga att motstå förurning. Eftersom urlakningen av många ämnen är kraftigt beroende av pH-värdet vill man kunna förutsäga utvecklingen av pH över tiden. I askor förekommer höga halter av ämnen som i kontakt med vatten ger ett mycket högt pH-värde. Oftast är det lösligheten av kalciumhydroxid som avgör vilket pH-värde som uppkommer. Rent vatten löser 1,7 g kalciumhydroxid. Hydroxidjonkoncentrationen i ett sådant vatten är 12,3 vilket därför är det maximala pH som kan uppkomma om mängden kalcium och hydroxid är den samma i aska/slam-blandningen.

Buffertkapaciteten i ett en slam-aska blandning kommer så småningom att uttömmas beroende på tillförsel av protoner (vätejoner) från nederbörden eller från nedbrytning av organiskt material. Tiden det tar kan uppskattas på olika sätt. För t.ex. gruvavfall gör man ofta en bestämning ned till ett lågt pH för att undersöka vilken kapaciteten för neutralisation är. Potentialen för syrabildning uppskattas genom att analysera syrabildande ämnen. Ofta används totalhalt av svavel som en approximation av dessa ämnen. För slam-aska är eventuell buffring vid låga pH-värden av mindre intresse och det är buffringen ned till ett intermediärt pH-värde som kan vara aktuellt.

I en avhandling (Crawford 1999) beskrivs hur man med kännedom om materialets syraneutralisationspotential (ANC) kan fastställa vilken förmåga ett material har att motstå förurning. ANC definieras som den mängd av en stark syra som måste tillsättas en lösning för att uppnå ett referensvärde av pH 5,3. Det fasta materialets innehåll av sådana ämnen beror till stor del på hydroxider och karbonater. Crawford (1999) utförde en bestämning av ANC på tre avfall med hjälp av lakningar och fann att den största delen av ANC utgjordes av hydroxider och karbonater av kalcium.

För att uppskatta den buffrande kapaciteten hos aska-slam blandningar behövs, förutom denna information, kunskap om hur stor del av alkaliniteten som bortförs eller tillkommer med avrinnande vatten. Enligt Crawford (1999) kan materialet antingen vara i jämvikt med kalciumhydroxid eller med kalciumkarbonat. Om materialet står i jämvikt med kalciumhydroxid sker utlakningen betydligt snabbare än om materialet står i jämvikt med kalciumkarbonat. För att ge en försiktig uppskattning av den buffrande kapaciteten hos aska-slam blandningar är därför nedanstående exempel (tabell 5-1–tabell 5-3) baserat på en hög utlakning av alkalinitet, och med låga halter av ANC<sub>Ca</sub> (TV 40fr, dvs. aska/slam-blandning från Tekniska Verken med 40 % aska och 60 % deponerat/fryst slam). Dessutom är syraproduktionen baserad på den totala svavelhalten. Vidare har den hydrauliska konduktiviteten uppmätts till maximalt 1 · 10<sup>-9</sup> m/s, motsvarande ca 40 l/m<sup>2</sup> · år (dvs. nedanstående beräkningar är konservativa).

Tabell 5-1. Buffertkapacitet av aska/slam-blandning från Tekniska Verken.

|                                     | TV40fr | TV50fr | TV60fr |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|
| CaO (g/kg)                          | 151    | 187    | 216    |
| S (g/kg)                            | 32,4   | 41,8   | 48,0   |
| ANC <sub>Ca</sub> (mol/kg)          | 1,68   | 2,03   | 2,355  |
| Bulkdensitet D (kg/m <sup>3</sup> ) | 1270   | 1300   | 1300   |

Förrådet av buffrande ämnen för TV40fr på 1 m<sup>2</sup> yta (Buffring /ytenhet) ges av:

$$B = L \cdot D \cdot \text{ANC}_{\text{Ca}}$$

där B är buffring/ytenhet,

L är mäktigheten av skiktet,

D är densiteten och ANC<sub>Ca</sub> är den resulterande neutraliserande kapaciteten baserat på kalciumhalten och svavelhalten.

Med varierande skiktjocklek på materialet fås för TV40fr olika värden för buffringskapaciteten per ytenhet ( $\text{mol/m}^2$ ).

Tabell 5-2. Innehåll av buffrande ämnen i TV40fr.

| L<br>(m) | D<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | ANCCa<br>( $\text{mol/kg}$ ) | Buffring/ytenhet (B)<br>$\text{mol/m}^2$ |
|----------|--------------------------|------------------------------|------------------------------------------|
| 0,5      | 1270                     | 1,68                         | 1066                                     |
| 1        | 1270                     | 1,68                         | 2133                                     |

Trots att alkalinitetsvärden inte är kända från det utgående vattnet kan en uppskattning av buffertkapaciteten göras. Med antagande om halter av kalcium i det utgående vattnet på värdet  $2 \cdot 10^{-2} \text{ mol/l}$  (800 mg/l) som motsvarar att hela lakningen sker under jämvikt med portlandit fås tiden det tar för buffertkapaciteten att uttömmas.

Tiden i år Y fås genom:

$$Y = B / (I \cdot C)$$

där Y är tiden i år,

I infiltrationen i  $\text{l/m}^2 \cdot \text{år}$ ,

C är koncentrationen i  $\text{mol/l}$  och

B är buffring/ytenhet.

Tabell 5-3. Tid innan buffertkapaciteten är uttömd vid olika infiltration och skiktjocklek.

| Förråd<br>( $\text{mol/m}^2$ ) | I<br>( $\text{l/m}^2 \cdot \text{år}$ ) | C $2 \cdot 10^{-2}$<br>$\text{mol/l}$ | År   |
|--------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|------|
| 1066 (0,5m)                    | 500                                     | $2 \cdot 10^{-2}$                     | 107  |
| 1066 (0,5m)                    | 100                                     | $2 \cdot 10^{-2}$                     | 533  |
| 2133 (1m)                      | 500                                     | $2 \cdot 10^{-2}$                     | 213  |
| 2133 (1m)                      | 100                                     | $2 \cdot 10^{-2}$                     | 1066 |

Av tabellen kan också dras slutsatsen att med en infiltration av  $50 \text{ l/m}^2 \cdot \text{år}$  bör buffertkapaciteten räcka i 1000 år.

### 5.3 pH-utveckling

Av betydelse för både buffringen och beständigheten är pH. Med anaeroba förhållanden och lågt gasutbyte kommer jämvikt med kalciumhydroxid att råda. Det innebär ett högt pH-värde i aska-slam blandningen, vilket kan påverka utlakningen av metaller och löst organiskt material, med positiva effekter för vissa metaller och negativa för andra. Buffringen

kommer att vara något sämre i det anaeroba fallet men i gengäld verkar den mikrobiologiska aktiviteten att vara låg, som har noterats i Furulunds "slamdeponi" (se vidare Bilaga J). Om beständigheten definieras som kapacitet att motstå nedbrytning är därför en anaerob situation med högt pH att föredra. Om det finns tillgång till syre kommer emellertid organiskt material att brytas ned i högre utsträckning. Vid denna nedbrytning bildas koldioxid som en viktig gas. Denna reagerar med det kalcium som finns i jämvikt med kalciumhydroxid i lösningen, och kalciumkarbonat bildas, tills all kalciumhydroxid har förbrukats. Efter denna process kommer fortsatt bildad koldioxid att reagera vidare med den fasta karbonaten. Resultatet blir en pH-sänkning som emellertid inte kommer att underskrida pH 6 så länge det är organiskt material som oxideras.

I korthet är det alltså syrefria förhållanden som krävs för att inte nedbrytningen skall medföra en ökad produktion av koldioxid som sänker pH till en nivå där betingelserna för en ökad nedbrytning blir än mer gynnsamma. I viss mån kan denna pH-sänkning orsakad av koldioxid också bero på kontakt med luft, även om halterna i luft är betydligt lägre.

De två olika scenarierna kan sammanfattas:

- Laklösning i jämvikt med kalciumhydroxid → låg syrehalt → låg nedbrytning → något sämre buffertverkan
- Laklösning i jämvikt med kalciumkarbonat → högre syrehalt → högre nedbrytning → bättre buffertverkan.

### 5.4 Fältstudier vid Furulund

Under sommaren 2002 utfördes provtagning av en utfyllnad vid Furulund. Utfyllnaden utgjordes av avvattnat kalkat slam som lades ut 1987 och hade alltså vid provtagningen legat ca 15 år. Resultat och slutsatser från provtagningen redovisas i RVF Rapport 02:18 (Sundberg *et al.* 2002).

Kompletterande provtagning utfördes hösten 2003 med syfte att verifiera tidigare slutsatser avseende beständigheten hos slam stabiliserat vid högt pH. Resultaten från provtagningen redovisas och diskuteras i Bilaga J. Det slam som lagts ut i Furulund utgjordes av ett avvattnat, ej rötat, slam som stabiliserats med kalk. Att slammet inte var rötat innebär att de

lätt nedbrytbara delarna av det organiska materialet finns kvar. Medelvärde av pH i slam/kalk-blandningen vid utläggningen var ca 12. Slutsatsen från dessa fältstudier är att det deponerade stabiliserade slammet genomgår en långsam nedbrytning som huvudsakligen är anaerob. Detta har inneburit att i den övre halvmeter av materialet har det organiska materialet brutits ned till ca 50 %. I det till synes opåverkade skiktet på nivåerna 1,0–2,5 m u markytan har ca 5 % brutits ned enligt utförda beräkningar.

Det kalkade slammet har även studerats i lysimetrar vid Ryaverket (GRYAAB). Lysimetrarna finns beskrivna av Andersson & Mattson (1995). Analys av pH och organisk halt i detta material bekräftar resultaten från Furulund (figur 5-1) – det finns ett samband mellan hög organisk halt och högt pH.

Sammanfattningsvis verifierar provtagningen och analyserna från 2003 resultaten från undersökningen 2002. Högt pH har en fördröjande effekt på nedbrytningen. I tillämpningar där rötat slam används, kan nedbrytningshastigheten förväntas bli avsevärt lägre.

## 5.5 Nedbrytning – fältstudier

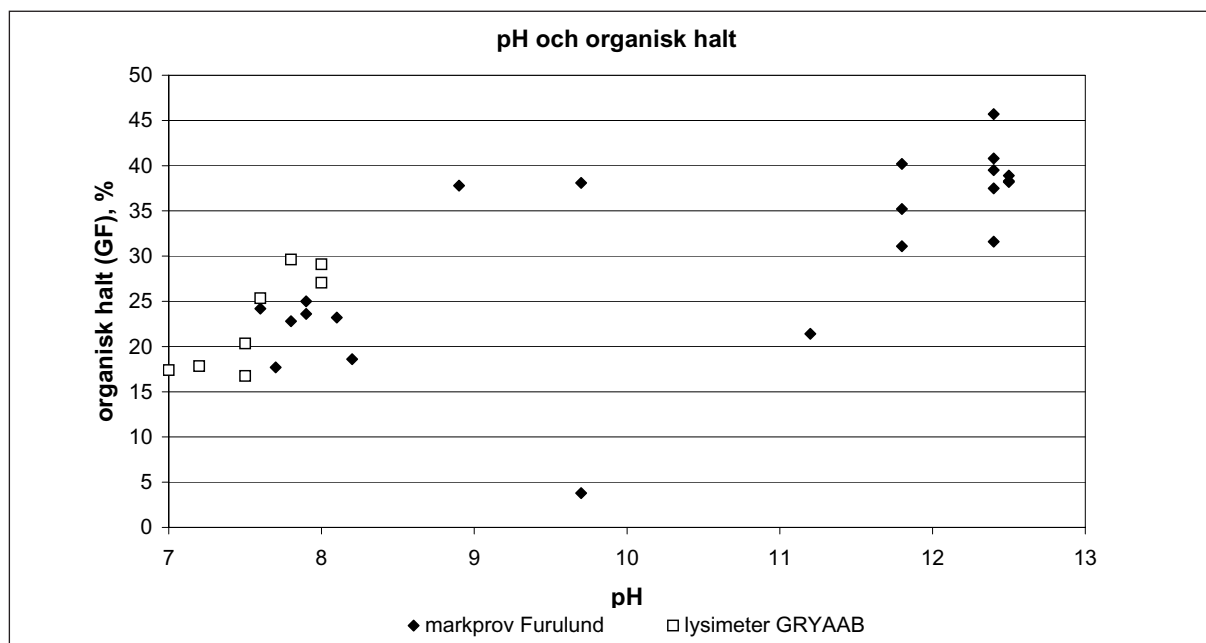
Resultaten från Furulund visar ett tydligt samband mellan pH och nedbrytning, bestämt som totalt kvarvarande organiskt material, och pH i jorden. För

tätskikten vid Tekniska Verken finns ett liknande generellt samband, genom att indikationer på nedbrytning syns genom gasmätningar (se Bilaga F). Metan förekommer i flera skikt. Även koldioxid förekommer, förutom i alkaliska skikt där man kan förvänta sig en utfällning av karbonat. Vid SRV kan man med ledning av gasmätningarna inte dra några slutsatser om nedbrytning i tätskiktet eftersom metanen kan härröra från avfallet. Förekomst av syre i det underliggande avfallet på både SRV och Tekniska Verken gör det svårt att avgöra i vilken utsträckning nedbrytningen är anaerob eller aerob (se även avsnitt 4.7.5).

## 5.6 Beräkning av nedbrytningshastighet

Beräkning av nedbrytningshastigheten kan göras med hjälp av skillnader i uppmätt halt av organiskt material vid blandning av materialet och då materialet legat som tätskikt under en period. Beräkning kan också göras utifrån uppskattat mängd syre som kan diffundera ner i materialet. I detta fall antas att hela mängden syre som diffunderar ner till tätskiktet förbrukas vid nedbrytning av organiskt kol.

Nedan görs en jämförelse av nedbrytningshastigheten under olika förhållanden som undersökts i detta projekt och i föregående etapp (Sundberg *et al.* 2002).



Figur 5-1. pH och organisk halt (uttryckt som glödförlust) i prover från Furulund samt lysimeter vid GRYAAB.

### 5.6.1 Laboratorie- och fältförsök

Resultat från undersökning av det kalkade slammet som lagts ut i Furulund och resultat från inkuber-ringar i laboratorium av slam och slamblandningar redovisades i tidigare rapport (Sundberg *et al.* 2002).

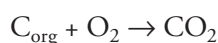
Det material som lagts som provyta vid Tekniska Verken, provtogs då det legat ungefär ett år, se Bilaga F. Proverna undersöktes bland annat med avseende på organiskt material (glödningsförlust, GF). I sam-band med blandning och utläggning undersöktes endast två prover. Vid den senare provtagningen mättes glödningsförlust på nio prover, varav ett har uteslutits på grund av inblandning av bergkross. Det låga antalet prover gör att resultaten är osäkra (ingen signifikant skillnad mellan proven vid blandning och efter ca 1 år, beräknat på 5 %-nivån) och kan komma att revideras om ytterligare provtagningar görs. Mät-resultaten redovisas i tabell 5-4.

Tabell 5-4. Organiskt material (% av TS, medelhalt) i prover från fält pilotförsök på Tekniska Verken.

|           | Vid blandning | Efter ca 1 år |
|-----------|---------------|---------------|
| Slam/aska | 39            | 36            |

### 5.6.2 Teoretiska beräkningar

Teoretiska beräkningar av nedbrytningen har gjorts utifrån antagandet att 1 mol syrgas förbrukas vid mineralisering av 1 mol organiskt kol, enligt:



I Bilaga I beräknas största möjliga mängd syre som väntas diffundera ner till materialet vid olika konstruktioner. Här beräknas mängder utifrån de gradi-enter som uppmätts vid gasmätningar på prover från Tekniska Verkens respektive SRV:s provytor. I övrigt

Tabell 5-5. Antaganden och resultat från teoretisk beräkning av maximal mängd syrgas som kan diffundera ner i materialet.

| Syrekoncentration i skydds- alt. dränsikt (%) | Syrekoncentration i tätsikt (%) | Nivåskillnad (m) | Maximal mängd syre som kan diffundera till tätsiktet (kg/m <sup>2</sup> · år) |
|-----------------------------------------------|---------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 13                                            | 13                              | 1                | 3                                                                             |
| 15                                            | 5                               | 1                | 13                                                                            |
| 20                                            | 5                               | 1                | 19                                                                            |
| 17                                            | 5                               | 0,5              | 30                                                                            |

har samma antaganden som vid beräkningar i Bilaga I gjorts. I tabell 5-5 anges de data som använts vid beräkningarna samt resulterande största teoretiska mängd syre som kan diffundera ner i materialet.

### 5.6.3 Resultat

Resultat från beräkningarna av nedbrytningshastig-heter redovisas i tabell 5-6 (nästa sida).

Eftersom mätresultat från endast två tillfällen har använts kan inget sägas om nedbrytningsförloppen. I dessa beräkningar har antagits att nedbrytningen följer ett linjärt förlopp, vilket är en förenkling. Trots att slammet är rötat kan rester av lätt nedbrytbart material finnas kvar, vilket skulle leda till högre ned-brytningshastighet initialt. I gengäld kan nedbryt-ningen avstanna då slammet blandas med aska och pH höjs kraftigt. Efter en tid, då mikroorganismerna anpassats till miljön, ökar åter hastigheten. Därför gäller den beräknade nedbrytningstiden endast vid den hastighet som räknats fram för de olika fält- och laboratorieförsöken.

Den teoretiskt beräknade nedbrytningshastigheten kan variera kraftigt eftersom gradienten för syre-koncentrationen varierar dels på olika platser på prov-ytorna och dels mellan de olika provytorna. Dess-utom har flera antaganden beträffande materialets beskaffenhet gjorts, se vidare i Bilaga I. Osäkerheten för resultaten är även här stor, dels på grund av gjorda antaganden och dels på grund av osäkerheter i upp-mätta syrekoncentrationer. Gaskoncentrationerna varierar mellan olika provtagningstillfällen.

### 5.6.4 Slutsatser

I allmänhet är aerob nedbrytning mycket snabbare än anaerob. Detta framgår också av beräkningarna av nedbrytningshastighet, se ovan. I anaerob miljö

Tabell 5-6. Beräknad tid för nedbrytning av hälften av det organiska materialet.

| Studie (referens)                                           | Typ av försök                     | Metod       | Tid för nedbrytning av hälften av det organiska materialet |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Tekniska Verken</b><br>(Föreliggande rapport)            | Slam och aska, pilotförsök i fält | GF          | 2 300 dagar<br>(ca 6 år)                                   |
| <b>Beräkning av syrediffusion</b><br>(Föreliggande rapport) | Slam och aska, pilotförsök i fält | beräkningar | 3–28 år                                                    |
| <b>Furulund</b><br>(Sundberg <i>et al.</i> 2002)            | Kalkat slam, 0,3–0,6 m            | GF          | 7 700 dagar<br>(ca 21 år)                                  |
|                                                             | Kalkat slam, 1,0 m                | GF          | 100 000<br>(ca 270 år)                                     |
| <b>Labförsök</b><br>(Sundberg <i>et al.</i> 2002)           | Slam, anaerobt                    | GF          | 710<br>(ca 2 år)                                           |
|                                                             | Slam och stenmjöl, anaerobt       | GF          | 400 dagar<br>(drygt 1 år)                                  |
|                                                             | Slam och aska, anaerobt           | GF          | mycket lång tid*                                           |

\* Under försökstiden (113 dagar) var nedbrytningen så liten att ingen nedbrytningstid kunnat beräknas.

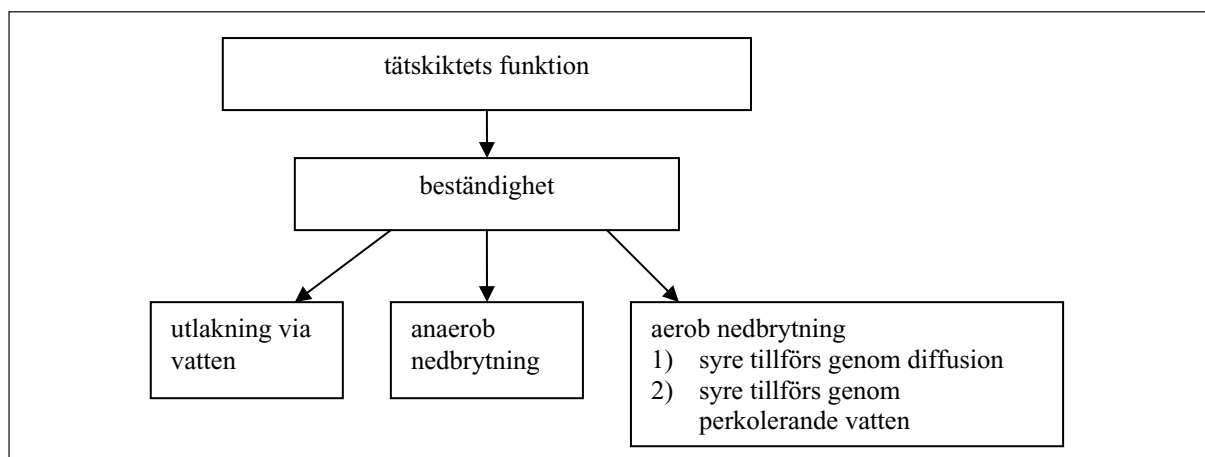
i laboratorium eller på deponi, är nedbrytningen av det organiska materialet betydligt långsammare än i aerob miljö.

## 5.7 Diskussion

Kapacitet att motstå nedbrytning är en av de faktorer som påverkar beständigheten och därmed funktionen hos ett tätskikt. Utlakning av ämnen från tätskiktet kan också ge en minskad beständighet. Med en definition av beständighet som innebär att det är borttransporten av organiskt kol via gas eller vatten som avgör livslängden av ett tätskikt kan sambandet illustreras enligt figur 5-2 nedan.

Den aeroba nedbrytningen har diskuterats i detta projekt (avsnitt 5.1 och Bilaga I) och den anaeroba i tidigare studier (Sundberg *et al.* 2002). Syretillförsel via perkolerande vatten har uppskattats och bedömts vara  $2,2\text{--}3,5 \text{ g/m}^2 \cdot \text{år}$ , dvs. ca tre tiopotenser lägre än syretillförsel via diffusion.

I en rapport av Wikman m.fl. (2005) redovisas försök att bestämma nedbrytningshastigheten genom kolonnförsök. Försöken är genomförda som flerkolonnförsök där ingående faktorer varierar. Faktorerna som varierar är olika blandningar av aska-slam med olika ursprung, aska-slamkvot, tillsats av natriumazid ( $\text{NaN}_3$ ), frysning, torkning, vattenhalt, kompaktering, densitet. Totalt varierades 8 faktorer i försöken som bestod av 72 kolonner. Försöken utfördes i huvudsak under anaeroba förhållanden, utom vid frysning eller torkningsförsök. En viktig slutsats



Figur 5-2. Samband mellan funktion – beständighet – nedbrytning/utlakning.

var att någon bakteriell aktivitet inte kunde påvisas, utan förändringar i materialets TOC-halt antogs främst bero på utlakning av TOC. En tydlig hög utlakning av TOC skedde i början av försöken. Slutsatsen att ingen biologisk aktivitet förekom baseras på att skillnaderna var små mellan kolonner som hade tillförts bakteriehämmare av natriumazid och kolonner som inte hade tillförts bakteriehämmare.

Vidare var slutsatserna att den hydrauliska konduktiviteten inte påverkades av förändringar i TOC, trots eventuella förändringar till följd av nedbrytning eller utlakning. Inte heller frysning/tining gav någon effekt på den hydrauliska konduktiviteten. Däremot påverkades den hydrauliska konduktiviteten av torkning. Nackdelar med försöket var att TOC-bestämningarna i den fasta fasen och den lösta fasen utfördes med olika instrument. Detta kan ha bidragit till en viss osäkerhet i massbalanser för TOC. En beräkning av resttermen av TOC som teoretiskt skulle kunna motsvara gasavgången av organiskt kol gav till resultat att den framräknade resttermen gav ett negativt värde för 28 av de 36 kolonnerna, för de kolonner där analysdata fanns. I sak bör detta emellertid inte ändra bedömningen att gasbildningen åtminstone var låg.

I en rapport av Mácsik m.fl. (2005) uppskattades beständigheten genom mätning av metanbildningspotentialen under anaroba förhållanden för blandningen flygaska-slam, med mätning av metanoxidation och med ett respirationsförsök under aeroba förhållanden. Effekten av andelen flygaska på biologisk aktivitet uppskattades också.

En anaerob nedbrytning konstaterades både i försök med slam och i försök med 40% askblandning. Däremot var gasbildningen fördröjd med upp till två månader. Skillnaden mellan försöken av Wikman m.fl. (2005) som inte upptäckte någon gasbildning och dessa försök kan bero på att i de senare försöken tillsattes dels en ympning av metanogent slam och dels att inkubationen skedde vid högre temperatur. Metanoxidation skedde men med en lång etableringstid. Respirationsförsöken visade en tydlig syreförbrukning. Det höga pH-värdet medför att koldioxid inte kan detekteras eftersom bildad koldioxid löser sig i slurryn. Slutsatserna av undersökningarna var sammantaget att nedbrytning sker både anaerobt och aerobt men att förekomst av aska minskar den biologiska aktiviteten i materialet. Detta beror på högt pH och höga salthalter.

Enligt Mácsik m.fl. (2005) har efter 1 år har maximalt 10 % av materialet brutits ned (utan tillsats

av flygaska). I försök med inblandning av aska sker nedbrytningen långsammare. Maximalt sker en nedbrytning av 5,4 % av det organiska materialet vid en askinblandning av 40 %. Utlakningen av organiskt kol är liten jämfört med materialets totala organiska innehåll. Vid L/S 10 och L/S 100 har maximalt lakats 5 % av det ursprungliga slammet. Eftersom materialet är tätt kommer det att ta lång tid att uppnå dessa värden. Ett räkneexempel i rapporten anger att L/S 10 tar 310 år om perkolationen är 10 l/m<sup>2</sup>. Även om perkolationen är högre (50 l/m<sup>2</sup>) så kommer L/S 10 att uppnås först efter 160 år.

## 5.7.1 Sammanfattning

### Utlakning via vatten

Undersökningarna ger en bild av att materialet lakar organiskt kol, men omfattningen av lakningen bör vara måttlig om tätskiktet uppfyller sin viktigaste funktion (att vara tätt). Något mer organiskt kol lakar om askinnehållet är stort. Utlakningen verkar ha ett maximum i början vilket innebär att utlakningen av DOC relaterat till L/S bör minska med tiden vilket också Mácsik m.fl. (2005) noterade. För de material som initialt hade en hög täthet anses inte utlakningen av organiskt kol påverka tätheten (Wikman *et al.* 2005).

### Nedbrytning

Nedbrytningen kan under optimala förhållanden vara mycket hög men om tätskiktet är delvis vattenmättat bör nedbrytningen bli betydligt lägre. Dränskikt i materialet kan fungera som ingång för luft och ökar risken för diffusion av syre in till tätskiktet som ökar nedbrytningen betydligt. Både anaerob och aerob nedbrytning kan under optimala betingelser orsaka en tydlig minskning av beständigheten. Nedbrytningen har visat sig minska kraftigt vid hög andel askinblandning, särskilt vid laboratorieförsök. Fältförsöken visar däremot inte samma tydliga beroende av askinblandning. Skillnaderna mellan laboratorieförsök och fältförsök kan bero på inhomogeniteter i materialet. Nedbrytning av rent slam kan ske i vissa punkter, denna nedbrytning producerar koldioxid som sänker pH-värdet i övriga delar av blandningen och ökar därmed risken för nedbrytning i dessa delar.

### Tätskiktets funktion

Tätskiktets funktion är inte samma sak som beständigheten. Tätskiktets funktion kan vara acceptabel trots en måttlig beständighet. Buffertkapaciteten är som nämnts tidigare något bättre i ett material som utsatts för nedbrytning, och det kraftigt alkaliska lakvatten som infiltrerar genom ett helt opåverkat tätskikt kan ha en negativ effekt på utlakning av vissa miljöstörande ämnen i tätskiktet eller avfallet, utlakningen av t.ex. zink och bly kan förväntas vara hög i ett sådant lakvatten. Den sänkning av pH-värdet som förefaller vara kopplad till nedbrytningen bör innebära en lägre utlakning av dessa metaller, t.ex. genom karbonatutfällning eller effektivare sorption i avfallet, även om mängderna totalt sett är små för ett tätt material. Den hydrauliska konduktiviteten hos ett material utsatt för nedbrytning behöver inte nödvändigtvis öka vid nedbrytning, eftersom utfällningar bestående av t.ex. kalciumkarbonat kan fungera som tätning av materialet. Detta behöver emellertid verifieras ytterligare. Beständigheten hos materialet är därför inte den enda faktorn som bestämmer om tätskiktets funktion är acceptabel.

En viktig fördel med att ändå sträva efter ett tätskikt med lång beständighet, är att dimensionering av diffusivitet, vattengenomströmning etc., kan göras utan att man behöver hänsyn tas till komplexa kemiska och fysikaliska förändringar under tätskiktets livslängd.

## 6 Hantering av ammoniak

I samband med framställandet av aska/slam-blandning sker ammoniakavgång till luft. Ammoniak bildas när avloppslam blandas med aska. Kvävet kan finnas både i slammet och i askan.

Ammoniakavgången innebär framförallt ett arbetsmiljöproblem (se avsnitt 4.6 ovan), men kan även innebära ett miljöproblem. Miljöproblemet kan uppstå dels vid täckning av bebyggelsenära deponier men även vid blandning i stor skala under lång tid.

### 6.1 Erfarenheter

I Tysklands Bleicherode användes aska och slam-blandning för täckning av "Kalihalden" som är ett restmaterial från saltutvinning (Sundberg *et al.* 2002). Syftet med täckningen är att minska perkolation av vatten genom högarna för att förhindra försaltning av grundvattnet i området. Eftersom produktionen av aska/slam-blandningen genomfördes nära bebyggelse krävdes att lukt och ammoniakutsläpp minimerades. Två principer användes:

1. I blandningsutrustningen suges luft ut och ammoniaken kondenseras. Ammoniaken kondenseras i ett kärl och fälls med svavelsyra och ammoniumsulfat kan erhållas. Detta salt kan säljas till gödselindustrin.
2. Så kallad "luktnedbrytning". Genom att spraya med ett medel som består av vegetabiliskt framställda kemikalier fälls ammoniaken och andra luktaerosoler till marken eller ned i materialet. Medlet sprutas i luften över den lukande slam och askblandningen. Detta kan ske i blandaren, över transportband och över uppsamlingshögar. Tre olika medel förekommer. En består av en tvålprodukt som är lättnedbrytbar (6,5 h halveringstid). En annan produkt använder sig av bakterier som bryter ned luktmolekylerna och på så sätt förhindras lukt. Bakterierna kan bara användas i syrerik miljö. Den tredje produkten består av citronsyra och ättiksyra bundet med socker (ekologiskt nedbrytbart). Denna produkt binder ammoniaken som sedan vid nedbrytning bildar kvävgas. Vid denna behandling är det också viktigt att sprayningen sker på rätt sätt. Till dessa produkter finns också särskilda anläggningar som kan köpas eller hyras (Oeler, muntlig uppgift; Pedersen, muntlig uppgift).

Vid ett möte på Tekniska Verken i Linköping avseende möjligheter att bekämpa ammoniaklukter föreslogs en lösning enligt punkt 2 (Oeler, muntlig uppgift).

Bekämpning av ammoniakavgång till luft i görs bland annat vid ett slakteri i Helsingborg med hjälp av Webers produkter.

## 6.2 Försök

I samband med blandning av aska på SRVs anläggning i Sofielund i Huddinge gjordes mätningar på ammoniakhalter i luft. Syftet var att erhålla underlag för bedömning av om det är en risk för personal som arbetar med blandning och utläggning – se avsnitt om arbetsmiljö (avsnitt 4.6). Utöver att mäta gas i luft kring blandningsanläggningen skulle även enkla försök genomföras avseende omhändertagande av ammoniak från luft.

Blandningen av aska och slam för provytorna utfördes av Gladökrossen som annars arbetar med annan askblandning på området. Gladökrossen blandar rökgasreningsrest (RGR) från avfallsförbränning vid Högdalenverket för stabilisering i sin blandarstation för deponering på Sofielundsanläggningen. Blandarstationen är belägen på Deponi 2000, Sofielund. Vid denna blandning sker en kraftig ammoniakavgång. Ammoniaken finns i RGR och denna drivs av i samband med stabiliseringen då RGR blandas med Monofill och vatten. Inne i blandarstationens utrymme har kraftiga fläktar installerats för att avhjälpa olägenheter i utrymmet. Det bedömdes lämpligt att utföra försök vid denna anläggning eftersom stora mängder ammoniakgas produceras i en sluten blandare. Blandaren innebär att det finns möjlighet att få en jämn produktion av ammoniakgas som kan samlas in och ledas till omhändertagande.

Geo Innova har genomfört ett försök med insamling och omhändertagande av ammoniak från luft. Då ammoniak är löslig i vatten 53,1 g i 100 g vatten (Hägg 1979) bedömdes det vara möjligt att omhändertaga ammoniak från luft genom att lösa den i vatten.

Detta genomfördes genom att luft från askblandarstationen sögs ut via en kompressor från blandarens ventilationskanal. Den uppsamlade luften bubblades genom vatten, se figur 6-1. Ammoniakhalten i luft analyserades vid IVL med hjälp av passiva provtagare. En kapsel sattes på kompressorn där luften sögs in och en kapsel sattes på insidan av vattenbehållaren över vattenytan. Vattenprov togs ut före och efter bubbling för analys av pH och analys av ammoniumkväve, fosfatfosfor, nitratkväve, nitritkväve, tot-kväve och pH. Vattenanalysen utfördes av AlControl.



Figur 6-1. Försöksuppställning. Blandningskammare för Monofill och RGR (rökgasreningsrest från avfallsförbränning). Luft sugs via en kompressor från ventilationskanal till blandaren. Luften tillåts sedan passera vatten i dunken i förgrunden.

## 6.3 Resultat

Två passiva provtagare analyserades med avseende på ammoniak i luft. I tabell 6-1 redovisas resultaten.

Tabell 6-1. Ammoniakhalter i luft. "Luft in" är luft från blandarstationen och "Luft ut" representerar luft över vattenytan.

| Prov                             | Tid (min) | NH <sub>3</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------------------|-----------|--------------------------------------|
| Luft in                          | 50        | >79*                                 |
| Luft ut – provtagare över vatten | 40        | 6,2                                  |

\*Den passiva provtagarens övermättades.

Reningseffekten beräknat på de passiva provtagarna blir mer än 90 %. Analyser av vattnet före och under försöket redovisas i tabell 6-2 (nästa sida).

En överslagsberäkning visar att ca 200 mg NH<sub>4</sub>-N har löst sig i vattnet totalt efter 80 minuters drift (vattenvolymen var ca 7 l). Luftflödet var ca 0,19 dm<sup>3</sup>/s. Enligt den passiva provtagaren var halten i

Tabell 6-2. Ammoniakhalter och pH i vatten.

| Prov             | NH <sub>4</sub> -N (mg/l) | pH  |
|------------------|---------------------------|-----|
| Före             | 0,01                      | 8,2 |
| Efter 40 minuter | 13                        | 9,6 |
| Efter 80 minuter | 28                        | 9,8 |

den inströmmade luften >79 mg/m<sup>3</sup> vilket innebär att >73 mg NH<sub>4</sub>-N har förts till vattnet. Det ger en differens på över 120 mg mellan beräkningen baserad på passiva provtagare och vattenanalyser, vilket innebär att reningseffekten av 90 % baserad på de passiva provtagarna är underskattad.

Ingen lukt kunde noteras från vattnet varför ammoniak inte bedöms avgå i gasfas från vattenytan.

Slutsatser:

- Rent vatten löser ammoniak effektivt. Vatten kan lösa över 500 g/l enligt litteraturen.
- Teoretiskt kan 1 l vatten rena 5000 m<sup>3</sup> luft med en halt av ammoniak om 100 mg/m<sup>3</sup>.
- Reningskapaciteten kan inte bestämmas med detta försök utan nya försök måste utföras för att bestämma kapaciteten i praktiken.
- Det är möjligt att använda vatten för att ta hand om ammoniak från luft. Metoden kräver ett system för att suga upp ammoniakförorenad luft och att föra ner luft i vatten så att ammoniaken löser sig effektivt.
- Det ammoniakbemängda vattnet bör kunna användas som gödselmedel. Tester avseende ev. andra föroreningar bör dock göras.

## 7 Sammanfattande slutsatser

### Tillgång på råmaterial

Det var inledningsvis svårt för två av anläggningarna att få tag på material, vilket är en av anledningarna till att anläggandet av provytor blev förskjutet i tiden. Möjligheterna för avfallsproducenterna att finna avsättning för sina material tycks alltså öka, vilket är positivt, men det innebär också att det vid framtida stora projekt är viktigt att i ett tidigt skede inventera "marknaden" för både aska och slam. Vissa

askor genereras bara under en kort tid av året och tillgången på aska kan förväntas vara den begränsande faktorn för hur stor yta som kan täckas. Sammantaget behövs en långsiktig planering dels för att knyta till sig materialet genom avtalsskrivning, dels för att man vid större täckningar kan behöva använda material från flera olika anläggningar. Det innebär också att blandningsreceptet kan behöva provas ut för olika råmaterial, eftersom egenskaperna hos dessa varierar.

Användning av torr aska är generellt att föredra, eftersom askans härdningsegenskaper då utnyttjas bättre, men innebär svårigheter både ur arbetsmiljö- och miljösynpunkt (damning). Dessutom är det svårt logistikmässigt att lagra stora mängder aska torrt. För att få logistiken att fungera och för att erhålla tillräcklig mängd material, har därför råmaterial vid alla tre anläggningarna lagrats under en viss tid. Detta har påverkat bl.a. TS-halt i materialen, och kan också ha påverkat egenskaper såsom härdningskapacitet hos askan. En rekommendation för att minska förändring av TS-halt är att täcka över askan vid eventuell lagring.

Alternativet till lagring är att blanda och lägga ut i mycket små deletapper, men detta innebär förmodligen högre kostnader (stillestånd för maskiner alternativt nyetablering) och många skarvar med risk för sämre kvalitet där äldre tätskikt skarvas ihop med nytillverkat material.

### Utförande – blandning och utläggning

Tre olika metoder för blandning av aska och slam har provats i större skala inom projektet; tvångsblandare, stjärnsikt och trumsikt. Samtliga har fungerat väl, tvångsblandaren hade dock en del inkörningsproblem. Trumsikt provades vid två anläggningar, med varierande framgång. Det innebär att en och samma metod kan fungera olika väl beroende på råmaterial. Proportionering av råmaterialen (aska respektive slam) har i något fall skett med våg och annars med skopa, vilket inneburit att det varit svårt att erhålla exakta blandningsproportioner. De problem som har förekommit, både vid tillverkningen av tätskiktsmaterialet och vid tidigare utförda förförsök, har oftast varit förknippade med inmatning av slam och att blandningen inte blivit homogen. En slutsats från utförda blandningar är också att begränsa blandningstiden, eftersom slam/aska-blandningen annars blir för "blöt".

En kontroll av blandningens kvalitet har gjorts genom regelbunden analys av TS-halt (vattenkvot).

Spridningen är förhållandevis stor och visar att det är svårt att erhålla en homogen blandning. Även de prover som blandats på labb uppvisar spridning. Detta kan bero på att råmaterialen varierar i kvalitet eller att blandningsproceduren inte är tillfredsställande. Även på laboratorium kan det således vara svårt att erhålla en homogen blandning.

Utläggning av det färdigblandade materialet har skett med hjälp av grävmaskin som bladade ut materialet, vilket fungerade väl. Utläggningen har vid två av provytorna skett i två delskikt, vilket är att föredra eftersom man fördelar inhomogeniteter. Packning har mestadels skett med hjälp av skopa och om materialet bedömts ha tillräcklig bärighet även genom att maskinen kört över materialet med larvfötter. P.g.a. materialets karaktär har någon mer kvalificerad typ av packning (t.ex. med vält) inte varit möjlig att genomföra.

Även uppmätt torrdensitet på packat material uppvisar förhållandevis stor spridning. Den variation i torrdensitet och vattenkvot som syns behöver inte nödvändigtvis spegla skillnader i packning, utan kan också spegla spridning i blandningens sammansättning. Mätningar av torrdensitet på packat material pekar på ett bättre packningsresultat i fält än i labb. Vid de tre provytorna sattes kvalitetskrav (utförandekrav) upp avseende torrdensitet. Detta gjordes utifrån de inledande labbförsöken och med hänsyn till önskvärd hydraulisk konduktivitet. Med utgångspunkten att uppnå en hydraulisk konduktivitet på högst 10–9 m/s, uppfylldes kravet för merparten av punkterna både vid Tekniska Verken och SRV, däremot inte vid Renova.

Väderleken är en viktig faktor för hur väl blandning och utläggning fungerar. Regn skapar problem, vilket var tydligt vid anläggandet av Tekniska Verkens provyta. Ur denna synpunkt rekommenderas att täckning med tätskikt av slam/aska sker under maj–juni. Dessutom är möjligheterna då större att använda relativt färsk aska.

Ammoniakavgång har vid två av anläggningarna (Tekniska Verken och SRV Återvinning) orsakat arbetsmiljöproblem och uppmätta halter visar också på halter runt relevanta gränsvärden. Vid tillverkning av aska/slam-blandning i andra projekt rekommenderas gasvarnare för berörd personal. Det finns tekniker i Tyskland för att undanröja ammoniakproblemet, och kostnaden för detta bör tas med i framtida projektbudgetar.

## Funktion

De inledande labbförsöken visade att det skulle vara möjligt att för vissa blandningar uppnå en hydraulisk konduktivitet på omkring  $10^{-10}$  m/s. Resultat på prover tagna i fält har visat att det kan vara svårt att praktiskt erhålla så låga värden på den hydrauliska konduktiviteten. Vid den provyta som legat längst (Tekniska Verken) visar installerade lysimetrar ett flöde genom tätskiktet på ca  $12 \text{ l/m}^2 \cdot \text{år}$ , vilket innebär att ytan klarar funktionskravet för en icke-farligt avfall deponi. I den del av provytan där dräneringslager saknas är flödet något högre, vilket visar på vikten av ett dränerande lager över tätskiktet. I nuläget går det inte att avgöra om flödet avtar med tiden, en tendens man har sett i andra undersökningar. Av de gasmätningar som utförts går inte att dra några slutsatser om att nedbrytningen är mindre i den delyta som saknar dräneringslager (dvs. att syrediffusionen och därmed nedbrytningen skulle bli mindre).

Ett år efter utläggning är sättningarna i tätskiktsmaterialet små.

## Beständighet

Aska/slam-blandningens beständighet och möjligheterna att motstå nedbrytning bedöms vara väsentlig för tätskiktets funktion i ett längre tidsperspektiv. Syretillgång och pH är faktorer av betydelse, vilket visats både i laboratorieförsök och i fältstudier. Med utgångspunkt från erhållna resultat för mätningar av gassammansättningen i de olika lagren och av pH för färsk och åldrad blandning kan konstateras att det sannolikt pågår en omsättning av det organiska materialet i tätskiktet på provytorna. I relation till tidigare utförda laboratorieförsök (Sundberg *et al.* 2002) var utgångs-pH i materialet lägre. Detta är ett skäl till att nedbrytning sker i materialet i fält, men inte kunde ses i laboratorium. Studier av kalkat slam vid Furulund pekar också på att högt pH har en fördröjande effekt på nedbrytningen. pH verkar därmed vara en kritisk faktor och askans pH har stor betydelse för tätskiktets beständighet.

Nedbrytning av det organiska materialet behöver inte nödvändigtvis leda till en högre hydraulisk konduktivitet, eftersom utfällningar bestående av t.ex. kalciumkarbonat kan fungera som tätning av materialet. Beständigheten hos materialet är därför inte den enda faktorn som bestämmer om tätskiktets funktion är acceptabel.

### **Ekonomi**

Ekonomiskt är tätskikt med aska/slam-blandning konkurrenskraftigt jämfört med konventionella material. Anläggningskostnaden (blandning, utläggning, packning, kvalitetskontroll) bedöms som högre. Däremot blir totalkostnaden lägre, när man tar hänsyn till alternativkostnaden för restmaterialet och effekter av skatteåterbäring etc.

### **Sammanfattning**

Fördelar och nackdelar med tätskikt av aska och slam jämfört med konventionella material kan sammanfattas enligt:

+

- minskat uttag av naturresurser
- nyttiggörande av material som annars skulle deponeras
- kostnadsmässigt fördelaktigt
- ”robust” konstruktion – tjocka skikt som är tillåtande för sättningar, inhomogeniteter m.m.
- enkel teknik vid utläggning

–

- långsiktig beständighet och funktion inte helt klarlagd
- kräver eventuellt planering och lagring av material
- kan kräva något utförligare kvalitetskontroll
- lukt – ammoniakavgång
- ”nyhet” – allmän erfarenhet saknas

### **Råmaterial**

- Långsiktig planering är viktig för att säkerställa tillgång på råmaterial
- Råmaterial (flygaska och rötslam) ska vara så torra som möjligt. Är askan alltför blöt blir den mycket kladdig och svår att blanda, helt torr aska är svår att hantera ur arbetsmiljösynpunkt eftersom den dammar. Om lagring krävs av logistiskäl bör askan täckas över för att minimera förändring av TS-halt.
- Högt pH i aska och blandning ( $\text{pH} > 11$ ) är viktigt, för att förhindra nedbrytning av det organiska materialet.
- Inledande laboratorieförsök är nödvändiga för att karakterisera råmaterialen, undersöka lämpliga blandningsproportioner samt kvalitetssäkra materialblandningen.

### **Blandning och utläggning**

- Förförsök är lämpliga för att testa att tänkt blandningsmetod fungerar praktiskt.
- Blandningstiden bör optimeras, så att inte slamets vatten ”arbetas ut”.
- Utläggning av minst två delskikt rekommenderas, för att fördela eventuella inhomogeniteter och därmed erhålla en tätare konstruktion.
- Utläggning och packning bör ske med larvgående grävare.
- Hantering av ammoniakavgång bör beaktas ur arbetsmiljösynpunkt. Förslagsvis används gasvarnare på berörd personal
- Blandning och utläggning bör ske i maj eller juni, eftersom vädret då kan förväntas vara någorlunda torrt och det finns större möjligheter att erhålla relativt färsk aska.

## **8 Rekommendationer**

Föreliggande projekt har visat att blandningar av slam och aska har goda förutsättningar att utnyttjas som tätskikt vid sluttäckning av deponier. Tätskikt av slam/aska-blandning kan uppfylla funktionskravet för icke-farligt avfall deponier ( $< 50 \text{ l/m}^2$ ).

Med utgångspunkt från de resultat och erfarenheter som erhållits hittills från pilotförsöken i detta projekt ges följande preliminära rekommendationer vid användning av slam/aska-tätskikt i större skala:

## **9 Förslag till fortsatt arbete**

Projektets tidplan blev av olika anledningar förskjuten. En av provytorna (Tekniska Verken) har följts upp under ett år och en provyta (SRV Återvinning) under ett par månader. För den tredje provytan (Renova) blev tidsplanen så förskjuten att någon

egentlig uppföljning inte varit möjlig inom projektet. Slutsatserna från byggandet och den korta uppföljningsperioden visar att slam/aska-blandning kan vara ett material med låg hydraulisk konduktivitet som uppfyller de funktionskrav som gäller på deponier för icke-farligt avfall. Frågetecken finns kring materialets långsiktiga funktion, t.ex. om/hur den hydrauliska konduktiviteten och flödet genom tätskiktet förändras med tiden samt om nedbrytning sker av det organiska materialet och vilka konsekvenser det får för tätskiktets funktion. En fortsatt uppföljning av de befintliga provytorna är därför angeläget.

Även om vissa frågetecken kvarstår, framför allt kring tätskiktets långsiktiga beständighet, är det angeläget att redan nu sammanställa den kunskap

och de erfarenheter som finns på olika håll kring utförande av tätskikt av slam och aska. Intresset för att använda alternativa material vid sluttäckning av deponier ökar och det är därför viktigt att dra lärdom av vad som gjorts tidigare. Utifrån en sådan erfarenhetssammanställning kan råd och rekommendationer ges kring hur tätskikt av slam och aska ska utformas, t.ex. i form av en vägledning. Det är särskilt viktigt att beakta kvalitetsaspekterna, eftersom de ingående materialens kvalitet, eventuell lagring, blandningsförfarande m.m. har stor betydelse för tätskiktets slutliga kvalitet. I detta ingår att studera vilka parametrar som är lämpliga att använda för kvalitetskontroll.

## 10 Referenser

Andersson, I. & Matsson, A., 1995: Lakvatten från slam. Utlakning av närsalter, organiska ämnen och tungmetaller från slam som används vid markanläggningar, GRYAAB Rapport 1995:5.

Arvidsson, H. & Loorents, K.-J., 2005: Askors materialtekniska funktion – VTI:s materialdatabas. Värmeforsk rapport 930.

Bjurström, H. & Wikman, K., 2005: Askanvändning vid samförbränning av RT-flis med olika biobränslen. Värmeforsk rapport 941.

Bjurström, H., Ilskog, E. & Berg, M., 2003: Askor från biobränslen och blandbränslen – mängder och kvalitet. Energimyndigheten. ER 10:2003.

Crawford, J., 1999: A model of pH and Redox Buffer Depletion in Waste Landfills. Ph.D.Thesis. Dept. of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology, Stockholm.

Cronquist, S., 2002: Alternativa material i Stockholms län – askstabilisering av avloppsslam. Kungliga tekniska högskolan. TRITA –LWR Master Thesis: 02-1.

Eriksson, J., 2001: Halter av 61 spårelement i avloppsslam, stallgödsel, handelsgödsel, nederbörd samt i jord och gröda. Naturvårdsverket. Rapport 5148.

Greger, M., 2005: Flygaska och rötslam som tätskikt vid efterbehandling av sandmagasin med vegetationsetablering. Stockholms Universitet. Värmeforsk-projekt Q4-244 (pågående).

Hammar, M., Tekniska Verken i Linköping, muntlig uppgift.

Hägg, G., 1979: Allmän och oorganisk kemi, Almqvist och Wiksell Förlag AB, Stockholm.

Larsson, R., Statens geotekniska institut, muntlig uppgift.

Máscik, J., Maurice, C., Mossakowska, A. & Eklund, C., 2005: Pilotförsök med flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) som tätskikt. Värmeforsk rapport 942.

Máscik, J., Svedberg, B., Lenströmer, S. & Nilsson, T., 2004: FACE. Flygaska i geotekniska tillämpningar Etapp 1: Inventering/tillämplighet. Värmeforskrapport 870.

Máscik, J., Rogbeck, Y., Svedberg, B., Uhlander, O. & Mossakowska, A., 2003: Linermaterial med aska och rötslam – Underlag för genomförande av pilotförsök med stabiliserat avloppsslam (FSA) som tätskiktmaterial. Värmeforsk rapport 837.

Lindberg, J., Statens geotekniska institut, muntlig uppgift.

Naturvårdsverket, 1999: Metodik för inventering av förorenade områden. Bedömningsgrunder för miljö kvalitet. Rapport 4918. Naturvårdsverket förlag.

Naturvårdsverket & Svenska Petroleuminstitutet, 1998: Förslag till riktvärden för förorenade bensinstationer. Rapport 4889. Naturvårdsverket förlag.

Oeler, U, Weber Bioprodukte und Umwelttechnologie (GmbH:s försäljare i Norden). Möte med Tekniska Verken 2004, muntlig uppgift.

Pedersen J., Weber GmbH (kemisk expert). Telefonintervju 2004-04-05, muntlig uppgift.

Samsøe-Petersen, L., 2003: Organic Contaminants in Sewage Sludge. Review of studies regarding occurrence and risks in relation to the application of sewage sludge to agricultural soil. Naturvårdsverket. Rapport 5217.

Sundberg, J. & Nilsson, U., 2001: Användning av avloppsslam för tätning av deponier. Förstudie. RVF 01:17 .

Sundberg, J., Carling, M., Ländell, M., Svensson, B., 2002: Täckning av deponier med blandning av avloppsslam och aska. Erfarenheter, beständighet och andra egenskaper. RVF Utveckling 02:18. (Även VA-Forsk 2003-21).

Wikman, K., Svensson, M., Ecke, H. & Berg, M., 2005: Nedbrytningshastigheten för tätskikt uppbyggda av slam och aska. Värmeforskrapport 943.

Wrene, R., SRV Återvinning, muntlig uppgift.

# Bilaga A: Beskrivning av provytornas utformning samt installerad mätutrustning

Datum: 2005-11-17

Utförd av: Maria Carling & Märta Ländell, Geo Innova AB

## A.1 Bakgrund

Tekniska Verken i Linköping, Renova samt SRV Återvinning AB har medverkat i ett utvecklingsprojekt avseende täckning av deponier med blandning av avloppsslam och aska. Projektet har, förutom av deltagande anläggningar, även finansierats av Värmeforsk, VA-Forsk och RVF Utveckling.

Projektet har syftat till att ta fram lämpliga blandningar av rötslam och flygaska som kan användas som tätskikt vid sluttäckning av deponier. Vissa förberedande undersökningar har gjorts på laboratorium. Avsikten i detta skede har varit att bygga provytor där en blandning av slam och aska har används som material i tätskiktet och att undersöka det praktiska handhavandet i fält.

På vardera anläggningen har en provyta bestående av tre respektive två delytor byggts. Ytan vid Tekniska Verkens anläggning har en area av ca 5500 m<sup>2</sup>, medan de båda andra uppgår till ca 1000 m<sup>2</sup> vardera. Provytorna har byggts under "entreprenadliknande förhållanden".

## A.2 Utformning och konstruktion

Provytorna består av tre (Tekniska Verken) respektive två (SRV och Renova) delytor med likartad utformning. Skiss över Tekniska Verkens provyta finns i figur A-1. För att undersöka hur materialet fungerar vid olika släntlutningar har delytor med olika släntlutning (en flack, ca 1:20, och en brant, 1:3–1:4 på vardera anläggningen) utformats.

Täckningens olika delar vid de olika anläggningarna redovisas i tabell A-1. Det underliggande avfallet på respektive anläggning bestod av:

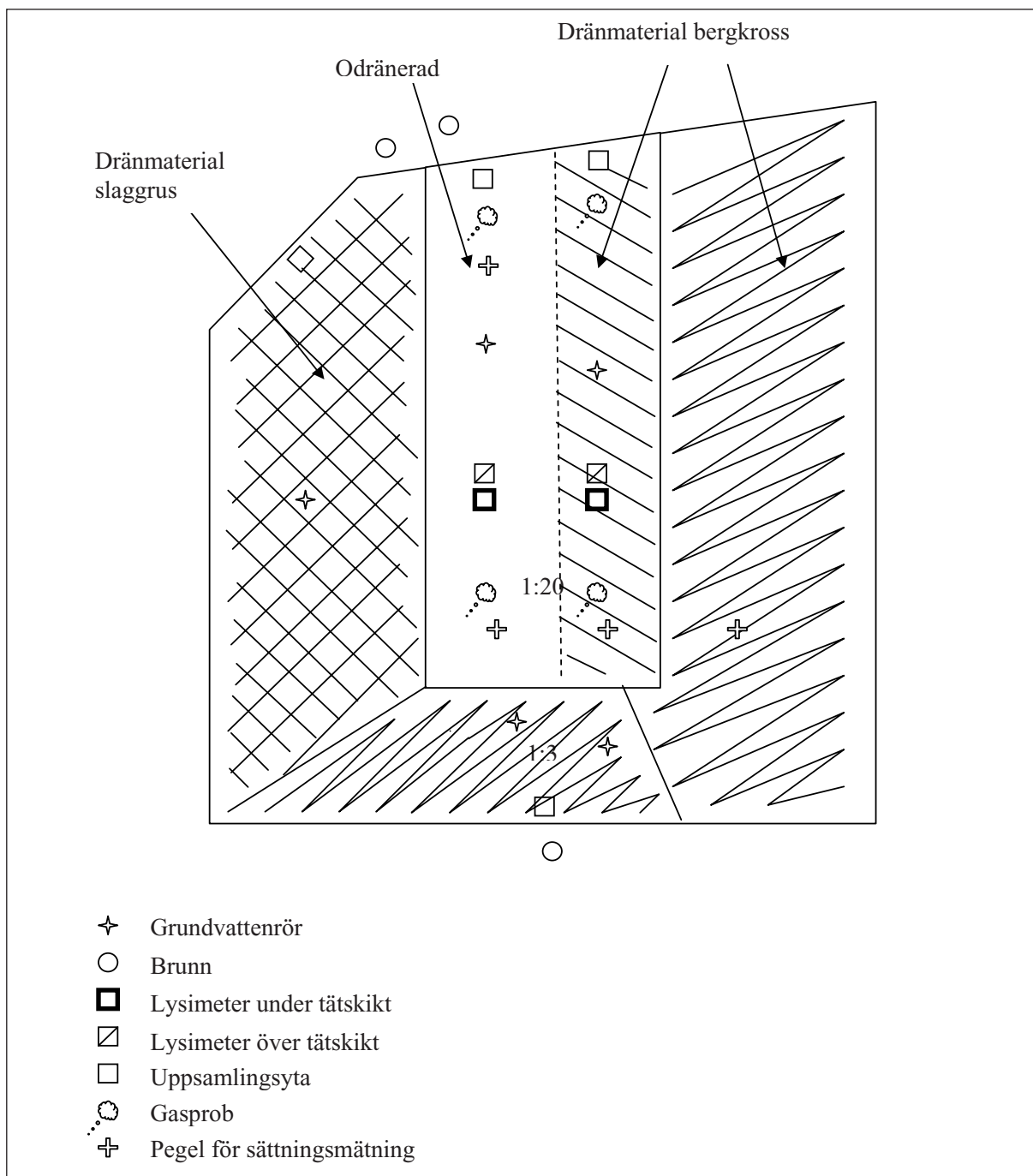
|                 |                                                                                               |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tekniska Verken | Rökgasreningsrest                                                                             |
| SRV             | Sorteringsrest, handels- och industriavfall, hushållens grovavfall, fragavfall från bils-krot |
| Renova          | Grovavfall, livsmedel i förpackning                                                           |

Mellan tätskikt och dräneringsskikt har geotextil lagts ut för att skilja materialen åt. Deponiytorna hade från början inte önskad lutning, vilket innebar att avjämningskiktet har utformats så att avsedd lutning erhållits. Avjämningskiktets mäktighet kan därför variera inom respektive provyta.

I konstruktionerna har också viss mätutrustning installerats, se nedan.

Tabell A-1. Beskrivning av täckningarnas olika delar. Tekniska Verkens provyta består av två delar, en med och en utan dräneringsskikt. (FA-flygaska, BA-bottenaska)

| Skikt                 | Mäktighet (TV) | Material (TV)                 | Mäktighet (SRV) | Material (SRV)             | Mäktighet (Renova) | Material (Renova)    |
|-----------------------|----------------|-------------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------|----------------------|
| Växtetablerings-skikt | 0,2 m          |                               | 0,2 m           |                            | 0,2 m              |                      |
| Skyddsskikt           | 1,3 m (1,5 m)  | oljeskadad jord (behandlad)   | 1,3 m           | Ospec. schakt-massor       | 1,3 m              | Ospec. schakt-massor |
| Dräneringsskikt       | 0,2 m (0 m)    | Slaggrus/ bergkross           | 0,2 m           | Bergkross                  | 0,2 m              | Bergkross            |
| Tätskikt              | 0,5 m          | 50% BA /50% slam              | 0,4 m           | 40%FA/ 45%BA/ 15% slam     | 0,4 m              | 40% BA/ 60% slam     |
| Avjämningskikt        | varierande     | Slaggrus och annan bottenaska | varierande      | BA fr. avfalls-förbränning | varierande         | Schakt-massor        |



Figur A-1. Skiss över Tekniska Verkens provyta. Provtagningsutrustning finns markerad.

### A.3 Utförande

#### Avjämningskikt

Avjämningskiktet utgörs av slaggrus respektive bottenaska och har lagts ut med grävska. Materialet har packats och utläggningen dokumenterats.

#### Tätskikt

##### Blandning

Tätskikten vid respektive provyta utgörs av slam/aska-blandning som har blandats på plats.

##### Utbredning och packning

Slam/aska-blandningen har lagts ut och packats på de olika provytorna. Packningen skulle säkerställa god hållfasthet och minska innehållet av luft i materialet.

### Geotextil

En geotextil har lagts på tätskiktets överyta. Detta för att undvika att grövre material (bergkross i dränskiktet) skulle blandas med slam/aska-tätskiktet.

### Dränskikt, skyddsskikt, växtetableringsskikt

Dränskikt, skyddsskikt och ev. växtetableringsskikt har lagts ut och packats enligt gängse metod. Mellan dränskikt och skyddsskikt har geotextil lagts. Arbetet har dokumenterats dels med foton, dels med en kort skriftlig beskrivning där också ev. problem/erfarenheter noterats (se vidare nedan).

### Installation av mätutrustning

Exakt placering av mätutrustning har avgjorts direkt i fält. Utrustningen har placerats utspridd (för att minska inbördes påverkan) och inte i direkt anslutning till delytornas kanter (för att minska randeffekter). Utrustningen har även placerats så att packning inte skulle försvåras.

### Sättningspeglar

För att undersöka eventuella sättningar i de olika skikten, har sättningspeglar installerats på olika nivåer i täckningen. En sättningspegel består av en bottenplatta (60 · 60 cm) med ett järnrör som har skruvats fast i centrum på bottenplattan, se figur A-2. Rörets längd beror på överliggande lagers mäktighet, toppen av röret sticker upp ur den färdigtäckta ytan. Då nytt lager påförts har materialet packats noga intill röret. Vid SRVs och Renovas anläggningar utgör vissa rör även grundvattenrör, vilket innebär att filter har installerats vid botten, se nedan.

På varje delyta har sättningspeglar installerats på följande nivåer:

- på avjämningskiktet (dvs. under tätskiktet)
- ovanpå tätskiktet
- i skyddsskiktet (ca 0,5 m under överytan)

Inom varje grupp har sättningspeglarna placerats så nära varandra som möjligt, men på ett sådant avstånd att det är möjligt att packa materialet runt järnrören.

På SRVs och Renovas provytor har inte separata grundvattenrör installerats, utan på den pegel som



Figur A-2. Exempel på sättningspegel.

satts på tätskiktet har nedersta rörbiten utgjorts av ett särskilt perforerat rör. Detta rör används sedan för grundvattennivåmätning. Runt detta rör har ett "filter" av grus eller bergkross lagts, till en höjd av ca 40 cm.

För att särskilja de olika sättningspeglarna färgmarkerades rörtopp enligt följande:

|                       | Tekniska Verken | SRV    | Renova |
|-----------------------|-----------------|--------|--------|
| i skyddsskiktet       | röd             | orange | röd    |
| på tätskiktet         | gul             | grön   | gul    |
| på avjämnings-skiktet | blå             | blå    | blå    |
| antal peglar          | 12              | 10     | 12     |

Efter färdigställandet av täckningen har avvägning och inmätning av sättningspeglarna gjorts.

### Grundvattenrör

För att kontrollera ev. vattentryck på tätskiktet har grundvattenrör installerats på provytorna. Rören har satts ner till tätskiktets överyta. Rören är ej avsedda för vattenprovtagning.

På Tekniska Verkens provyta har fem grundvattenrör av plast installerats.

På SRV:s och Renovas ytor har inga särskilda grundvattenrör installerats. Istället utgör de sättningspeglar

som placerats på tätskiktet också grundvattenrör (fyra stycken på varje anläggning). Dessa rör är perforerade längst ned.

### Lysimeter

För att infiltrerat vatten ska kunna analyseras till mängd och innehåll har lysimeter installerats (uppsamlingsytor) under och ovan tätskiktet. Placeringen har dokumenterats och inmätning gjorts i anslutning till installationen. Två större lysimeter har placerats under tätskiktet och två mindre lysimeter över tätskiktet på respektive anläggnings provyta.

Lysimetrarna är kvadratiska och har 16 m<sup>2</sup> respektive 4 m<sup>2</sup> yta. De utgörs av plastgeomembran (1,5 mm syntetiskt geomembran av HDPE eller motsvarande) med utlopp. Den *undre lysimetern* har placerats i överkant av avjämningsskiktet. Ovanpå plastgeomembranet har en skyddsgeotextil lagts med syfte att skydda membranet, dränera och förhindra kross att tränga ned i rörledningen. Över lysimetern har ett tunt lager (ca 5 cm) med dränerande material (grus eller bergkross) lagts, se figur A-3.



Figur A-3. Exempel på utformning av lysimeter. Ovanpå geomembranet har geotextil lagts som skydd och därefter grus/bergkross.

Utloppet utgörs av stös som har svetsats mot plastgeomembran (figur A-4). Det tidigare installerade utloppsröret har anslutits till stosen som försetts med lock. Genom stös och utloppsledning och så nära lysimeterbotten (geomembranet) som möjligt, har hål borrats. Hela ytan ska luta in mot utloppet.

Den *övre lysimetern* har utformats på samma sätt, men placerats nedströms (minst 1 m ifrån) den undre lysimetern. Lysimetern har placerats ovan tätskiktet och ledningen anslöts på motsvarande sätt som för den undre lysimetern.

Rörledningarna har dragits till gemensam brunn, innan tätskiktet påfördes. Ledningarna har lagts i



Figur A-4. Exempel på utlopp för lysimeter. Stös svetsad mot geomembranet och med utloppsledningen ansluten.

lutning mot brunnen. I brunnen har en dunk eller annan typ av behållare installerats för insamling av perkolatet. Insamlingskärlet har kontrollerats och tömts regelbundet (se kontrollprogram). Exempel på brunn ges i figur A-5.



Figur A-5. Exempel på brunn för uppsamling av vatten från lysimeter och/eller avrinningsyta.

Funktionen hos lysimetrarna har testats med vanligt vatten då skyddslagret med grus lagts på (dvs. innan tätskikt respektive dränsikt lagts ut). Vattnet har analyserats som ett referensprov med avseende på bakgrundshalter. Analysen har gjorts på filtrerat prov.

### Uppsamlingsyta för "ytavrunnet" vatten

För att undersöka halterna av metaller och näringsämnen i det vatten som rinner av på tätskiktets yta (dvs. i dränlagret) har en avrinningsyta installerats i nederkant på deponiytan. Avrinningsytan (16 m<sup>2</sup>) består av tätduk av samma typ som lysimetrarna. Avrinningsytan ena sida "dyker in" i tätskiktet, men den har i övrigt utformats på samma sätt som lysimetrarna (det vill säga med lutning mot utloppet). Avrinnande vatten leds till utlopp och vidare till behållare för insamling av ytavrunnet vatten i brunn, se figur A-5.

Insamlingskärlet har kontrollerats och tömts regelbundet.

Funktionen på avrinningsytan har testats med vanligt vatten innan nästa lager (dränskiktet) påförts.

Totalt har två avrinningsytor, en på varje delyta, installerats per anläggning.

### Gasprob

För att undersöka gassammansättningen i de olika skikten har gasprober installerats. Syftet har varit att ringa in var eventuella förändringar i gassammansättning sker (dvs. i vilket skikt) samt att få en uppfattning om ev. nedbrytning i tätskiktet. En exempel på gasprob redovisas i figur A-6.



Figur A-6. Exempel på installation av gasprob.

På Tekniska Verkens anläggning har tolv gasprober, fördelade på fyra grupper, installerats. Totalt har sju installerats på delytan med dränskikt och fem på den odränerade delytan. På SRV:s och Renovas ytor har en omgång, å 4 gasprober, installerats på varje delyta (plan respektive brant), dvs. totalt 8 gasprober på varje provyta. Gasproberna har installerats på olika nivåer i deponin:

- i avfallet
- i tätskiktet (ovanpå det första lagret, i det andra lagret)
- i dränskiktet
- i skyddsskiktet

Vid installationen har proben först placerats lodrät på ytan, varefter sand påförts runtom för att skydda proben. Därefter har omgivande material (beroende på nivå/skikt) påförts. Slangen för gastransport har sedan dragits upp genom ett skyddsrör, se figur A-7. Skyddsröret har fyllts med sand och bentonit för att slutligen täckas med lock.

Varje skyddsrör innehåller slang från en gasprob. För att särskilja gasproberna från olika nivåer har färgmarkering gjorts överst på skyddsröret enligt:

|                 | Tekniska<br>Verken | SRV           | Renova        |
|-----------------|--------------------|---------------|---------------|
| Skyddsskiktet   | <i>Grå</i>         | <i>Svart</i>  | <i>Orange</i> |
| Dräneringsskikt | <i>Röd</i>         | <i>Orange</i> | <i>Röd</i>    |
| Tätskiktet      | <i>Gul</i>         | <i>Grön</i>   | <i>Gul</i>    |
| Avfallet        | <i>Blå</i>         | <i>Blå</i>    | <i>Blå</i>    |

Efter färdigställande av täckningen har inmätning av respektive skyddsrör gjorts.



Figur A-7. Installation av skyddsrör för gasprob.

## A.4 Kvalitetssäkring, kontroll och uppföljning

Ett av syftena med provytorna har varit att ta till vara erfarenheter både kring hantering och byggande av ytor samt funktionen hos täckningen. Kontroll och uppföljning har därför varit en mycket viktig del i projektet. Kontroll i fält i samband med utförande samt uppföljning beskrevs i särskilt kontrollprogram för anläggningarna.

### Inmätning och avvägning

Efter färdigställande har inmätning och avvägning av provytorna utförts. Detta har gjorts i form av rutnät med c/c 10 m. Utifrån denna nivåbestämning har av ytans fall (lutning) bestämts.

Installerad mätutrustning har mätts in och avvägs i enlighet med instruktionerna (dvs. i flertalet fall i samband med att de installerades).

Inmätning och avvägning av provytans överyta har gjorts med totalstation. För inmätning av respektive mätutrustning har inmätning med GPS bedömts vara tillräcklig. Avvägning av sättningspegel och grundvattenrör har gjorts med en noggrannhet av  $\pm 1$  mm. Vid avvägningen har en lokal fixpunkt använts.

### Dokumentation och kontroll i fält

#### Dokumentation

Hela arbetet med provytorna (blandning, utläggning, packning, installation av mätutrustning etc.) har dokumenterats med hjälp av fotografering. Dessutom har noggranna anteckningar förts över utförandet (använda metoder och utrustning) och erfarenheter (t.ex. eventuella svårigheter eller problem). Väderleken under tiden för utförandet har noterats. Anteckningar har förts över när en ny hög/leverans med råmaterial påbörjats och var varje dags produktion (alternativt varje sats) av slam/aska-blandning lagts ut. Dokumentation gjordes på enkla kartskitser och i dagboksform.

#### Materialkontroll

Torrsubstanshalt (vattenkvot) har mätts på det lagrade råmaterialet några gånger under blandningsperioden.

På SRV:s yta har skjuvhållfastheten undersökts i fält (med hjälp av konförsök). Noteringar om lukt, utseende etc. har gjorts på särskilt fältprotokoll. På något prov har även pH, glödningsförlust, skjuvhållfasthet och permeabilitet bestämts.

#### Densitetsmätning

Densitet i utlagt material (slam/aska-blandning) har mätts med hjälp av isotopmätning i ett antal punkter jämt fördelade över ytan. Som komplement har även densitetsmätning genom gropgrävning och manuell mätning av vikt resp. volym i några punkter, utförts. Utifrån detta har en indirekt bestämning av permeabiliteten kunnat göras (genom jämförelse med tidigare utförda CRS-försök i laboratorium).

### Uppföljning

Uppföljning av provytornas funktion har gjorts med hjälp av installerad kontrollutrustning, enligt nedan:

- registrering och analys av perkolerat och ytaavrunnet vatten
- sättningsmätning i täckningens olika skikt
- mätning av gas (syre, metan, koldioxid) i de olika skikten
- grundvattennivåmätning i observationsrör

Uppföljningen har beskrivits i särskilt kontrollprogram.

# Bilaga B: Erfarenhetssammanställning från täckning av RGR-cell med aska/slamblandning som tätskikt, Gärstad deponi hösten 2004.

*Datum: 2005-03-07*

*Utförd av: Maria Wikander och Magnus Hammar,  
Tekniska Verken i Linköping AB*

det var utläggningen av tätskiktet klar.

Vecka 44 påbörjades sedan utläggningen av de återstående skikten och nu kunde ett helt annat arbetstempo upprätthållas.

## B.1 Förberedelser

En förberedelse som kan få stor betydelse för hur mycket massor som ska fram och följaktligen hur lång tid arbetet kommer att ta är att göra en noggrann uppskattning av storleken på ytan. Vi uppskattade ytan i projekteringsskedet till dryga 5000 m<sup>2</sup> och uppskattade skyddsskiktets massor till ca 6500 m<sup>3</sup>. Nu har det visat sig att ytan snarare är närmare 5500 m<sup>2</sup> och att de massor som har körts ut uppnår 8500 m<sup>3</sup> eftersom ytan dessutom måste fasas av en bit utanför själva cellen, vilket vi inte tagit med i beräkningen. Följden blev att arbetet tog längre tid och kostade mer.

Viktigt är också att det finns tid avsatt för kontroller på plats då provuttag, fotografering, analyser, provinstallationer, problemlösning m.m. tar längre tid än man tror.

## B.2 Tidsplanering

Tidsplaneringen för projektet föll ganska snart på grund av problem med blandningsentreprenaden. Från början var det sagt att täckningen skulle ta 1 månad totalt, det tog i stället knappa 2 mån. Redan intrimningen drog ut på tiden och de fyra första blandningsveckorna (39–42) gick arbetet väldigt trögt och det första lagret av blandat material lades ut (drygt). Orsaken var stillestånd till följd av att flera maskiner gick sönder eller stannade (generator, stjärnsikt), bränslebrist som inte uppmärksammades(!), felaktig kvalitetssäkring med mera. Nästföljande vecka (43) lades det andra lagret ut och i och med

## B.3 Råmaterial

Delar av problemet med blandningen orsakades av skrot i råmaterialen. Skrot ska inte förekomma vare sig i slam eller flygaska så den enda rimliga förklaringen är att det måste ha följt med antingen när aska och slam högades upp för lagring på askdeponin eller när lastmaskinen hämtade de båda råmaterialen för ilastning i askficka respektive stjärnsikt. Delar av lagringsytan utgjordes av bottenaska från avfallsförbränning.

Askan som användes vid blandningen varierade i sammansättning. Samtliga högar med lagrad aska var täckta under lagringstiden. Torrhalten varierade mellan 55–67 % och i en del högar hade dessutom aska härdat ihop så att stora kockor följde med i skopan, vilket orsakade problem med igensättning doseringen. Om askdosering på liknande sätt ska användas måste kvalitén på askan säkerställas innan den körs ut för lagring eller så bör en genomgång/kvalitetsbestämning av lagrad aska göras innan blandningen dras igång. Under blandningsentreprenaden bör dessutom askhögarna täckas efter varje avslutad produktionsdag, framför allt om väderleken är dålig.

Slam var upplagd i 2 högar. Den mindre högen höll en torrhalt på 36–37 % och den större högen hade en torrhalt på 27–30 %. Båda högarna låg ute över sommaren vilket ledde till att en hårdare skorpa på ytan bildades. Stjärnsikten som användes för matning av slam fungerade inte tillfredsställande, delvis beroende på den hårdare skorpan. Kanske är stjärnsikt inte bästa metoden för matning av slam. Homogenisering av slammet före inmatning i sikten kan vara en lösning.

## B.4 Blandning

Blandningskammaren var ett modifierat asfaltsverk. I början blev blandningen för kompakt, förmodligen p.g.a. att slammet höll en högre torrhalt än vad som antogs från början. Skovlarna klarade inte att mata ut materialet och blandningen blev så kompakt att drivremmarna gick av. Skovlarna modifierades och då fungerade det bättre och blandningen såg homogen ut.

I kontakterna och diskussionerna med entreprenören hade kvalitetssäkringen i fråga om kontrollerad inmatning av aska och slam till blandaren varit central och entreprenaden inleddes i vår tro att askmatningen kontinuerligt styrdes av invägd slam-mängd till förutbestämda proportioner. Det visade sig att materialen vägdes men att någon proportionerlig matning inte skedde, utan att vikterna bara registrerades. Doseringen skedde genom manuell reglering av hastigheten på matarbanden.

Detta var inte tillfredsställande och entreprenaden avbröts tills entreprenören kunde visa upp ett styrsystem som matade materialen så som var överenskommet. Halva materialmängden var blandad när entreprenaden avbröts. När blandningen kom igång igen skedde matningen som var sagt och matade mängder loggades, men vägningen av slammet fungerade dåligt och registrerade inte små mängder slam, vilket ledde till att delar av slammets matades in utan asktillsats.

När vädret försämrades (blötare) blev askan svårhanterlig och gick inte längre att mata genom askfickan. Vi fick då börja förblanda aska och slam med lastmaskin för att sedan mata in det i blandaren via stjärnsikten. Vid det här laget gick materialet inte att gå på längre med bandgrävmaskin vid utläggningen.

Vid blandningen bildas ammoniak och inom en radie av 3 meter kring blandningskammaren var det störande/irriterande. När materialet lastades i eller lastades av kom en dust med ammoniaklukt men denna gång något mindre irriterande. En svag ammoniaklukt kunde kännas från utlagt material.

## B.5 Tätskikt

Kvalitetsmässigt blir det svårt att säkra materialet som utgör tätskiktet i och med att det finns flera osäkerheter för ingående råmaterial (sammansättning, mängder m.m.). Däremot finns provutrustning installerad på ytan för att följa upp funktionen på tätskiktet i efterhand.

Utläggningen av tätskiktet fungerade bra. Mest positivt var att materialet (i början) faktiskt gick att gå på för grävmaskinen vilket ingen av oss hade förväntat sig. Det kan ha att göra med att askinblandningen kanske var större i början eftersom det var problem med slammatningen. Analyserna på provuttaget material antyder att materialet var något torrare i början (första lagret) och blötare mot andra halvan av täckningen. Andra halvan av täckningen gick materialet inte längre att gå på ens för grävmaskinen, här spelar också vädret in eftersom väderleken blev allt sämre mot slutet av utläggningen. De prover som togs ut mot slutet visar dock inte så mycket lägre torrhalter som man hade kunnat tro utifrån hur materialet betedde sig, vilket tyder på att även en liten mängd vatten på blandningens yta får stor effekt på egenskaperna.

Packning gick att göra med både grävmaskin och skopa under första halvan av täckningen, dock inte i branten (1:3) som hade för kraftig lutning för maskinen. När materialet sedan blev blötare och exponerat för regn betedde det sig plastiskt och när skopan tryckte spjärnade blandningen emot. Det blev också svårt att släta till ytan med skopan då materialet häftade fast och brott uppstod när skopan fördes över ytan.

Det svåra är att göra avvägningen mellan fördelarna med packning gentemot fördelarna med rätt torrhalt så materialet innehåller tillräckligt med slam och inte torkar ut. Det blir en avvägning mellan täthet genom packning eller täthet genom slaminnehåll och även en prioritering mellan hållfasthet och täthet.

## B.6 Dränskikt

Två olika dränmaterial används, bergkross och slaggrus. Det har fungerat bra med utläggningen av båda

materialen. Slaggruset dammar dock en hel del vid framför allt avlastningen.

## B.7 Skyddsskikt

Till skyddsskiktet användes förorenade jordmassor som har behandlats på deponin (oljeskadad och/eller metallförorenad jord). Även dessa luktade en hel del när man vistades på och runt dem och precis som med de flesta material när de hanterades (lastades, flyttades mm).

Bärligheten var sämre än beräknat och i stort sett bara maskiner med larvfötter som kunde gå på massorna vilket försvårade utläggningen. Grövre massor användes till att bygga transportvägar ut på ytan för dumparna.

## B.8 Provutrustning

Förvara provutrustning inlåst! Kontrollräkna all utrustning vid leveranser. Försök vara så förutseende som möjligt med installationerna så att de inte stoppar upp arbetet.

**Lysimetrar** – Vi valde få och stora lysimetrar, två över och två under tätskiktet, för att få mycket vatten för provtagning etc. Tyvärr har tillrinningen från lysimetrarna över tätskiktet brutits av okänd anledning. En osäkerhet vid få lysimetrar är också att utvärderingsunderlaget blir litet och resultaten kan bli missvisande om ytan inte är representativ.

**Avrinningsytor** – Har fungerat bra. Ytorna är 16 m<sup>2</sup>. Vissa problem att få till en jämn övergång där ytan skulle ”dyka ner” i tätskiktet. Ask/slamblandningen gled på duken så någon jämn övergång var svår att få till. Dessutom var det svårt att förhindra att duken veckade sig.

**Gasprober** – Installationerna gick bra. En del av skyddsroren runt proberna ser ut att ha flyttats lite av schaktmassorna men det bör inte spela någon större roll.

**Sättningspeglar** – Har överlag fungerat bra med installationerna. Ett av roren gick dock av när grävmaskinisten försökte räta upp det med skopan. Övergången mellan plattan och röret är känsligast för

påfrestningar. Efter att schaktmassorna har lagts på ser en del av peglarna ut att ha hamnat lite på sned gentemot hur det stod vid utplaceringen. Försök att placera ut peglarna så nära varandra som möjligt.

**Grundvattenrör** – Det har varit svårt att placera ut roren och lägga schaktmassor runt omkring utan att roren går av vid skarven mellan det slitsade röret och förlängningsröret. Röret med slitsarna är svajigt och måste stötts upp med massor. Vid första grundvattennivåmätningen (med piplod) konstaterades att 2 av 5 grundvattenrör var av, med andra ord rekommenderas i fortsättningen kraftigare rör alternativt järnrör. Nya rör sattes i efterhand som ersättning för de skadade.

## B.9 Väderlek

Det finns fördelar och nackdelar med olika väder. Är det torrt så dammar det mer men är det blött och fuktigt blir materialet mer svårhanterligt. Det regniga och fuktiga vädret mot slutet av blandningsentreprenaden är en starkt bidragande orsak till att blandningen försvårades och att materialet inte gick att gå på. Det blev även svårare att packa.

## B.10 Rekommendationer

Utifrån erfarenheterna från det här täckningsprojektet följer här en kortfattad sammanställning med rekommendationer för liknande framtida projekt.

- Gör en så noggrann uppskattning som möjligt av områdets yta och de materialmängder som krävs. Det underlättar tid- och kostnadsuppskattningar. Avsätt tid för kontroller, provinstallationer med mera.
- Se till att blandningsentreprenören tar till tillräckligt med tid för etablering, provblandningar, intrimningar m.m. Det är bra att inte anta att materialet kommer att bete sig på ett visst sätt.
- Kvalitetssäkra råmaterialen så långt det är möjligt antingen redan från att restprodukterna faller eller genom kontroller när de väl finns på plats vid den aktuella ytan. Försäkra dig om att det inte finns föroreningar i materialen.

- Det kan vara värt att lägga tid och pengar på att testblanda de aktuella materialen, inte bara typen av material (aska och slam).
- Se till att blandningsentreprenören har ett system för att kvalitetssäkra blandningen till exempel genom styrsystem, loggning med mera.
- Om det finns risk för föroreningar som skrot kan det vara idé med en magnetavskiljare eller ett sorteringsverk av något slag innan blandningskammaren.
- Betänk luktproblematiken. Det luktar en hel del ammoniak vid blandningen.
- Om möjligt dokumentera noggrant var varje dagsproduktion läggs ut som tätskikt. Låt maskinpersonalen föra anteckningar när de bryter nya stackar eller påbörjar nya högar samt vilka erfarenheter som erhålls vid utläggning/packning.
- Går det att få till en blandning som går att köra på är det givetvis en fördel. Lutningen 1:3 kan vara för brant för att en tillräckligt bra packning ska kunna göras.
- Ha framförhållning med installation av provutrustning. Kontrollräkna vid leverans och förvara utrustningen så säkert som möjligt. Fundera lite extra över vilken typ av grundvattenrör som ska användas, det är bra om de inte är för sköra. Placera ut peglarna på de olika nivåerna inom varje grupp så nära varandra som möjligt, gärna ovanpå varandra om möjligt.
- Planera in täckningen på sommarhalvåret för att öka chanserna till vackert väder. Täck över råmaterialen i möjligaste mån om det är risk för regn/fukt. Det kan även vara bra att ha lite tidsmarginal framåt i tiden om det skulle visa sig att täckningen drar ut på tiden. Lägg alltså helst inte täckningen i september eftersom oktober och november ofta bjuder på allt sämre väder.

# Bilaga C: Erfarenhetssammanställning från anläggande av provyta för sluttäckning med tätskikt av flygaska och rötslam vid Sofielunds deponi

*Datum: 2005-11-18*

*Utförd av: Rickard Wrene, SRV Återvinning AB*

## C.1 Råmaterial

### Askor

Avfallsproducenten (dvs. ”förbrännarna”, värmeverken, värmekraftverken o.s.v.) som erhåller askorna som restprodukt vid sin energiutvinning gör som regel upphandling med följande avtalsskrivning för omhändertagandet av askorna.

För den aska, från förbränning av RT-flis som vi använde i detta försök var det redan en förutsättning från avfallsproducenten att askan skulle nyttiggöras och att avfallsskatt ej skulle behöva utgå. Dvs. det fanns redan annan mottagare som nyttjade askan på något konstruktivt sätt. Ur avfallsproducentens synvinkel var utebliven avfallsskatt i detta fall ingen nyhet som på ett avgörande sätt påverkade valet av den ena eller andra mottagaren.

Askas i försöket kommer från en bubblande fluidbäddpanna på 24 MW<sub>th</sub>. Det produceras tre askflöden från pannan, vid fullast ca 3 ton bäddaska (bottenaska), ca 3 ton ecoaska och ca 4 ton flygaska (rökgasreningsrest) per dygn. Ecoaskan sammanförs med flygaskan till en silo medan bäddaskan förs till en täckt lastväxlarcontainer. Under ett år blir det ca 2300 ton flyg+ecoaska och ca 1000 ton bäddaska.

För försökets yta om 1000 m<sup>2</sup> mottogs under 36 dagar 180 ton från flygaskasilon och 125 ton bäddaska, sammanlagt 305 ton. Som referens räcker årsproduktionen av aska från denna panna till ca 10 000 m<sup>2</sup> med motsvarande blandning som användes i försöket.

Vid tidpunkten för de inledande laboratorietesterna (permeabilitet och hållfasthet) var ursprunglig tanke att endast använda flygaskan. Det visade sig dock att hållfastheten blev låg så för att öka denna

blandades även bäddaskan in i tätskiktsblandningen. Nämnas ska att vid denna tidpunkt gick inte ecoaskan till flygaskasilon utan till containern med bäddaska. Därefter har man byggt om askutmatningen vid värmeverket så att ecoaskan, som är relativt fin-kornig jämfört med övrigt material i bäddaskan, transporteras till flygaskasilon. (Anledning att värmeverket gjorde denna ombyggnad var att kunna minska tömningsfrekvens på containern med bäddaska.) Med den kornstorleksfördelning och sammansättning som bäddaskan i containern har idag, ca 80 % 2–5 mm, 10% 5–8 mm, 10% >8 mm och därutöver en del (icke magnetiskt) skrot har den en grov struktur (pansand/panngrus) och är därför mindre lämplig att använda i tätskiktsblandningen samtidigt som man kan förvänta en mer hållfast blandning av flygaska+ecoaska jämfört med bara flygaska som det var i de inledande laboratorieförsöken.

Sammantaget behövs en långsiktig planering dels ur synpunkten att knyta till sig materialet genom avtalsskrivning och dels att vid större årliga täckningar kan man behöva knyta till sig material från flera olika anläggningar. Askas kan förväntas vara den begränsande komponenten när det gäller hur stor yta som kan täckas. Om askan kommer från olika anläggningar måste man pröva ut proportionerna i blandningen för varje aska, då dessa har mer eller mindre unika egenskaper från panna till panna.

### Rötat slam

Avfallsproducenterna (dvs. avloppsreningsverken) handlar upp och skriver avtal för omhändertagandet av rötslammet. Typisk avtalstid är tre år. I vårt fall hänvisades vi från reningsverket till den entreprenör som de avtalat om omhändertagandet med. Inget av de ca 37000ton slam (så gott som 100% är rötat) från avloppsreningsverk i Stockholms län deponerades under 2003. Ca 40% användes vid jordtillverkning, ca 40% vid deponitäckning (Aitikgruvan i Gällivare) och resterande inom jordbruk och övrig användning (Länsstyrelsen i Stockholms län 2005).

Vid tidpunkten för de inledande laboratorieförsöken användes slam från Käppalaverket. När provytan skulle anläggas hade ny upphandling för omhändertagandet skett vilket ledde till att rötslam från Himmerfjärdsverket användes i stället. Rötslammen från de olika reningsverken har olika TS-halt vilket ledde till att blandningsförhållandena fick justeras. Slammet från Käppala hade dock relativt låg TS-halt så detta utbyte snarast förbättrade förutsättningarna att göra en materialblandning som uppfyllde kriterierna i försöket.

## C.2 Transport och lagring av material

### Askor

Flygaskan kom helt obefuktad från värmeverket och utrustning för befuktning är ej heller installerad. För att få så bra egenskaper hos tätskiktet som möjligt var även utgångspunkten att det är en fördel om askan hålls torr så nära utläggnings och packnings-tidpunkt som möjligt. Askan reagerar och börjar härda så snart fukt tillsätts.

Ur transport- och lagringssynpunkt ställer torr flygaska särskilda krav då vindspridning sker extremt lätt med arbetsmiljö- och miljökonsekvenser som följd. Transport och lagring måste därför ske i ett slutet system ända till dess fukt har tillsatts askan så den dammbinds.

För att åstadkomma denna befuktning var vi hänvisade att använda en betongblandningsstation som finns vid Sofielunds återvinningsanläggning. Efter som denna dels inte fanns etablerad på plats vid projektets inledning och dels är en relativt dyr hantering övervägdes först andra möjligheter utan att komma fram till någon tillfredställande lösning.

Vid värmeverket lagras askan i en silo som töms när mängden i denna är ca 30–40 ton. Tömning sker slutet via en stös som ansluts till bulkbil med släp (tankbil för pulvermaterial). Vid mottagningsplatsen, dvs. betongblandningsstation finns silo som fylls via blåsning genom slang från bulkbil i ett slutet system. Vid blandning tas askan från silon via skruvutmatning (via våg) till blandningstråget också i slutet system.

I och med att den tillgängliga silon vid mottagningsplatsen endast rymmer en leverans flygaska,

motsvarande ungefär en veckas produktion, måste befuktning och tömning ske i etapper med motsvarande tidsintervall så att nästa transport flygaska kan tas emot (i samband med befuktning blandades även bäddaskan in då blandningsstationen är utrustad med möjlighet att dosera flera material). Efter befuktning lades den befuktade askblandningen på hög i väntan på slutlig inblandning av rötat slam. Denna förblandning skedde vid 5 tillfällen med en dryg månad mellan första och sista tillfället. Av rationella skäl gjordes detta val framför att direkt efter befuktning blanda ihop det med rötslam med direkt påföljande utläggning och packning av tätskiktet.

Fördelar med det val som gjordes var

- Man slapp att binda upp maskinutrustning med mycket stillestånd, eller göra flera etableringar; stjärnsikt med hjullastare som utförde inblandning av rötslam, lastbilen/dumpern som transporterade blandningen till platsen där tätskiktet lades (ca 1 km), samt grävmaskinen som planerade ut och packade tätskiktet. (Blandningsstationen står permanent uppställd i detta fall)
- Alternativet att lägga ut och packa tätskiktet i fem etapper med ca en vecka mellan hade inneburit mer skarvar, med risk för sämre kvalitet, där veckogammalt tätskikt skarvas ihop med just färdigblandat.

Bäddaskan levererades i lastväxlarcontainer och tippades på lagringsyta i anslutning till blandarstationen. Vid längre lagringstider bör askan täckas med t.ex. plansilofilm (PE-plast).

### Slam

Slammet transporterades på lastbilsekipage med tre stycken lastväxlarflak på, sammanlagt 25–30 ton per transport. På hårdgjord yta ordnades en invallning där rötslammat lossades. Det var dock så fast att det inte flöt ut. Då vi inte var säkra på hur mycket som skulle gå åt, och inte ville ha överskottsslam utan lämplig avsättning på anläggningen, beställde vi lite i underkant av vad vi trodde behövdes, med löfte om snabb leverans av kompletterande behov.

## C.3 Blandning

Det blandningskoncept som vi kom fram till bestod av tre moment.:

| <i>Blandningsmoment</i>                                             | <i>Utrustning</i>                          | <i>Motiv</i>                                                      |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1. Befuktning och förblandning av flygaska med bäddaska.            | tvångsblandare typ betongblandningsstation | för att dammbinda i första hand flygaskan                         |
| 2. Förblandning av befuktad aska från moment 1 med rötslam          | skopblandning med hjullastare.             | för att proportionera ingredienserna inför blandning i stjärnsikt |
| 3. Slutlig blandning, homogenisering av förblandning från moment 2. | stjärnsikt och hjullastare                 | för att få en (tillräckligt) homogen blandning                    |

Erfarenheter från dessa beskrivs nedan.

### Moment 1. Befuktning och förblandning av flygaska med bäddaska

Som nämnts ovan var syftet med detta blandningssteg att dammbinda flygaskan för att förebygga arbetsmiljö- och miljökonsekvenser.

Utrustningen som användes i detta moment;

- Tvångsblandare av typ betongblandningsstation (blandningstråg 3 m<sup>3</sup>, silo 40 m<sup>3</sup> (?) för flygaska, matarfickor för granulärt material vilket är bäddaskan i vårt fall, vattendosering). Med denna utrustning kan materialen flygaska, bäddaska och vatten blandas satsvis så att proportionerna är väl säkrade genom vägning. Styrningen av utrustningen är datoriserad och rapporter på blandade satsar kan tas ut.
- Hjullastare för ilastning av bäddaskan i matarfickan.

För att få en acceptabel dammbindning behövdes vatten blandas in så att vattenkvoten hamnade på 10–15 %. Blandningstid per sats var mellan en halv till en minut.

Blandningen upplevdes homogen med undantag från en begränsad mängd ”kulor” (drageér) med fuktig mantel och torrt inandöme. Längre blandningstid ger mer sådan kulbildning.

Problem som noterades var att skrotbitar (icke magnetisk metall som ej separerat i värmeverket) i bottenaskan tillfälligtvis orsakar oljud och skakningar i blandaren då de fastnar mellan bladarm och trågets botten. I större omfattning skulle detta

kunna vara skadligt för utrustningen enligt den bedömning som gjordes.

### Moment 2. Förblandning av befuktad aska, från moment 1, med rötslam

Innan slutlig blandning i stjärnsikt görs en skopblandning (hjullastaren) med materialet från moment 2. Anledning till att denna förblandning görs är att stjärnsikten ej är en satsblandningsutrustning i egentlig mening (man har ingen direkt kontroll/styrning av blandningstid och utmatning av blandning). Ingredienserna bör därför vara väl proportionerade då dom läggs i stjärnsiktens matarficka.

Utrustning som användes;

- Hjullastare (utan våg)

Eftersom använd utrustning saknade våg skedde doseringen av aska resp. rötslam baserat på volym vilket innebar att den viktbaserade mängden behövde räknas om till volym.

Dessutom (enligt beskrivning ovan) användes till vid utförandet av provytan ett annat slam, med högre TS-halt, än det vi hade tillgång till vid projektets inledande labförsök (som låg till grund för receptet). Därför fick först detta recept justeras med hänsyn till slammet. Detta gjordes beräkningsvägen för att få en grov uppfattning med hänsyn till TS-halt. Med detta som utgångspunkt provades sedan receptet fram rent fältmässigt via ett par prov med blandning i stjärnsikten (det slutliga blandningsmomentet). Två

fulla hjullastarskopor per skopa förblandad aska gav en blandning med plastiskt beteende vid packning och dessa proportioner användes därför till en början. Detta ändrades under den tredje byggdagen till 2,5 slam per skopa aska då utförandekontrollen visade att vattenkvoten var låg i förhållande till tidigare erfarenheter.

Förblandningen gick till så att slam och aska lades ut på arbetsytan i önskade proportioner med askan ovan på slammet. Därefter jobbade maskinisten igenom materialet, med målsättning att blanda in askan i slammet men samtidigt undvika att systematiskt förändra proportionerna. Förblandningarna gjordes i regel kampanjvis upp mot en halv dags produktion, dvs. ca 70 ton. Denna typ av arbete är i hög grad beroende av maskinistens skicklighet.

Vattenkvoten i materialet som blandades i volymproportionerna 2 skopor slam per skopa visar ett betydligt jämnare resultat från de provuttag som gjordes. Förklaring *kan* vara att det är mindre entydigt, svårare att avgöra hur mycket 2,5 skopor är och att precisionen i blandningen därför har minskat efter att dessa blandningsförhållanden började tillämpas. Av denna anledning är bättre möjligheter till mätning vid doseringen att föredra, t.ex. våg på hjullastaren.

### **Moment 3. Slutlig blandning, homogenisering, av förblandning från moment 2.**

Syftet med detta blandningsmoment är att göra materialet så homogent som möjligt.

Utrustning som användes;

- Stjärnsikt REMU (en materialficka med matarband, siktbord med roterande "stjärnor" av stål, siktbordet har ställbar stigningsvinkel, utmatningsband för rejekt, utmatningsband för siktad/blandat material)
- Hjullastare (samma som används vid förblandning)

Det som är speciellt med stjärnsikten är siktbordet (dvs. själva sållet) som består av roterande "stjärnor" som dels slår sönder överstora klumpar i materialet dels transporterar materialet framåt på bordet ända tills det faller igenom. När man som i detta fall har material som slam och aska verkar stjärnorna även så att dom slår in aska i slammet. Genom att vinkeln på bordet kan ställas (mer eller mindre uppförbacke

i transportriktningen) reglerar man hur mycket materialet bearbetas så att det blir väl blandat och att inte onödigt mycket går ut via rejektutmatningen för överstort material. På den sikt som användes fanns även en gummimatta över siktbordet med funktion att lägga tryck på överstora stycken, som kommit ända fram till detta, så att dessa bearbetas effektivare av stjärnorna (och inte mer eller mindre bara studsar).

### **Utförandet av stjärnsiktningen:**

Det skopblandade materialet läggs i stjärnsiktens matningsficka på stillastående band. Bandet startas därefter. Färdig blandning går ut via transportband under siktbordet antingen till hög på marken eller direkt till lastbilsflak. Går det direkt till lastbilsflak sparar man en lastning. Stjärnsikten står då still medan lastbilen kör, i vårt fall, först över våg upp och sedan upp för tippning vid utlägningsplatsen. Detta tog 6–8 minuter. Under denna tid kan hjullastaren ägna sig åt förblandning t.ex.

Under arbetets gång hände det att mer än obetydlig mängd slam, dvs. så mycket att receptet/tät-skiktet bedömdes påverkas oacceptabelt, gått ut som *rejekt* (överstort material). Det har i dessa fall varit fråga om hårdare klumpbildningar, ev. härstammande från partier som under längre tid legat ytligt vid lagring och därför torkat/hårdnat. Vid sådana fall har det hjälpt att köra materialet ytterligare en gång genom stjärnsikten. För att inte ändra proportionerna i receptet måste rejektet (eller motsvarande mängd) återföras till blandning som kommit ut korrekt väg, via utmatningsband under siktbord. Dessa har då än en gång lagts i matningsfickan och körts genom stjärnsikten oftast med betydligt mindre mängd rejekt. Problem uppstår dock när det redan körts upp fler än en sats som ligger i en hög, eller på lastbilsflak, under utmatningsbandet. Det går då inte att avgränsa vilket rejekt som hör till vilken sats. Eftersom detta är normalfallet är därför erfarenheten att man i möjligaste ska undvika rejekt genom att välja bort partier i slammet som hårdnat samt justera in sikten så bra som möjligt.

Resultaterande blandning blev lucker (fluffig) och homogen med undantag av 10–20 % "kulor" ca 4–16 mm bestående av aska på mantelytan och slam i övrigt. Materialet behåller i stort sett fluffigheten genom hantering med hjullastare, transport på lastbil och tippning utan häfta vid skopa, flak etc.

Dagsproduktionen var mellan 133 och 183 ton. Notera att det var en maskinist som utförde både förblandningen med hjullastaren och utförandet av blandning med stjärnsikt inklusive ilastning med hjullastare.

Tydlig ammoniakdoft kändes både vid förblandning och vid stjärnsiktning. Maskinisten som skötte detta upplevde tidvis irritation i luftvägarna på grund av ammoniakutveckling vid blandningsarbetet.

## C.4 Utläggning och packning av tätskikt

Utrustning som användes;

- Grävmaskin BM EC210BLC

Lastbilen som transporterade materialet från blandningsplatsen tippade tätskiktsmaterialet i så nära som möjligt den plats där utläggning för tillfället pågick, helst inom grävmaskinens räckvidd. Då slänten var för brant (1:3) för lastbilen att köra i fick grävaren bära (köra skopa för skopa) en hel del av materialet i släntens nedre del.

Tätskiktsmaterialet behöll i stort sina luckra egenskaper även vid utplanering med grävmaskinens skopa.

Inga hjälpmedel som peglar eller liknande användes som hjälp för att hålla rätt skiktjocklek. Grävmaskinisten lyckades ändå väl med att hålla den planerade skiktjockleken 20 cm. Ett antal stickprov i det undre skiktet låg alla mellan 21 och 24 cm. Resultatet kan antas vara i hög grad beroende av maskinistens skicklighet.

Vid packning uppförde sig materialet plastiskt ungefär som lera. Packning skedde effektivast med larver även om viss spårbildning blev. Dessa spår jämnades till med skopan då maskinen backade ur ett färdigpackat parti.

Före det att proportionerna i receptet ändrades från 2 delar slam per 1 del aska till 2,5 slam per 1 aska gick det att packa med larverna i slänten även om vissa problem med slirning upplevdes. Efter ändringen var blandningen blötare och maskinen kanade något så att larvpackningen inte fungerade längre. Man var då hänvisad till packning med skopan och att packningen skedde i stråk inte bredare än maskinens räckvidd. Detta drog ner tempot. Det

var också besvärligt att trycka till ordenligt med skopan i slänten vilket även visade sig i densitetsmätningarna som gjordes. Trots att maskinen gick på sidan av det utlagda materialet sattes material i larvbanden med dåligt grepp som följd.

Utläggning av dräneringslager (bergkross 4–8 mm) skedde på tredje dagen (tätskikt fredag, drän måndag) efter att tätskiktet lades ut och packades. Det var då knappt att ytan bar lastbilen. Eftersom ytan i detta fall var liten fungerade att lägga materialet längs kanterna till att börja och därifrån planera ut det med grävaren. Lastbilen byttes mot dumper någon dag senare. För att lägga ut dränmaterial i slänten fick del av skyddsskiktet (morän, schaktmassor) läggas ut (ovanpå dränskiktet på den plana ytan) och användas som väg för dumpern att köra in materialet på.

## C.5 Kostnader

Denna kostnadssammanställning gäller själva blandnings och anläggningsarbeten. Följande förutsättningar gäller:

- Intäkter för mottagning av råmaterialen flygaska, bäddaska och rötat avloppsslam är ej redovisade då dessa är plats-/anläggnings specifika.
- Terrasseringen, underlaget för tätskiktet är redan anlagt vid projektets start.
- Kostnader (arbete och material) för installation av provutrustningar, såsom lysimetrar, peglar, avrinningsytor, uppsamlingsbrunn, gasprober etc., som är specifika för detta forskningsprojekt ingår ej är ej medräknade.
- Den anlagda ytan är 1000 m<sup>2</sup> och består av
  - 40 cm tätskikt utlagd i två delskikt om 20 cm vardera
  - ca 30 cm dränlager med materialskiljande lager geotextil polyfelt TS30 (bruksklass 3) under och över
  - ca 100cm skyddsskikt av icke förorenade schaktmassor som körts in fritt, utan kostnad till deponin.
  - Växtetableringsskikt ej anlagt.
- Anslutning mot tidigare anlagt sluttäckning av bentonitmatta har skett mot en sträcka av ca 90 m. (friläggning rensning och påläggning av ny överlappande bentonitmatta)

- Bedömning av arbetstid som kan relateras till utförandekontroll ingår.
- Kostnader för utprovning av recept/blandningsproportioner för aska och slam ingår ej.

|                                                                                                                             |       |                |   |       |                   |                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------|---|-------|-------------------|-------------------|
| <b>Mottagning, blandning och befuktning av flygaska och bäddaska (silo, betongblandningsstation, mm)</b>                    |       |                |   |       |                   |                   |
| Lagring i silo blandningsstation m.m.                                                                                       | 305   | ton            | á | 150   | kr/ton            | 45 750 kr         |
|                                                                                                                             |       |                |   |       |                   | <b>45 750 kr</b>  |
| <b>Förblandning aska/slam med hjullastare och blandning med stjärnsikt Remu+hjullastare BM L-70C (Inkl. en st personal)</b> |       |                |   |       |                   |                   |
| Mängd blandat material                                                                                                      | 626   | ton            |   |       |                   |                   |
| Stjärnsikt REMU                                                                                                             | 37    | tim            | á | 500   | kr/tim            | 18 500 kr         |
| Hjullastare BM L-70C                                                                                                        | 39    | tim            | á | 500   | kr/tim            | 19 500 kr         |
| <b>Transport till utläggningsplats</b>                                                                                      |       |                |   |       |                   |                   |
| Mängd tätskiktmaterial                                                                                                      | 596   | ton            |   |       |                   |                   |
| Mängd bergkross 4–8mm                                                                                                       | 480   | ton            |   |       |                   |                   |
| Lastbil                                                                                                                     | 43    | tim            | á | 500   | kr/tim            | 21 500 kr         |
| Dumper                                                                                                                      | 24    | tim            | á | 500   | kr/tim            | 12 000 kr         |
| <b>Utläggning och packning av tätskikt Aska/slam</b>                                                                        |       |                |   |       |                   |                   |
| Mängd material                                                                                                              | 596   |                |   |       |                   |                   |
| Grävmaskin BM EC210BLC                                                                                                      | 28    | tim            | á | 600   | kr/tim            | 16 800 kr         |
| Etablering grävmaskin                                                                                                       | 1     | st             | á | 2 250 | kr                | 2 250 kr          |
| <b>Anslutning mot tidigare anlagt sluttäckning av bentonitmatta</b>                                                         |       |                |   |       |                   |                   |
| Grävmaskin BM EC210BLC                                                                                                      | 9     | tim            | á | 600   | kr/tim            | 5 400 kr          |
| <b>Utläggning dränskikt och geotextil</b>                                                                                   |       |                |   |       |                   |                   |
| Grävmaskin BM EC210BLC                                                                                                      | 19    | tim            | á | 600   | kr/tim            | 11 400 kr         |
| Lastbil                                                                                                                     | 5     | tim            | á | 500   | kr/tim            | 2 500 kr          |
| Dumper A25                                                                                                                  | 20    | tim            | á | 600   | kr/tim            | 12 000 kr         |
| <b>Utläggning utbredning skyddskikt</b>                                                                                     |       |                |   |       |                   |                   |
| Grävmaskin BM EC210BLC                                                                                                      | 14    | tim            | á | 600   | kr/tim            | 8 400 kr          |
| Lastbil                                                                                                                     | 12    | tim            | á | 500   | kr/tim            | 6 000 kr          |
| Bladschakt maskin (CAT 18 ton)                                                                                              | 16    | tim            | á | 1 000 | kr/tim            | 16 000 kr         |
| <b>Utförandekontroll</b>                                                                                                    |       |                |   |       |                   |                   |
| ca 3 tim/arbetsdag                                                                                                          | 30    | tim            | á | 700   | kr/tim            | 21 000 kr         |
| Hyra densitetsmätare (troxler)                                                                                              | 2     | dagar          | á | 900   | kr/dag            | 1 800 kr          |
| <b>Inköpt material</b>                                                                                                      |       |                |   |       |                   |                   |
| Geotextil (bruksklass 3)                                                                                                    | 2 400 | m <sup>2</sup> | á | 4     | kr/m <sup>3</sup> | 9 600 kr          |
| Bentonitmatta (4,85*90m)                                                                                                    | 450   | m <sup>2</sup> | á | 35    | kr/m <sup>3</sup> | 15 750 kr         |
| Bergkross 4–8 mm                                                                                                            | 480   | ton            | á | 61    | kr/ton            | 29 280 kr         |
| <b>S:a</b>                                                                                                                  |       |                |   |       |                   | <b>54 630 kr</b>  |
| <b>Totalt:</b>                                                                                                              |       |                |   |       |                   | <b>229 680 kr</b> |

För anläggandet av provytan var kapaciteten på blandningsenhet och utbrednings/packningsenhet väl avstämda mot varandra. Men då hade grävmaskinisten en del extra arbete med installationer av lysimetrar m.m. Med tanke på dagsproduktionen av ca 180 ton blev det låg effektivitet för lastbilen.

## Referenser

Länsstyrelsen i Stockholms län, 2005: Slam från avloppsreningsverk, Rapport 2005:10.

# Bilaga D: Erfarenheter från täckning med slam och aska på Tagene deponi, Renova 2004–2005

*Datum: 2005-11-16*

*Utförd av: Malin Fält, Renova*

## D.1 Förberedelser

På Tagene deponi finns många verksamheter förutom deponi och därför var det svårt att få använda en plats för den här typen av provyta. Platsbristen resulterade i att ytan fick läggas där den störde den övriga verksamheten minst. Det var kanske inte den mest optimala platsen då ytan hamnade för högt upp, men det var den enda plats som fanns att tillgå. Ytan omfattar två delytor om ca 500 m<sup>2</sup> styck. Det enda som skiljer delytorna åt är lutningen en om ca 1:20 och en med lutningen 1:5.

Täckningen utfördes på en del av deponin främst bestående av grovavfall och lite livsmedel i förpackning. Utjämnningen av deponin gjordes med krossad betong och slaggrus.

## D.2 Tidsplanering

Det uppstod vid flera tillfällen fördröjningar i den ursprungliga tidplanen. Förseningarna berodde på allt från att vi själva inte hade slaggrus att tillgå när avjämnningen skulle ske till att material som beställt anlände felaktigt. Under våren var planen att blandningen skulle ske under sommaren, men den planen föll snabbt då entreprenören hade brist på folk under semestertider.

## D.3 Råmaterial

### Slam

För Renova var det inga större problem att få tag i den mängden slam vi behövde för projektet. Gryaab som tillhandahöll slammet är själv med i projektet och har ett egenintresse i att finna avsättning för sitt slam. Slammet levererades i anslutning till att blandning skulle ske.

### Aska

Grundplanen när vi gick in i projektet var att använda den aska vi ändå fick in som avfall från Mölndal energi. Den planen gick också snabbt i graven då dessa började leverera till deponin Kikås som håller på att avslutas.

För att ändå kunna genomföra projektet kontaktades Göteborg energi. Dessa erbjöd oss att skänka aska till oss under projektet om vi kunde göra upp det med RagnSells agro som använde askan i sina jordblandningar. Aska som fanns att tillgå var aska från pelletsförbränning som sker i Ryahamnen i Göteborg.

Pelletsförbränningen sker bara under den kallaste delen av året och kan således bara samlas in under vinterhalvåret. Askan hade lagrats utomhus fram till dess att blandningen utfördes. På askhögen bildades en skorpa som tycks ha skyddat högen från hårdningsprocessen. Askan levererades lätt fuktad i container.

## D.4 Blandning

Blandningen utfördes med en så kallad trumsikt 0–20 mm som kördes utan rengöringsborsten. Innan materialet matades i sikten gjordes en förblandning med skopa på hjullastaren. Blandningen av slam och aska kördes igenom sikten två gånger och rejektet som sikten kastade ut blandades in under andra

blandningsomgången. Avgången av ammoniak var inte på något vis störande för de som arbetade med blandningen, men kunde kännas i närheten av rejekthögen.

## D.5 Utläggning

Utläggningen av tätskiktet tog ungefär en och en halv dag och utföres av en hjullastare som körde upp det blandade materialet och en grävmaskin som packade det med skopan. Tätskiktet var så pass kladdigt att det inte bedömdes möjligt att lägga det i två omgångar.

## D.6 Väderlek

Vi hade turen på vår sida under den period som vi blandade och lade ut tätskiktet. Hösten var torr och varm.

## D.7 Rekommendationer

- Avsätt tid för den person som skall leda projektet genom att frisätta denne från någon annan uppgift. Det tar mer tid än man kan tro.
- Planera i god tid för att skaffa in råmaterialen och skriv gärna avtal om leverans av dessa. Askan som vi fick blir ju bara till på vintern och måste eventuellt samlas ihop under flera år för att kunna genomföra liknande projekt.
- Tänk på att provutrustningen skall ha samma dimension på kopplingarna. Vi hade problem med övergången från lycimeters utlopp till PEM-slangen.
- Tänk på att handla upp entreprenörer och material i god tid.

# Bilaga E: Ytutlakningsförsök

*Datum: 2005-12-02*

*Utförd av: Karsten Håkansson, Andreas Carlsson, Geo Innova AB*

## E.1 Inledning

Utlakning av miljöstörande ämnen till omgivningen kan ske på olika sätt. För granulära material sker utlakningen i första hand då vattnet strömmar genom ett material. Testmetoder finns standardiserade för denna situation och gränsvärden för utlakning av ämnen från avfall finns angivna i mottagningskriterier (NFS 2004:10). Om materialet är tätt kommer utlakning till följd av genomströmning fortfarande att finnas, men då den hydrauliska konduktiviteten är lägre än ca  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s kommer utlakning via diffusion att bli den dominerande processen för utlakning.

Konstruktion med tätskikt görs i avsikt att minska perkolationen genom materialet. Det innebär att en del av det infiltrerande vattnet kommer att rinna av på tätskiktets överyta antingen via dräneringslagret, om sådant finns, eller på tätskiktets översida. Med de uppmätta hydrauliska konduktiviteter i tätskikten är det troligt att den dominerande processen vid utlakning styrs av ämnens diffusion till det avrinnande vattnet snarare än genomströmning genom tätskikten.

## E.2 Metodik

Målsättningen med ytutlakningstest är att undersöka den tidsberoende utlakningen av ämnen från ytan ut i bulkvattenfasen. Till skillnad från kolonnlakning som är ett dynamiskt test (vatten strömmar genom/förbi provet) är ytutlakning ett statiskt test (prov i stillastående vatten). Metoden som används här är i princip i enlighet med NEN 7345, (1994) som är ett nederländskt test designat för utlakning av oorganiska ämnen. Denna metod är lämpad att

användas om man är intresserad av att undersöka utlakningen från t.ex. en hel yta, i motsats till kolonnlakning som lämpligen används för t.ex. uppbrutet/krossat materials utlakning.

Principen är i stort att materialet packas i en cylinder. En bestämd mängd vatten fylls på och detta byts efter bestämda tidsintervall. Lakvattnet analyseras därefter på ämnen av intresse. Resultat av de analyserade parametrarna anges som utlakad mängd per tidsintervall, vilket skiljer den från utlakning via genomströmning som primärt redovisar utlakningen som funktion av L/S.

Vid ytutlakning är det av betydelse att klarlägga huruvida den är diffusionsstyrd eller ej. Vid diffusionsstyrd utlakning finns möjlighet att beräkna utlakningen av ett ämne för en betydligt längre period än de dagar som ytutlakningstestet bygger på. För att avgöra om utlakningen är diffusionsstyrd eller inte beräknas, (NEN 7345 1994) först det aritmetiskt kumulativa värdet på halten av utlakat ämne för varje mätperiod. Detta beräknas oberoende av tidigare fraktioner på utlakad mängd enligt:

$$\varepsilon_n = E^*_i \cdot \frac{\sqrt{t_i}}{\sqrt{t_i} - \sqrt{t_{i-1}}} \quad \text{för } n = 1 \text{ till } N$$

där

$\varepsilon_n$  är den beräknade aritmetiskt kumulativa utlakningen för perioden n, bestående av fraktion i=1 till n, angivet i mg/m<sup>2</sup>

$E^*_i$  är den uppmätta utlakningen i fraktion i, angivet i mg/m<sup>2</sup>

$t_i$  är försökstiden vid slutet av fraktion i

$t_{i-1}$  är försökstiden vid start av fraktion i

Den aritmetiskt kumulativa utlakningen beräknas för varje enskilt utlakat ämne. Därtill beräknas för varje ämne dess kumulativa utlakning, vilket är det samma som totalt ackumulerat utlakat upp till slutet av varje tidsperiod. Dessa plottas sedan mot varandra i diagram.

För att kontrollera huruvida utlakningen styrs av diffusion eller av någon annan mekanism görs regressionsanalys på olika delar av kurvan. Genom att utföra linjär regression av de logaritmerade värdena av  $\varepsilon_n$  och  $t_i$  bestäms riktningskoefficienten men också

standard-avvikelsen på respektive riktningskoefficient. Diffusion karakteriseras av att utlakningen, eller masstransporten, är proportionell mot roten ur tiden. En utlakning som helt styrs av diffusion får då, i en logaritmisk kurva över utlakningen mot tiden, riktningskoefficienten 0,5.

Enligt NEN 7345 föreligger vissa kriterier för att utlakningen skall kunna klassas som diffusionsstyrd. Kortfattat så ska värdena på kurvans riktningskoefficienter och motsvarande standardavvikelser ligga inom vissa värden. För riktningskoefficienten gäller  $0,35 < m < 0,60$  och att standardavvikelsen på koefficienten är lägre än 0,2.

### E.3 Räkneexempel – Diffusionsstyrd utlakning av barium för prov från Tekniska Verken TV40 (40 % aska, 60 % slam)

Nedan följer ett exempel på hur diffusionsstyrd utlakning kan beräknas för en komponent, i detta fall barium, med hjälp av metoden beskriven i NEN 7345.

#### Steg 1

Till att börja med ska den uppmätta utlakningen för varje fraktion beräknas utifrån volymen av lakvätskan, mantelarean av provkroppen samt koncentrationen av det ämne som man är intresserad av, i detta fall barium. Se formel 1.

Formel 1

$$E^*_i = \frac{c_i \cdot V}{f \cdot A}$$

där

$E^*_i$  är den uppmätta utlakningen i fraktion i, angivet i  $\text{mg/m}^2$

$c_i$  är koncentrationen i fraktion i, angivet i  $\mu\text{g/l}$

$V$  är volymen av lakvätskan, angivet i l

$A$  är mantelarean av provkroppen, angivet i  $\text{m}^2$

$f$  är en dimensionslös faktor: 1000  $\mu\text{g/mg}$

#### Steg 2

| tid<br>dygn | Ba<br>$\text{mg/m}^2$ |
|-------------|-----------------------|
| 0,25        | 0,259                 |
| 1           | 0,793                 |
| 2           | 0,87                  |
| 4           | 0,922                 |
| 8           | 1,22                  |
| 16          | 1,58                  |
| 32          | 1,88                  |

Tabellen ovan visar förutom tiden även den uppmätta utlakningen för varje fraktion, dvs.  $E^*_i$  som redovisas i den något abstrakta enheten  $\text{mg/m}^2$ . Här har alltså en viss mängd lakats ut efter en viss tid ur en provkropp med arean 0,0029  $\text{m}^2$ .

Den uppmätta kumulativa utlakningen ( $\epsilon^*_n$ ) för perioden beräknas genom att summera de för varje fraktion uppmätta värdena på utlakningen ( $E^*_i$ ). Se formel 2.

För Ba:

| tid<br>dygn | $E^*_i$<br>$\text{mg/m}^2$ | $\epsilon^*_n$<br>$\text{mg/m}^2$ | $\epsilon^*_n$<br>$\mu\text{g/m}^2$ |
|-------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 0,25        | 0,259                      | 0,259                             | 259                                 |
| 1           | 0,793                      | 1,052                             | 1052                                |
| 2           | 0,87                       | 1,922                             | 1922                                |
| 4           | 0,922                      | 2,844                             | 2844                                |
| 8           | 1,22                       | 4,064                             | 4064                                |
| 16          | 1,58                       | 5,644                             | 5644                                |
| 32          | 1,88                       | 7,524                             | 7524                                |

Formel 2

$$\epsilon^*_n = \sum_{i=1}^n E^*_i \quad \text{för } n = 1 \text{ till } N$$

där

$\epsilon^*_n$  är den uppmätta kumulativa utlakningen för perioden n, bestående av fraktion i=1 till n, angivet i  $\text{mg/m}^2$

$E^*_i$  är den uppmätta utlakningen i fraktion i, angivet i  $\text{mg/m}^2$

N är antalet perioder som är lika med antalet påfyllningstillfällen

### Steg 3

Efter detta räknas den aritmetiskt kumulativa utlakningen ut ( $\epsilon_n$ ) enligt formel 3. Vi får då:

| $E^*_i$<br>mg/m <sup>2</sup> | $t_i$<br>sek | $t_{i-1}$<br>sek | $\epsilon^*_n$<br>µg/m <sup>2</sup> | $\epsilon_n$<br>µg/m <sup>2</sup> |
|------------------------------|--------------|------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 0,259                        | 21600        | 0                | 259                                 | 259                               |
| 0,793                        | 86400        | 21600            | 1052                                | 1586                              |
| 0,87                         | 172800       | 86400            | 1922                                | 2970                              |
| 0,922                        | 345600       | 172800           | 2844                                | 3148                              |
| 1,22                         | 691200       | 345600           | 4064                                | 4165                              |
| 1,58                         | 1382400      | 691200           | 5644                                | 5394                              |
| 1,88                         | 2764800      | 1382400          | 7524                                | 6419                              |

Formel 3

$$\epsilon_n = E^*_i \cdot \frac{\sqrt{t_i}}{\sqrt{t_i} - \sqrt{t_{i-1}}} \quad \text{för } n = 1 \text{ till } N$$

där

$\epsilon_n$  är den aritmetiskt kumulativa utlakningen för perioden n, bestående av fraktion i=1 till n, angivet i mg/m<sup>2</sup>

$E^*_i$  är den uppmätta utlakningen i fraktion i, angivet i mg/m<sup>2</sup>

$t_i$  är försökstiden vid slutet av fraktion i

$t_{i-1}$  är försökstiden vid start av fraktion i

För att få ett hum om huruvida utlakningen är diffusionsstyrd eller ej plottas  $\epsilon^*_n$  och  $\epsilon_n$  mot varandra i diagram. Ett sådant för Barium TV40 kan ses i figur E-1 nedan. Att linjerna följs åt är en indikation på att diffusionsstyrd utlakning råder. I figur E-2 visas ett exempel (Cu för TV40) där utlakningen inte är diffusionsstyrd

### Steg 4

För att närmare bestämma huruvida utlakningen av barium är diffusionsstyrd eller ej ska linjär regression på sambandet mellan  $\log \epsilon_n$  och  $\log t_i$  göras. Detta kan till exempel utföras i excel. Resultatet för fraktionerna i = 2 till 7 blir följande:

| i  | 2 till 7 |
|----|----------|
| m  | 0,37     |
| sf | 0,05     |

Barium TV40

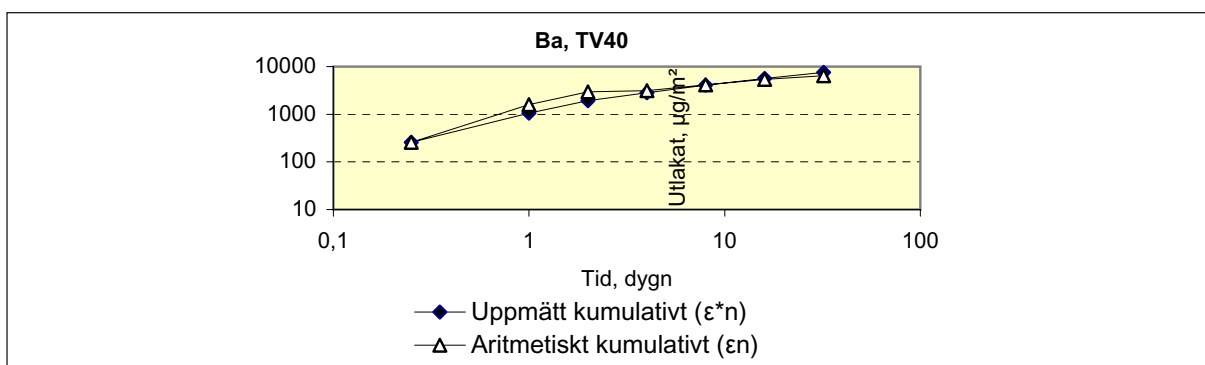
| i  | 2 till 7 |
|----|----------|
| m  | -1,38    |
| sf | 0,25     |

Koppar TV40

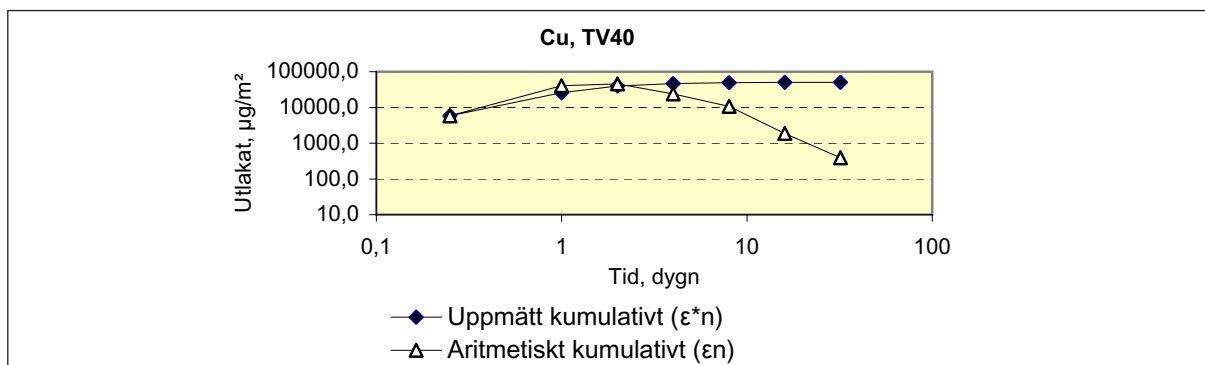
Där

m är riktningskoefficienten

sf är standardfelvärdet



Figur E-1. Uppmätt kumulativ och aritmetisk kumulativ utlakning för barium, TV40.



Figur E-2. Uppmätt kumulativ och aritmetisk kumulativ utlakning för koppar, TV40.

För att utlakningen av ett ämne ska räknas som diffusionsstyrd ska följande kriterier uppfyllas:

|    |                |
|----|----------------|
| i  | 2 till 7       |
| m  | >0,35 men <0,6 |
| sf | <0,2           |

Vi kan därför dra slutsatsen är utlakningen av barium i materialsammansättningen TV40 förmodligen är diffusionsstyrd för punktintervallet 2 till 7.

## Steg 5

Vi kan nu gå vidare och räkna ut den effektiva diffusionskoefficienten,  $D_{e,i}$ . Detta enligt formel 4.

| tid<br>dygn | $U_{bes}$<br>mg/kg TS | $\rho$<br>kg/m <sup>3</sup> | $E^*_i$<br>mg/m <sup>2</sup> |
|-------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 0,25        | 681                   | 1240                        | 0,259                        |
| 1           |                       |                             | 0,793                        |
| 2           |                       |                             | 0,87                         |
| 4           |                       |                             | 0,922                        |
| 8           |                       |                             | 1,22                         |
| 16          |                       |                             | 1,58                         |
| 32          |                       |                             | 1,88                         |

| $t_i$<br>sek | $t_{i-1}$<br>sek | $D_{e,i}$<br>m <sup>2</sup> /s |
|--------------|------------------|--------------------------------|
| 21600        | 0                | 3,42E-18                       |
| 86400        | 21600            | 3,21E-17                       |
| 172800       | 86400            | 5,62E-17                       |
| 345600       | 172800           | 3,16E-17                       |
| 691200       | 345600           | 2,76E-17                       |
| 1382400      | 691200           | 2,32E-17                       |
| 2764800      | 1382400          | 1,64E-17                       |

Formel 4

$$D_{e,i} = \frac{\pi(E^*_i)^2}{4 \cdot (U_{bes} \cdot \rho)^2 \cdot (\sqrt{t_i} - \sqrt{t_{i-1}})^2}$$

där

$D_{e,i}$  är den effektiva diffusionskoefficienten beräknad för fraktion i, angivet i m<sup>2</sup>/s

$E^*_i$  är den uppmätta utlakningen i fraktion i, angivet i mg/m<sup>2</sup>

$U_{bes}$  är den totala lakningsbara mängden, angivet i mg per kg TS

$\rho$  är volymmassan av provkroppen angivet i kg TS per m<sup>3</sup>

$t_i$  är försökstiden vid slutet av fraktion i

$t_{i-1}$  är försökstiden vid start av fraktion i

## Steg 6

Den effektiva diffusionskoefficienten för varje enskild fraktion,  $D_{e,i}$ , ska nu användas för att ge ett värde på den effektiva diffusionskoefficienten för hela intervallet,  $D_e$ . Detta görs genom att beräkna det geometriska medelvärdet av den negativa logaritmen för  $D_{e,i}$  i intervallet man är intresserad av. Se formel 5 och 6.

| $D_{e,i}$<br>m <sup>2</sup> /s | $pD_{e,i}$<br>sekbaser | $pD_e$ | $D_e$<br>m <sup>2</sup> /s |
|--------------------------------|------------------------|--------|----------------------------|
| 3,4E-18                        | 17,5                   | 16,7   | 2,1E-17                    |
| 3,2E-17                        | 16,5                   |        |                            |
| 5,6E-17                        | 16,2                   |        |                            |
| 3,2E-17                        | 16,5                   |        |                            |
| 2,8E-17                        | 16,6                   |        |                            |
| 2,3E-17                        | 16,6                   |        |                            |
| 1,6E-17                        | 16,8                   |        |                            |

Formel 5

$$pD_{e,i} = -\log D_{e,i}$$

$$pD_e = \frac{\sum_{i=1}^n pD_{e,i}}{n}$$

där

$pD_e$  är medeltalet av den negativa logaritmen av den effektiva diffusionskoefficienten

$n$  är antalet punkter med data i intervallet

Därefter beräknas  $D_e$  enligt formel 6.

Formel 6

$$D_e = 10^{-pD_e}$$

där

$D_e$  är medeltalet av den effektiva diffusionskoefficienten, i m<sup>2</sup>/s

$pD_e$  är medeltalet av den negativa logaritmen av den effektiva diffusionskoefficienten

## Steg 7

Nu kan den kumulativa utlakningen per ytenhet beräknas även på ett större intervall än vad det finns uppmätta data för. Detta genom att formel 7 används. I exemplet nedan har denna möjlighet dock inte utnyttjats utan beräkningarna är gjorda utifrån ett intervall på 32 dagar.

| Tid<br>dygn | Pi   | U <sub>bes</sub><br>mg/kg TS | Rå<br>kg/m <sub>3</sub> |
|-------------|------|------------------------------|-------------------------|
| 0,25        | 3,14 | 681                          | 1240                    |
| 1           |      |                              |                         |
| 2           |      |                              |                         |
| 4           |      |                              |                         |
| 8           |      |                              |                         |
| 16          |      |                              |                         |
| 32          |      |                              |                         |

| T <sub>i</sub><br>sek | D <sub>e</sub><br>m <sup>2</sup> /s | E <sub>x,y</sub><br>mg/m <sup>2</sup> |
|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 21600                 | 2,1E-17                             | 0,37                                  |
| 86400                 |                                     | 0,73                                  |
| 172800                |                                     | 1,03                                  |
| 345600                |                                     | 1,46                                  |
| 691200                |                                     | 2,07                                  |
| 1382400               |                                     | 2,92                                  |
| 2764800               |                                     | 4,13                                  |

Formel 7

$$E_{x,y} = 2 \cdot \rho \cdot U_{bes} \cdot (\sqrt{t_x} - \sqrt{t_y}) \cdot \frac{\sqrt{D_e}}{\pi}$$

där

E<sub>x,y</sub> är utlakningen mellan tiderna t<sub>y</sub> och t<sub>x</sub>, i mg/m<sup>2</sup>

U<sub>bes</sub> är den totala lakningsbara mängden, angivet i mg per kg TS

D<sub>e</sub> är den effektiva diffusionskoefficienten, i m<sup>2</sup>/s

t<sub>x</sub> är sluttiden av det undersökta intervallet i relation till tiden vid försökets början, angivet i s

t<sub>y</sub> är starttiden av det undersökta intervallet i relation till tiden vid försökets början, angivet i s

ρ är densiteten av provkroppen angivet i kg TS per m<sup>3</sup>

Den beräknade kumulativa utlakningen av barium efter 32 dagar är alltså 4,13 mg/m<sup>2</sup>. Denna kan jämföras med den uppmätta kumulativa utlakningen som beräknades i steg två (ε\*n = 7,52 mg/m<sup>2</sup>).

## E.4 Genomförande

Ytutlakningsförsök har genomförts på aska-slamblandningar från Tekniska Verken och SRV Återvinning (se tabell E-1 nedan).

Tabell E-1. Materialblandningar analyserade med ytutlakningstest.

| Beteckning | Beskrivning                                        | Antal provuttag under försöken |
|------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| TV40       | Tekniska Verken<br>40 % aska 60 %<br>(färskt) slam | 7 (till 32 dygn)               |
| TV50       | Tekniska Verken<br>50 % aska 50 %<br>(färskt) slam | 7 (till 32 dygn)               |
| TV60       | Tekniska Verken<br>60 % aska 40 %<br>(färskt) slam | 7 (till 32 dygn)               |
| TV40 fr    | Tekniska Verken<br>40 % aska 60 %<br>(frysst) slam | 7 (till 32 dygn)               |
| TV50fr     | Tekniska Verken<br>50 % aska 50 %<br>(frysst) slam | 7 (till 32 dygn)               |
| TV60fr     | Tekniska Verken<br>40 % aska 60 %<br>(frysst) slam | 7 (till 32 dygn)               |
| SRV40      | SRV Återvinning                                    | 5 (till 8 dygn)                |
| SRV50      | SRV Återvinning                                    | 5 (till 8 dygn)                |
| SRV60      | SRV Återvinning                                    | 5 (till 8 dygn)                |

De ämnen som analyserades var Ca, Fe, K, Mg, Na, S, Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Sb, Se, V, Zn. Utvärdering har gjorts för alla ämnen enligt den ovan beskrivna metodiken.

## E.5 Resultat och diskussion

Resultaten visar att en stor del av ämnena, för flertalet undersökta prov, inte uppvisar en utlakning som

kan klassificeras som diffusionsstyrd. För dessa ämnen är det andra faktorer än tiden som styr utlakningen, och resultaten av ytutlakningsförsöken kan därför inte användas för att prognostisera utlakningen på längre sikt. I tabell E-2 nedan presenteras ämnen och materialsammansättningar där diffusionsstyrd utlakning verkligen har konstaterats. Utlakningen per ytenhet ( $E_{x,y}$ ) är beräknad med hjälp av Formel 7 enligt ovan ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ). De tidsperioder som valts är diffusionsstyrd utlakning under 1 år respektive 10 år.

Översiktliga vattenbalansberäkningar har utförts baserade på nederbördsbörsmätningar vid närbelägna mätstationer, generella värden för avdunstning, samt uppskattningar av andelen vatten som avrinner som ytavrinning (avrinningskoefficient). Med en avrinningskoefficient satt till 0,18 enligt Larm (2000) tillförs tätskiktets överyta vid Tekniska Verken  $76 \text{ m}^3$  vatten per år. Med en total area av  $5500 \text{ m}^2$  innebär detta att varje  $\text{m}^2$  tillförs 14 l vatten per år. Motsvarande beräkningar för SRV ger en tillförsel av  $50 \text{ l}/\text{m}^2$  och år. En uppskattning av halterna i det vatten som rinner längs tätskiktets överyta kan därmed göras. För ämnen med diffusionsstyrd utlakning ges halterna av utlakning per ytenhet genom mängd bildat avrinningsvatten. Mängden avrinningsvatten är be-

räknat genom beräkningar av vattenbalansen för de respektive områdena (se tabell E-2 nedan).

De framräknade medelhalterna i det avrinnande vattnet har jämförts med Naturvårdsverkets (1999) bedömningsgrunder för förorenade områden (indelning av tillståndsklasser), samt med analyserade data från avrinningsytor vid SRV och Tekniska Verken. Avrinningsytorna är på Tekniska Verken belägna i kontakt med en aska/slamblandning som består av 50 % aska och 50 % slam. Vid SRV består avrinningsytorna av 40 % flygaska, 45 % bottenaska och 15 % slam. I jämförelsen har använts maximalt uppmätta halter för respektive fältlokal (jan–sept 2005).

Av tabell E-3 framgår att den beräknade utlakningen under första året kan ge upphov till halter motsvarande klassen "allvarligt tillstånd" (Naturvårdsverket 1999) för nickel, arsenik och bly. Under första året kan kadmiumhalterna betecknas som måttligt allvarliga. I avrinningsvattnet motsvarar de högst uppmätta halterna "allvarligt tillstånd" endast för arsenik. Efter 10 år beräknas fortfarande nickelhalterna vara i nivå med "allvarligt tillstånd", och blyhalterna "måttligt allvarligt tillstånd" medan övriga ämnen bedöms motsvara "mindre allvarligt tillstånd".

Tabell E-2. Ämnen med diffusionsstyrd utlakning i aska-slamblandningar från olika objekt. Utlakningen är beräknad enligt formel 7 ovan och avser första årets samt tionde årets utlakning. Medelhalterna är beräknade utifrån vattenbalansberäkningar och ger  $14 \text{ l}/\text{m}^2$  för TV och  $50 \text{ l}/\text{m}^2$  för SRV

| Ämne     | Prov-<br>bland-<br>ning | Total lak-<br>ningsbar<br>mängd<br>( $\text{mg}/\text{kg TS}$ ) | Ex (Formel 7 i<br>text)<br>Utlakningen<br>avser första året<br>( $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{år}$ ) | Ex (Formel 7 i<br>text) Utlakningen<br>avser de 10 första<br>åren<br>( $\text{mg}/\text{m}^2, 10 \text{ år}$ ) | Beräknade<br>medelhalter i<br>det avrinnande<br>vattnet år 1<br>( $\text{mg}/\text{l}$ ) | Beräknade<br>medelhalter i<br>det avrinnande<br>vattnet år 10<br>( $\text{mg}/\text{l}$ ) |
|----------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Arsenik  | TV40fr                  | 24,2                                                            | 3,3                                                                                                       | 10,5                                                                                                           | 0,24                                                                                     | 0,039                                                                                     |
|          | SRV40                   | 475                                                             | 8,2                                                                                                       | 25,9                                                                                                           | 0,16                                                                                     | 0,027                                                                                     |
|          | SRV50                   | 610                                                             | 10,7                                                                                                      | 33,9                                                                                                           | 0,21                                                                                     | 0,035                                                                                     |
|          | SRV60                   | 425                                                             | 12,3                                                                                                      | 38,9                                                                                                           | 0,25                                                                                     | 0,040                                                                                     |
| Barium   | TV40                    | 681                                                             | 14                                                                                                        | 44,2                                                                                                           | 1,0                                                                                      | 0,16                                                                                      |
| Kadmium  | TV60                    | 7,16                                                            | 0,08                                                                                                      | 0,26                                                                                                           | 0,0057                                                                                   | 0,0009                                                                                    |
|          | TV60fr                  | 7,16                                                            | 0,05                                                                                                      | 0,17                                                                                                           | 0,0036                                                                                   | 0,0006                                                                                    |
|          | SRV50                   | 8,1                                                             | 0,05                                                                                                      | 0,17                                                                                                           | 0,0010                                                                                   | 0,0002                                                                                    |
| Molybden | TV40                    | 11,3                                                            | 26,8                                                                                                      | 84,9                                                                                                           | 1,91                                                                                     | 0,311                                                                                     |
| Nickel   | TV40                    | 61,1                                                            | 16,3                                                                                                      | 51,6                                                                                                           | 1,16                                                                                     | 0,189                                                                                     |
| Bly      | TV60                    | 434                                                             | 1,5                                                                                                       | 4,8                                                                                                            | 0,107                                                                                    | 0,017                                                                                     |
|          | SRV40                   | 523                                                             | 0,30                                                                                                      | 0,96                                                                                                           | 0,006                                                                                    | 0,0010                                                                                    |
| Sulfat   | TV50fr                  | 41800                                                           | 59800                                                                                                     | 189100                                                                                                         | 4270                                                                                     | 693                                                                                       |
| Zink     | TV50                    | 13900                                                           | 1280                                                                                                      | 4050                                                                                                           | 91                                                                                       | 14,8                                                                                      |

Tabell E-3. Jämförelser mellan beräknade medelhalter från diffusionsstyrd utlakning, uppmätta halter från avrinningsytor vid SRV och TV, samt indelning i tillståndsklasser enligt Naturvårdsverket (1999).

| Ämne     | Prov-<br>bland-<br>ning | Beräknade<br>medelhalter<br>i avrinnande<br>vatten år 1<br>(µg/l) | Beräknade<br>medelhalter i<br>avrinnande<br>vatten år 10<br>(µg/l) | Uppmätta halter<br>från avrinnings-<br>ytor (µg/l) (max-<br>imum, jan-sep-<br>05) | Gräns mellan<br>mindre och<br>måttligt all-<br>varligt*<br>(NV 1999) | Gräns mellan<br>måttligt all-<br>varligt och all-<br>varligt tillstånd<br>(NV 1999) |
|----------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Arsenik  | TV40fr                  | 240                                                               | 39                                                                 | 46                                                                                | 50                                                                   | 150                                                                                 |
|          | SRV40                   | 160                                                               | 27                                                                 | 270                                                                               | 50                                                                   | 150                                                                                 |
|          | SRV50                   | 210                                                               | 35                                                                 | 270                                                                               | 50                                                                   | 150                                                                                 |
|          | SRV60                   | 250                                                               | 40                                                                 | 270                                                                               | 50                                                                   | 150                                                                                 |
| Barium   | TV40                    | 1000                                                              | 160                                                                | 319                                                                               | –                                                                    | –                                                                                   |
| Kadmium  | TV60                    | 5,7                                                               | 0,9                                                                | 0,06                                                                              | 5                                                                    | 15                                                                                  |
|          | TV60fr                  | 0,36                                                              | 0,6                                                                | 0,06                                                                              | 5                                                                    | 15                                                                                  |
|          | SRV50                   | 1,0                                                               | 0,2                                                                | 5,1                                                                               | 5                                                                    | 15                                                                                  |
| Molybden | TV40                    | 1910                                                              | 311                                                                | –                                                                                 | –                                                                    | –                                                                                   |
| Nickel   | TV40                    | 1160                                                              | 189                                                                | 85                                                                                | 50                                                                   | 150                                                                                 |
| Bly      | TV60                    | 107                                                               | 17                                                                 | 7,8                                                                               | 10                                                                   | 30                                                                                  |
|          | SRV40                   | 6,1                                                               | 1,0                                                                | 13                                                                                | 10                                                                   | 30                                                                                  |
| Sulfat   | TV50fr                  | 4 270<br>000                                                      | 693000                                                             | 2933**                                                                            | –                                                                    | –                                                                                   |
| Zink     | TV50                    | 91000                                                             | 14800                                                              | 703                                                                               | –                                                                    | –                                                                                   |

\* sammanfaller med hälsobaserat gränsvärde för dricksvatten (otjänligt) utom för arsenik som har en gräns på 10 µg/l (SLVFS 2001:30).

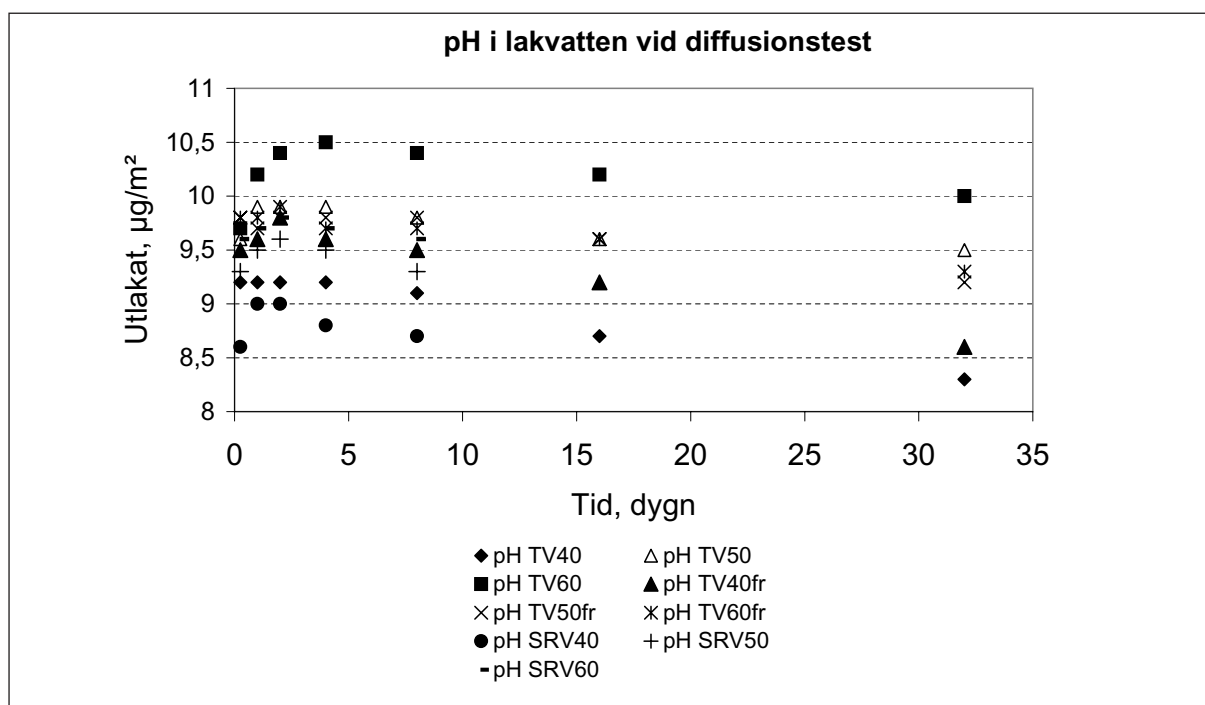
\*\* omräknat från svavelhalter.

Överensstämmelsen mellan den beräknade medelhalten i det avrinnande vattnet och de uppmätta halterna från avrinningsytorna är acceptabel. Halt-erna är av samma storleksordning för arsenik, bari-um, och sulfat, men skiljer sig åt för zink och nickel. Trots att de beräknade halterna för zink och nickel verkar mycket höga finns det ändå stöd för att halt-erna kan uppgå till denna storleksordning genom de analyser som finns i det vatten som långsamt per-kolerat genom tätskiktet (se bilaga G). Halt-erna av zink i lysimeter 4 placerad under tätskiktet var 48 800 µg/l och halten av nickel 5720 µg/l.

Förutsättningarna för att kunna utvärdera utlak-ningen enligt metodiken ovan, är att utlakningen beskriver ett visst tidsförlopp samt att den mängd som är tillgänglig för utlakning är känd. För andra ämnen eller kombinationer av materialblandningar och ämnen visar resultaten oftast en avstannande utlakning som kan ses för t.ex. koppar i figur E-2 ovan. Något enstaka ämne visar en ökad utlakning med tiden, t.ex. visade en del materialblandningar en ökande tendens av utlakning av totalkväve under försökstiden. Dessa data går emellertid inte att ut-värdera eftersom förrådet av N-tot inte analyserades

( $U_{bes}$  i formlerna ovan). För de flesta ämnen bör emellertid halterna antingen avta i takt med diffus-ionen (roten ur tiden) eller så sker avtagandet i snabbare takt. Flera andra faktorer kan också påverka utlakningen, t.ex. så är det höga pH-värdet för TV 60 en mycket sannolik orsak till att urlakningen av bly för denna materialblandning är hög, se figur E-3 (nedan). Med en viss nedbrytning eller annan till-försel av koldioxid bör pH minska vilket i sin tur för-ändrar betingelserna för utlakningen, och bör med-föra en ytterligare lägre blyhalt i det avrinnande vattnet.

Sammantaget visar resultaten, att halterna av nickel, arsenik och bly inledningsvis kan ge upphov till halter motsvarande "allvarligt tillstånd" enligt Naturvårdverkets (1999) bedömningsgrunder för för-orenade områden. För arsenik motsvaras halterna (både de uppmätta halterna i avrinningsvattnet och halten i den beräknade ytutlakningen under första årets utlakning) av klassen "allvarligt tillstånd". Under det tionde årets utlakning motsvaras halterna av nickel "allvarligt tillstånd" medan övriga ämnen inklusive bly bedöms motsvara "mindre allvarligt tillstånd". Det bör observeras att Naturvårdsverkets



Figur E-3. Uppmätt pH i laklösningar från ytutlakningsförsöken.

indelning i tillståndsklasser avser grundvatten, medan de här uppmätta halterna avser det vatten som avrinner på tätskiktets överyta (släntfot). Det innebär att halterna i det avrinnande vattnet kan förväntas minska, t ex genom fastläggning innan det når recipient. Efter sluttäckningens färdigställande kan halterna vara höga under en begränsad tid. Om detta medför oacceptabel miljöpåverkan bör det avrinnande vattnet under denna tid tas omhand utifrån lokala förutsättningar och i enlighet med förordningen om deponering av avfall.

För de diffusionsstyrda ämnena kommer halterna i det avrinnande vattnet att avta med tiden. För övriga ämnen, möjligen med undantag av kväve, bedöms halterna avta i högre takt än avtagandet för de diffusionsstyrda ämnena.

Halterna i det avrinnande vattnet är helt beroende på mängden avrinnande vatten, vilket innebär att halterna i det avrinnande vattnet kommer att variera beroende på nederbördsintensitet, totalnederbörd samt tätskiktets hydrauliska konduktivitet.

## Referenser

Larm, T. 2000. Utformning och dimensionering av dagvattenreninganläggningar, VA-Forsk rapport 2000-10, Stockholm.

NEN 7345, 1994. Leaching characteristics of soil and stony building materials – Leaching tests – Determination of inorganic components from building and monolithic waste materials with diffusion tests.

Naturvårdsverket 1999. Metodik för inventering av förorenade områden. Bedömningsgrunder för miljö-kvalitet. Rapport 4918. Naturvårdsverket förlag

# Bilaga F: Undersökning av åldrat material, Tekniska Verken, september 2005

*Datum: 2005-10-19*

*Utförd av: Märta Ländell & Maria Carling, Geo  
Innova AB*

I september 2005, dvs. då materialet legat ungefär ett år, togs prov med hjälp av skruvborr och som kolvprover på Tekniska Verkens provyta. Dessa prover undersöktes dels okulärt och dels på laboratorium. I fält kontrollerades färg, lukt och konsistens. Tätt-skiktets tjocklek i provtagningspunkterna noterades också. På laboratorium undersöktes pH, vattenkvot, glödningsförlust, samt på ett par prov även skjuvhållfasthet och permeabilitet. Resultaten har sedan jämförts med resultat erhållna vid undersökningar i samband med utläggning av provytan eller vid de inledande laboratieförsöken.

## F.1 Upptagna prover

Provtagning utfördes i fyra punkter på ytan, BH1-4. Punkterna BH1 och BH3 finns på den del av ytan där dränskiktet utgörs av bergkross, medan BH2 och BH4 är tagna där dränskikt saknas. I BH1 och

BH2 togs kolvprover ut, medan provtagning i BH3 och BH4 utfördes som skruvprovtagning. Noggrannare position för provpunkterna fås i ritning i Bilaga F-1. Beskrivning av uttagna prover återfinns i tabell F-1.

## F.2 Okulär kontroll

Vid okulär kontroll kunde konstateras att slam/askablandningen var mörkt brun, nästan svart och luktade svagt av ammoniak. Materialet var "degigt" till konsistensen och gick att krama ihop till en klump. Jämfört med materialet vid utläggning kunde inga skillnader konstateras vid okulär kontroll.

Vid utläggning lades slam/aska-blandning till en tjocklek av minst 0,5 m. Vid provtagning i punkterna BH1 och BH3 (dränmaterial bergkross) uppmättes slam/aska-skiktet till drygt 0,3 respektive 0,45 m. I punkterna där inget dränskikt finns (BH2 och BH4) var slam/aska-skiktets tjocklek ca 0,4 respektive 0,55 m. I BH2 hade slam/aska blandningen inslag av grus. Att skiktet på någon plats var betydligt tunnare än 0,5 m kan bero både på att det

*Tabell F-1. Beskrivning av prover tagna med kolvprovtagare och skruvborr på Tekniska Verkens provyta i september 2005. TS – torrsubstanshalt, GF – glödningsförlust.*

| Provbeteckning | Provtagningsdjup<br>(m u m y) | Material                                                             | Utförda undersökningar  |
|----------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| BH1:1          | 1,75–1,9                      | Slamblandning                                                        | pH, TS, GF, CRS         |
| BH1:2          | 1,9–2,0                       | Slamblandning                                                        | pH, TS, GF, tryckförsök |
| BH1:3          | 2,0–2,05                      | Avjämningsmaterial                                                   |                         |
| BH2:1          | 1,5–1,6                       | Halva provet: slam-blandning,<br>resten: fyllning (tegel, grus m.m.) | pH, TS, GF              |
| BH2:2          | 1,6–1,75                      | Slamblandning med grusinslag                                         | pH, TS, GF, tryckförsök |
| BH2:3          | 1,75–1,9                      | Slamblandning med grusinslag                                         | CRS                     |
| BH2:4          | 1,9–2,0                       | Avjämningsmaterial                                                   |                         |
| BH3:1          | 1,4–1,7                       | Slamblandning/bergkross                                              | pH, TS, GF              |
| BH3:2          | 1,7–2,0                       | Slamblandning                                                        | pH, TS, GF              |
| BH4:1          | 1,5–1,55                      | Slamblandning                                                        | pH, TS, GF              |
| BH4:2          | 1,55–1,9                      | Slamblandning                                                        | pH, TS, GF              |
| BH4:3          | 1,9–2,05                      | Slamblandning                                                        | pH, TS, GF              |

har packats då det legat på ytan och på att det på någon plats blivit tunnare än avsett vid utläggning.

Resultaten för prov BH3:1 avviker markant från övriga. Detta prov innehöll inslag av bergkross, vilket påverkar resultaten.

### F.3 pH, vattenkvot, torrsubstanshalt och glödningsförlust

Vattenkvot för proverna har analyserats och räknats om till TS-halt, se tabell F-2. TS-halten för proverna av slam/aska-blandning varierar mellan 47 och 77 %. I tabell F-2 redovisas även uppmätt pH och glödningsförlust.

#### Diskussion

Jämfört med resultat för prover tagna i samband med utläggning av provytan, är torrsubstanshalten nu något högre. För glödningsförlust gjordes endast två mätningar vid utläggning och någon markant skillnad kan inte noteras.

Jämfört med material från provblandning på laboratorium är pH markant lägre i det material som legat på provytan under ett år.

### F.4 Hydraulisk konduktivitet och skjuvhållfasthet

Bestämning av hydraulisk konduktivitet gjordes genom CRS-försök. Försöken utfördes vid SGI. Mätningarna gjordes på material i hylsorna från kolvprovtagningen. Den odränerade skjuvhållfastheten har undersökts genom enaxliga tryckförsök på två prover. Försöken utfördes på SGI.

#### Resultat

Resultaten redovisas i tabell F-3 och F-4. Resultaten diskuteras i rapporten.

Tabell F-2. pH, torrsubstanshalt (TS) och glödningsförlust (GF) för uttagna prover av slam/aska-blandning.

| Provbeteckning                                            | Provtagningsdjup (m u my) | pH   | w (%)   | TS (%) | GF, 550 °C (% av TS) |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------|------|---------|--------|----------------------|
| BH1:1                                                     | 1,75–1,9                  | 8,0  | 95*     | 51*    | 33                   |
| BH1:2                                                     | 1,9–2,0                   | 8,3  | 115     | 47     | 39                   |
| BH2:1                                                     | 1,5–1,6                   | 8,6  | 91      | 52     | 36                   |
| BH2:2                                                     | 1,6–1,75                  | 8,5  | 108     | 48     | 39                   |
| BH3:1                                                     | 1,4–1,7                   | 8,4  | 30      | 77     | 13                   |
| BH3:2                                                     | 1,7–2,0                   | 8,5  | 76      | 57     | 34                   |
| BH4:1                                                     | 1,5–1,55                  | 8,5  | 95      | 51     | 36                   |
| BH4:2                                                     | 1,55–1,9                  | 8,5  | 102     | 50     | 39                   |
| BH4:3                                                     | 1,9–2,05                  | 8,5  | 61      | 62     | 32                   |
| Resultat från mätningar i samband med utläggning, höst-04 |                           | 9,2  | 100–157 | 39–50  | 38 och 40            |
| TV50 (laboratorieförsök), höst-03                         |                           | 11,3 | 119–152 | 40–46  | 38–39                |

\* stor spridning.

Tabell F-3. Hydraulisk konduktivitet uppmätt i CRS-försök.

| Provbeteckning                         | Torrdensitet,<br>före försök<br>(t/m <sup>3</sup> ) | Vattenkvot,<br>före försök<br>(%) | Hydraulisk<br>konduktivitet<br>(m/s) |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Höst-05</i>                         |                                                     |                                   |                                      |
| BH1:1                                  | 0,56                                                | 123                               | $2 \cdot 10^{-9}$                    |
| BH2:3                                  | 0,59                                                | 113                               | $2 \cdot 10^{-9}$                    |
| <i>Höst-04</i>                         |                                                     |                                   |                                      |
| Prov taget i samband med<br>utläggning | 0,58                                                | 130                               | $4 \cdot 10^{-10}$                   |

Tabell F-4. Skjuvhållfasthet uppmätt genom enaxliga tryckförsök.

| Provbeteckning                      | Skjuvhållfasthet (kPa)    |
|-------------------------------------|---------------------------|
| <i>Höst-05</i>                      |                           |
| BH1:2                               | 36                        |
| BH2:2                               | 27                        |
| <i>Höst-04</i>                      |                           |
| Prov taget i samband med utläggning | 21 (dag 1)<br>32 (dag 30) |

# Bilaga G: Metallhalter i lysimetrar och avrinningsytor

Datum: 2005-11-20

Utförd av: Maria Carling, Geo Innova AB

Lys3: lysimeter över tätskiktet, på delyta utan dränlager

Ly4: lysimeter under tätskiktet, på delyta utan dränlager

## G.1 Provtagning Tekniska verken

Lys1: lysimeter över tätskiktet, på delyta med dränlager av bergkross

Lys2: lysimeter under tätskiktet, på delyta med dränlager av bergkross

Avr1: avrinningsyta på delyta med dränlager av bergkross, släntlutning 1:20

Avr2: avrinningsyta på delyta utan dränlager, släntlutning 1:20

Avr3: avrinningsyta på delyta med dränlager av slaggrus, släntlutning 1:3

Avr4: avrinningsyta på delyta med dränlager av bergkross, släntlutning 1:3

### Lysimetrar, januari 2005

| Ämne | enhet | 2005-01-28<br>lys1 | 2005-01-28<br>lys2 | 2005-01-28<br>lys3 | 2005-01-28<br>lys4 |
|------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Ca   | mg/l  | 1800               | 30                 | 2160               | 1940               |
| Fe   | mg/l  | 2,46               | 0,0693             | 0,0499             | 0,174              |
| K    | mg/l  | 1220               | 1250               | 1050               | 1220               |
| Mg   | mg/l  | 21,2               | 16,8               | 46                 | 23,5               |
| Na   | mg/l  | 1760               | 1910               | 1780               | 1840               |
| S    | mg/l  | 495                | 661                | 508                | 816                |
| Al   | µg/l  | 58,3               | 90,8               | 59,5               | 141                |
| As   | µg/l  | 80,2               | 69,4               | 39,2               | 107                |
| Ba   | µg/l  | 224                | 41,1               | 258                | 410                |
| Cd   | µg/l  | 0,553              | <0,1               | <0,1               | 12,2               |
| Co   | µg/l  | 44,8               | 42                 | 14,7               | 109                |
| Cr   | µg/l  | 1,65               | 8,82               | <1                 | 5,76               |
| Cu   | µg/l  | 220                | 290                | 130                | 5180               |
| Hg   | µg/l  | 0,441              | 0,0536             | <0,02              | 0,0899             |
| Mn   | µg/l  | 790                | 2,29               | 111                | 486                |
| Ni   | µg/l  | 216                | 566                | 184                | 5720               |
| P    | µg/l  | 1160               | 3530               | 850                | 4120               |
| Pb   | µg/l  | 30,4               | 4,1                | 4,94               | 2,63               |
| Sb   | µg/l  | 49                 | 18,8               | 7,73               | 27,1               |
| Zn   | µg/l  | 842                | 263                | 2080               | 48800              |

**Lysimetrar, maj 2005**

| Ämne | enhet | 2005-05-16<br>lys2 | 2005-05-16<br>lys3 | 2005-05-16<br>lys4 |
|------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Ca   | mg/l  | 220                | 1600               | 2000               |
| Fe   | mg/l  | 0,1                | 0,07               | 0,19               |
| K    | mg/l  |                    |                    |                    |
| Mg   | mg/l  | 58                 | 64                 | 51                 |
| Na   | mg/l  | 2800               | 1600               | 2300               |
| S    | mg/l  | 990                | 390                | 770                |
| Al   | µg/l  | 94                 | 23                 | 84                 |
| As   | µg/l  | 86                 | 44                 | 140                |
| Ba   | µg/l  | 200                | 250                | 350                |
| Cd   | µg/l  | <0,4               | <0,4               | 3                  |
| Co   | µg/l  | 36                 | 23                 | 99                 |
| Cr   | µg/l  | 22                 | <4                 | 16                 |
| Cu   | µg/l  | 59                 | 15                 | 6300               |
| Hg   | µg/l  | 0,59               | <0,01              | 0,04               |
| Mn   | µg/l  | 330                | 170                | 190                |
| Ni   | µg/l  | 600                | 140                | 5700               |
| P    | µg/l  |                    |                    |                    |
| Pb   | µg/l  | 3,1                | 1,9                | <1                 |
| Sb   | µg/l  | <20                | <20                | 23                 |
| Zn   | µg/l  | 180                | 210                | 6600               |

**Avrinningsyta, januari 2005**

| Ämne | enhet | 2005-01-28<br>avr1 | 2005-01-28<br>avr2 | 2005-01-28<br>avr3 | 2005-01-28<br>avr4 |
|------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Ca   | mg/l  | 1150               | 1390               | 1420               | 115                |
| Fe   | mg/l  | 0,22               | 0,0748             | 0,776              | 0,189              |
| K    | mg/l  | 734                | 624                | 1490               | 221                |
| Mg   | mg/l  | 143                | 174                | 201                | 61,8               |
| Na   | mg/l  | 1340               | 1440               | 3150               | 326                |
| S    | mg/l  | 465                | 979                | 153                | 57,2               |
| Al   | µg/l  | 15,7               | 13,9               | 26,1               | 15,5               |
| As   | µg/l  | 20,6               | 14,3               | <20                | 46                 |
| Ba   | µg/l  | 211                | 281                | 319                | 198                |
| Cd   | µg/l  | 0,0531             | 0,0651             | <0,1               | <0,05              |
| Co   | µg/l  | 12,3               | 5,23               | 15,2               | 14,7               |
| Cr   | µg/l  | 1,15               | 1,81               | 1,42               | 0,868              |
| Cu   | µg/l  | 52                 | 33,4               | 55,8               | 16,1               |
| Hg   | µg/l  | 0,0217             | <0,02              | 0,0971             | <0,02              |
| Mn   | µg/l  | 1460               | 2700               | 1800               | 18,1               |
| Ni   | µg/l  | 63,2               | 48,7               | 85,8               | 38,6               |
| P    | µg/l  | 3530               | 983                | 1460               | 1020               |
| Pb   | µg/l  | 7,82               | 5,19               | 3,79               | 3,21               |
| Sb   | µg/l  | 5,09               | 3,23               | 4,34               | 4,23               |
| Zn   | µg/l  | 703                | 48,1               | 82,1               | 301                |

**Avrinningsyta, maj 2005**

| Ämne | enhet | 2005-05-16<br>Avr1 | 2005-05-16<br>Avr2 | 2005-05-16<br>Avr4 |
|------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Ca   | mg/l  | 1300               | 180                | 430                |
| Fe   | mg/l  | 0,028              | 0,6                | 0,075              |
| K    | mg/l  |                    |                    |                    |
| Mg   | mg/l  | 110                | 270                | 57                 |
| Na   | mg/l  | 1200               | 1600               | 200                |
| S    | mg/l  | 880                | 540                | 130                |
| Al   | µg/l  | 830                | 870                | <20                |
| As   | µg/l  | 28                 | 14                 | <4                 |
| Ba   | µg/l  | 120                | 200                | 300                |
| Cd   | µg/l  | <0,4               | <0,4               | <0,4               |
| Co   | µg/l  | 18                 | 13                 | 4,7                |
| Cr   | µg/l  | <4                 | <4                 | <4                 |
| Cu   | µg/l  | 34                 | 12                 | <4                 |
| Hg   | µg/l  | <0,01              | <0,01              | <0,01              |
| Mn   | µg/l  | 1700               | 3500               | 2500               |
| Ni   | µg/l  | 59                 | 42                 | 8                  |
| P    | µg/l  |                    |                    |                    |
| Pb   | µg/l  | <1                 | <1                 | <1                 |
| Sb   | µg/l  | <20                | <20                | <20                |
| Zn   | µg/l  | 200                | <20                | <20                |

## G.2 SRV Återvinning

UL 1:3: lysimeter under tätskiktet, släntlutning 1:3

UL 1:20: lysimeter under tätskiktet, släntlutning 1:20

ÖL 1:3: lysimeter över tätskiktet, släntlutning 1:3

ÖL 1:20: lysimeter över tätskiktet, släntlutning 1:20

Avr 1:3: avrinningsyta, släntlutning 1:3

Avr 1:20: avrinningsyta, släntlutning 1:20

### Lysimetrar, juni 2005

| Ämne | enhet | 2005-06-29<br>UL 1:3 | 2005-06-29<br>UL 1:20 | 2005-06-29<br>ÖL 1:3 | 2005-06-29<br>ÖL 1:20 |
|------|-------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Ca   | mg/l  | Inget vatten         | 340                   | 2100                 | 1800                  |
| Fe   | mg/l  |                      | <0,05                 | 1,4                  | 2,2                   |
| K    | mg/l  |                      | 500                   | 3300                 | 1800                  |
| Mg   | mg/l  |                      | 31                    | 94                   | 89                    |
| Na   | mg/l  |                      | 660                   | 2000                 | 1200                  |
| S    | mg/l  |                      | 360                   | 1000                 | 660                   |
| Al   | µg/l  |                      | 200                   | 140                  | 85                    |
| As   | µg/l  |                      | 43                    | 130                  | 45                    |
| Ba   | µg/l  |                      | 420                   | 160                  | 230                   |
| Be   | µg/l  |                      | <1                    | <1                   | <1                    |
| B    | µg/l  |                      | 760                   | 3700                 | 1200                  |
| Cd   | µg/l  |                      | 2,2                   | 0,86                 | 0,36                  |
| Co   | µg/l  |                      | 56                    | 32                   | 22                    |
| Cr   | µg/l  |                      | 9,3                   | 15                   | 9,5                   |
| Cu   | µg/l  |                      | 4100                  | 120                  | 220                   |
| Li   | µg/l  |                      | 15                    | 110                  | 41                    |
| Hg   | µg/l  |                      | 0,12                  | 0,43                 | <0,1                  |
| Mn   | µg/l  |                      | 140                   | 670                  | 590                   |
| Mo   | µg/l  |                      | 360                   | 300                  | 160                   |
| Ni   | µg/l  |                      | 85                    | 110                  | 93                    |
| Se   | µg/l  |                      | 56                    | 140                  | 96                    |
| Ag   | µg/l  |                      | 4                     | 0,8                  | 1                     |
| Sr   | µg/l  |                      | 1700                  | 5500                 | 4700                  |
| Tl   | µg/l  |                      | 3                     | <1                   | <1                    |
| U    | µg/l  |                      | 19                    | 7,4                  | 51                    |
| V    | µg/l  |                      | 39                    | 100                  | 10                    |
| P    | µg/l  |                      | 3700                  | *                    | 7000                  |
| Pb   | µg/l  |                      | 0,7                   | 86                   | 12                    |
| Sb   | µg/l  |                      | 75                    | 23                   | 13                    |
| Sn   | µg/l  |                      | 1,0                   | 3,9                  | 2,6                   |
| Ti   | µg/l  |                      | 130                   | 400                  | 350                   |
| Zn   | µg/l  |                      | 74                    | 360                  | 75                    |

\* - ej analyserat.

**Lysimetrar, september 2005**

| Ämne | enhet | 2005-09-28<br>UL 1:3 | 2005-09-28<br>UL 1:20 | 2005-09-28<br>ÖL 1:3 | 2005-09-28<br>ÖL 1:20 |
|------|-------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Ca   | mg/l  | Inget vatten         | 2200                  | 290                  | 760                   |
| Fe   | mg/l  |                      | 0,18                  | 0,18                 | 0,10                  |
| K    | mg/l  |                      | 2000                  | 700                  | 730                   |
| Mg   | mg/l  |                      | 170                   | 25                   | 64                    |
| Na   | mg/l  |                      | 2300                  | 440                  | 540                   |
| S    | mg/l  |                      | 950                   | 280                  | *                     |
| Al   | µg/l  |                      | 630                   | 210                  | 81                    |
| As   | µg/l  |                      | 230                   | 88                   | 63                    |
| Ba   | µg/l  |                      | 770                   | 100                  | 250                   |
| Be   | µg/l  |                      | <1                    | <1                   | <1                    |
| B    | µg/l  |                      | 1100                  | 580                  | 770                   |
| Cd   | µg/l  |                      | 39                    | 1,7                  | 5,1                   |
| Co   | µg/l  |                      | 210                   | 7,9                  | 16                    |
| Cr   | µg/l  |                      | 7,5                   | 1,9                  | 3,8                   |
| Cu   | µg/l  |                      | 5900                  | 89                   | 360                   |
| Li   | µg/l  |                      | 61                    | 45                   | 66                    |
| Hg   | µg/l  |                      | *                     | *                    | *                     |
| Mn   | µg/l  |                      | 3100                  | 200                  | 700                   |
| Mo   | µg/l  |                      | 610                   | 100                  | 110                   |
| Ni   | µg/l  |                      | 320                   | 37                   | 93                    |
| Se   | µg/l  |                      | 160                   | 53                   | 75                    |
| Ag   | µg/l  |                      | 11                    | 0,3                  | 0,1                   |
| Sr   | µg/l  |                      | 6600                  | 770                  | 2200                  |
| Tl   | µg/l  |                      | 17                    | <1                   | <1                    |
| U    | µg/l  |                      | 36                    | 34                   | 73                    |
| V    | µg/l  |                      | 61                    | 11                   | 15                    |
| P    | µg/l  |                      | 3500                  | 2500                 | 950                   |
| Pb   | µg/l  |                      | 22                    | 23                   | 5,1                   |
| Sb   | µg/l  |                      | 86                    | 15                   | 12                    |
| Sn   | µg/l  |                      | 2,2                   | 5,3                  | 6,8                   |
| Ti   | µg/l  |                      | 260                   | 440                  | 88                    |
| Zn   | µg/l  |                      | 2100                  | 370                  | 720                   |

\* - ej analyserat.

**Avrinningsytor, juni 2005**

| Ämne | enhet | 2005-06-29<br>Avr 1:3 | 2005-06-29<br>Avr 1:20 |
|------|-------|-----------------------|------------------------|
| Ca   | mg/l  | 1700                  | 950                    |
| Fe   | mg/l  | 0,06                  | 0,25                   |
| K    | mg/l  | 1900                  | 2300                   |
| Mg   | mg/l  | 29                    | 34                     |
| Na   | mg/l  | 1200                  | 1400                   |
| S    | mg/l  | 610                   | 520                    |
| Al   | µg/l  | 410                   | 190                    |
| As   | µg/l  | 270                   | 140                    |
| Ba   | µg/l  | 390                   | 260                    |
| Be   | µg/l  | <1                    | <1                     |
| B    | µg/l  | 1600                  | 1600                   |
| Cd   | µg/l  | 0,81                  | 0,61                   |
| Co   | µg/l  | 55                    | 15                     |
| Cr   | µg/l  | 21                    | 13                     |
| Cu   | µg/l  | 280                   | 69                     |
| Li   | µg/l  | 310                   | 230                    |
| Hg   | µg/l  | 0,22                  | <0,1                   |
| Mn   | µg/l  | 66                    | 86                     |
| Mo   | µg/l  | 71                    | 73                     |
| Ni   | µg/l  | 270                   | 120                    |
| Se   | µg/l  | 100                   | 150                    |
| Ag   | µg/l  | 1                     | 0,5                    |
| Sr   | µg/l  | 4700                  | 3800                   |
| Tl   | µg/l  | <1                    | <1                     |
| U    | µg/l  | 26                    | 3,2                    |
| V    | µg/l  | 65                    | 87                     |
| P    | µg/l  | 12000                 | 8700                   |
| Pb   | µg/l  | 5,3                   | 13                     |
| Sb   | µg/l  | 4                     | 4                      |
| Sn   | µg/l  | <1                    | 5,1                    |
| Ti   | µg/l  | 330                   | 280                    |
| Zn   | µg/l  | 100                   | 31                     |

\* - ej analyserat.

**Avrinningsyta, september 2005**

| Ämne | enhet | 2005-09-28<br>Avr 1:3 | 2005-09-28<br>Avr 1:20 |
|------|-------|-----------------------|------------------------|
| Ca   | mg/l  | 1400                  | 470                    |
| Fe   | mg/l  | 0,10                  | 0,32                   |
| K    | mg/l  | 700                   | 1400                   |
| Mg   | mg/l  | 100                   | 29                     |
| Na   | mg/l  | 490                   | 790                    |
| S    | mg/l  | 300                   | 380                    |
| Al   | µg/l  | 59                    | 75                     |
| As   | µg/l  | 87                    | 150                    |
| Ba   | µg/l  | 230                   | 230                    |
| Be   | µg/l  | <1                    | <1                     |
| B    | µg/l  | 3500                  | 1500                   |
| Cd   | µg/l  | 5,1                   | 1,6                    |
| Co   | µg/l  | 10                    | 11                     |
| Cr   | µg/l  | 1,9                   | 17                     |
| Cu   | µg/l  | 120                   | 59                     |
| Li   | µg/l  | 130                   | 85                     |
| Hg   | µg/l  | *                     | *                      |
| Mn   | µg/l  | 1200                  | 380                    |
| Mo   | µg/l  | 74                    | 71                     |
| Ni   | µg/l  | 40                    | 67                     |
| Se   | µg/l  | 67                    | 100                    |
| Ag   | µg/l  | 0,3                   | 0,2                    |
| Sr   | µg/l  | 2000                  | 1400                   |
| Tl   | µg/l  | 1                     | <1                     |
| U    | µg/l  | 28                    | 11                     |
| V    | µg/l  | 22                    | 27                     |
| P    | µg/l  | 1600                  | 5800                   |
| Pb   | µg/l  | 3,1                   | 7,5                    |
| Sb   | µg/l  | 47                    | 17                     |
| Sn   | µg/l  | 1,8                   | 1,9                    |
| Ti   | µg/l  | 59                    | 73                     |
| Zn   | µg/l  | 810                   | 150                    |

\* - ej analyserat.

# Bilaga H: Undersökning av nedbrytning i tätskikt

*Datum: 2005-10-18*

*Utförd av: Märta Ländell, Geo Innova AB, Bo Svensson, Linköpings Universitet*

För att undersöka om eventuell nedbrytning av organiskt material sker i tätskikten mäts sammansättning av olika gaser. Vid mikrobiell nedbrytning consumeras syre, medan metan och koldioxid bildas. Om syre inte finns tillgängligt förväntas nedbrytningen bli långsammare.

## H.1 Mätutrustning

De gasprober som används för provtagning utgörs av ett filter där markgas diffunderar in. Från filtret går en slang som mynnar i ett provtagningshuvud där prover tas ut via ett septa. Längden på slangen varierar med djupet proben är installerad på. Proben i avfallet har 4,3 m lång slang, proberna i tätskiktet och dränskiktet 2,3 m medan proben i skyddsskiktet har 1,3 m, lång slang, figur H-1 visar en gasprob.



Figur H-1. Gasprob för provtagning av markgas.

På Tekniska Verkens provyta utgörs avfallet och avjämningskiktet av rökgasreningsrest (RGR). I detta material har två gasprober installerats, en på delytan med dränskikt och en på delytan utan dränskikt. I tätskiktet installerades fyra gasprober, två på delytan med dränskikt och två på delytan utan dränskikt. Två gasprober har installerats i dränskiktet. I skyddsskiktet installerades fyra gasprober, två på delytan med dränskikt och två på delytan utan dränskikt.

På SRV återvinnings provyta utgörs avfallet av sopor, vilket även kan inkludera viss mängd organiskt material. Som avjämningskikt har bottenaska använts. I de olika skikten, avfall, tätskikt, dränskikt och skyddsskikt har vardera två prober installerats, en på den plana delen av ytan och en på den branta delen. På Renovas provyta görs installationerna på motsvarande sätt.

## H.2 Provtagning och analys

Gasprov har tagits från de installerade gasproberna med hjälp av spruta och kanyl. Vid varje provtagning har den "dödvolym", som finns i slangen tagits ut innan prov tagits, varefter två prover (ibland tre eller fyra) tagits i följd. Uttaget gasprov har överförts från spruta till glaströr fyllda med argon. Gassammansättningen har sedan analyserats med gaskromatografi.

Proberna vid Tekniska Verkens anläggning har provtagits vid fem tillfällen: december 2004, februari, maj, juni och september 2005. Proberna på SRV återvinnings anläggning har provtagits vid ett tillfälle i september 2005.

## H.3 Resultat

### Tekniska Verken

Uppmätta resultat för de olika skikten relativt tid, redovisas i Bilaga H.A.1. I Bilaga H.A.2 redovisas gas-koncentration relativt djup och med de olika skikten i täckningen markerade.

### Delyta med dränskikt

Vid provtagning i december (2004) uppmättes 25–30 % metan och 2–8 % koldioxid i dränskiktet. I skyddsskiktet och tätskiktet var halterna låga (<0,5) eller ej detekterbara. I avfallet uppmättes 2–3 % metan. Vid detta tillfälle analyserades inte syre.

Vid nästa provtagning (februari 2005) var koldioxidhalten hög (ca 30 %), medan metanhalten var ca 2–3 % i dränskiktet. I tät- och skyddsskiktet var halterna av dessa gaser låga (ca 0–1 %), men något högre i avfallet. Syrekonzentrationen varierade omvänt mot koldioxid och metan, dvs. när koldioxid och metan förelåg i låga halter var syrehalten ungefär som i luft (20 %), medan den var lägre då metan och koldioxid förekom i förhöjda halter.

Provtagningarna i maj och juni visade samma mönster. I avfallet låg metan- och koldioxidhalterna mellan 4 och 8 % resp. ca 0 %, medan syrehalten var lägre än i luft. I tätskiktet var metan och koldioxidhalterna låga, men ändå något högre än vid de båda tidigare mätningarna. Syrehalten var lägre än vid föregående och efterföljande provtagningar (februari och september). I dränskiktet låg metan- och koldioxidkoncentrationerna i intervallen 10–30 % resp. 2–10 %, medan syrehalten var låg. I skyddsskiktet var halterna av koldioxid och metan låga/ej detekterbara, medan syrehalten var ungefär som i luft.

Detta mönster följdes i stort sett även vid provtagningen i september, förutom att hög halt (12 %) av koldioxid uppmättes även i skyddsskiktet. Halten syre var då något lägre än tidigare.

#### **Delyta utan dränskikt**

De båda uppsättningarna av gasprober, som installerats på delytan utan dränskikt gav motsägelsefulla resultat.

Den ena uppsättningen (1 prob i skyddsskiktet och 1 prob i tätskiktet) indikerade låga halter av både koldioxid och metan i skyddsskiktet under i stort sett hela perioden. Vid sista provtagningstillfället (september 2005) var koldioxidhalten ca 2 %. Syrehalten var ca 20 % vid samtliga provtagningar. I tätskiktet var koldioxid- och metanhalterna låga vid de två första provtagningarna. Därefter var metanhalten hög (ca 15 %) samtidigt som syrehalten var låg (1–4 %).

Den andra uppsättningen prober (1 i avfallet, 1 i tätskiktet och 1 i skyddsskiktet) gav varierande resultat för de undersökta gaserna. I skyddsskiktet var metanhalten låg vid samtliga provtagningstillfällen. Koldioxidhalten var låg (<0,5%) vid första tillfället, ca 17 % vid provtagningen i februari och ca 5 % vid de tre sista provtagningarna. Syrehalten varierade omvänt mot koldioxidhalten. I tätskiktet var koldioxidhalten låg vid samtliga provtagningar. Även metanhalten var låg, undantaget mätningen i juni,

då den uppgick till ca 14 %. Syrehalten var vid detta tillfälle något lägre än i luft (16 %), men låg vid övriga tillfällen på ungefär 20 %. Även i avfallet var koldioxidhalten låg vid samtliga provtagningstillfällen. Vid första provtagningarna i december och maj uppmättes höga halter av metan (drygt 30 % resp. ca 12%). Vid övriga tillfällen uppmättes endast låga metanhalter. Syrekonzentrationen varierade i intervallet 13–19 %.

#### **SRV återvinning**

Resultaten redovisas i diagram i Bilaga H.A.3.

#### **Plan delyta**

På den plana delytan var koldioxidhalten 0,3–0,9 % i avfallet, drän- och skyddsskiktet, medan nämnvärda metanhalter endast uppmättes i tätskiktet. I drän- och skyddsskikten var metanhalten inte detekterbar. Syrehalten varierade omvänt mot halterna av metan och koldioxid, dvs. halten i avfallet, drän- och skyddsskiktet var ungefär som i luft (ca 20 %), medan syrehalten i tätskiktet var ca 6 %.

#### **Brant delyta**

För den branta delytan var halterna i de två övre skikten ungefär som för den plana ytan, dvs. låga halter av metan och koldioxid och syrehalt som ungefär motsvarar luft. I tätskiktet var syre- och metanhalterna drygt 5 % medan koldioxidhalten var låg. I avfallet var metanhalten högre (ca 9 %) och koldioxidhalten uppgick till ca 2 %. Syrehalten i tätskiktet var låg (<1 %).

## **H.4 Diskussion**

### **Tekniska Verken**

Resultaten visar förekomst och därmed en sannolik bildning av metan i avfallet. Avfallet består av rökgasreningsrest, som enligt laboratorieanalyser innehåller en andel organsikt material (glödningsförlust: 11 %; muntligen Hammar 2005). Vidare är pH för rökgasreningsresten hög (10–12) vilken antas ha en hämmande effekt på nedbrytningen. Metan har även uppmätts i tät- och skyddsskiktet. Metan i tätskiktet

kan antingen ha bildats där eller ha diffunderat från det underliggande avfallet. Även det omvända kan ha skett, dvs. att metan bildas i tätskiktet och diffunderar till avfallet. I dränsiktet är det dock inte sannolikt att metanbildning kan fortgå, metan i detta skikt antas ha diffunderat från underliggande material. Metanbildning kan troligen fortgå i den övre delen av tätskiktets profil (i kontakt med dränsiktet), där syrehalten är relativt hög och eventuellt perkolerat vatten i dränlagret kan bidra till en pH-neutralisering av materialet.

De låga halterna av koldioxid i avfallet och skyddsskiktet antas bero på att koldioxid fastläggs som karbonater i den alkaliska miljö som kännetecknar både rökgasreningsresten och slam/aska-blandningen.

En orsak till att metan, i motsats till koldioxid, aldrig förekommer i prover tagna i skyddsskiktet kan vara att metan bryts ner mikrobiellt till koldioxid och vatten.

Koldioxid har uppmätts i skyddsskiktet, för ytan utan dränsikt fr.o.m. februari, för ytan med dränsikt vid provtagningen i september.

Utifrån de resultat som erhållits från gasprover tagna vid Tekniska Verken går det inte att säkert avgöra om mikrobiell nedbrytning pågår i tätskiktet. Den koncentration av metan som uppmätts i tät- och dränsikt kan härröra från avfallet. Avfallet innehåller relativt liten mängd organiskt material och nedbrytning av detta material hade inte förväntats.

En möjlig orsak till omsättningen av organiskt material i tätskiktet på ytan med dränsikt, kan vara att dränsiktet någonstans är i kontakt med luft och därmed tillför syre till tätskiktet. Detta skulle i så fall innebära att nedbrytningen skulle bli mindre på ytan utan dränlager. På grund av de stora variationerna i resultat från de båda uppsättningarna prover på ytan utan dränsikt, är det svårt att dra några slutsatser om nedbrytningens storlek på de olika delytorna.

## **pH**

Vid tidigare utförda laboratorieförsök (Sundberg *et al.* 2002) inkuberades en blandning av slam och aska. Prov togs ut för kontroll av bl.a. pH vid ett antal tillfällen under ca 3 månader. Under denna tid varierade pH mycket lite och översteg 12 under hela perioden. Samtidigt noterades ingen eller mycket liten nedbrytning och gasbildning i materialet.

För föreliggande pilotförsök vid Tekniska Verken mättes pH på materialet i samband med provblandning vid val av blandningsutrustning och senare vid

en kolvprovtagning ca 1 år efter utläggning. För det färskt blandade materialet vid provblandningen var pH 9,2 (endast ett prov), medan det efter ca 1 år varierade mellan 8,0 och 8,6 (nio prov).

Det lägre pH-värdet vid pilotförsöket jämfört med tidigare laboratorieförsök kan ge en gynnsammare miljö för mikrobiell nedbrytning. Huvuddelen av de mikroorganismer som från början finns i slammet tillväxer troligen bäst vid neutralt pH. Kraftig förhöjning av pH-värdet leder till att den mikrobiella aktiviteten begränsas. De mikroorganismer som tillväxer vid ett högre pH kommer då att få utrymme att utvecklas och kan så småningom orsaka en betydande nedbrytning. Detta tar tid och kunde inte noteras under den tid laboratorieförsöken pågick. Vid pilotförsöken var det initiala pH-värdet betydligt lägre, vilket gör att den mikrobiella aktiviteten kan komma i gång snabbare. Den pH-sänkning som observerats under tiden materialet legat på ytan antas vara en effekt av nedbrytningen. Även neutralisering genom infiltrerande vatten kan ha påverkat pH.

## **SRV Återvinning**

Resultaten från den branta delen av ytan indikerar att nedbrytning pågår i avfallet. Detta är sannolikt, eftersom avfallet består av sopor överlagrade av ett avjämningskikt av bottenaska. Utifrån resultaten från denna delyta kan ingen slutsats dras beträffande nedbrytning i tätskiktet, eftersom gassammansättningen i detta lager kan bero på diffusion från avfallet.

Resultaten från den plana ytan visar förekomst av nedbrytningsprodukter i tätskiktet, men inte i det underliggande materialet. Detta kan tyda på att viss nedbrytning av sker i tätskiktet.

## **H.5 Slutsatser**

Med utgångspunkt från erhållna resultat för mätningar av gassammansättning i de olika lagren på ytan och av pH för färsk och åldrad blandning, kan konstateras att det sannolikt pågår en omsättning av det organiska materialet i tätskiktet på provytorna.

I relation till tidigare laboratorieförsök (Sundberg *et al.* 2002) var utgångs-pH i materialet lägre. Detta

är ett skäl till att nedbrytning sker i materialet i fält, men inte kunde ses i laboratorium.

För att få en beständighet som är tillräcklig för tätskikt för deponier, är blandningen av slam och askor kritisk.

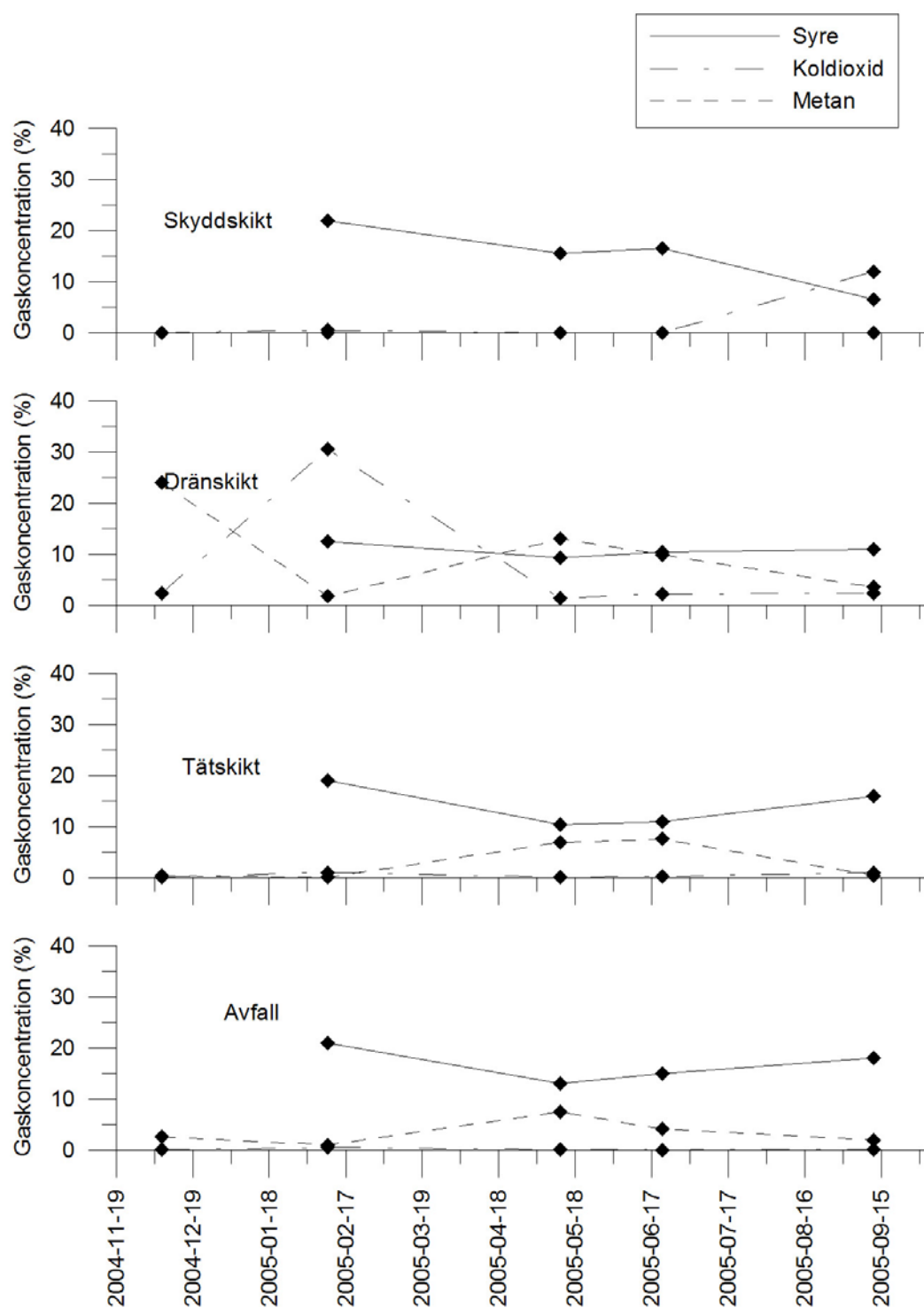
## Referenser

Hammar, M., Tekniska Verken i Linköping, muntlig uppgift.

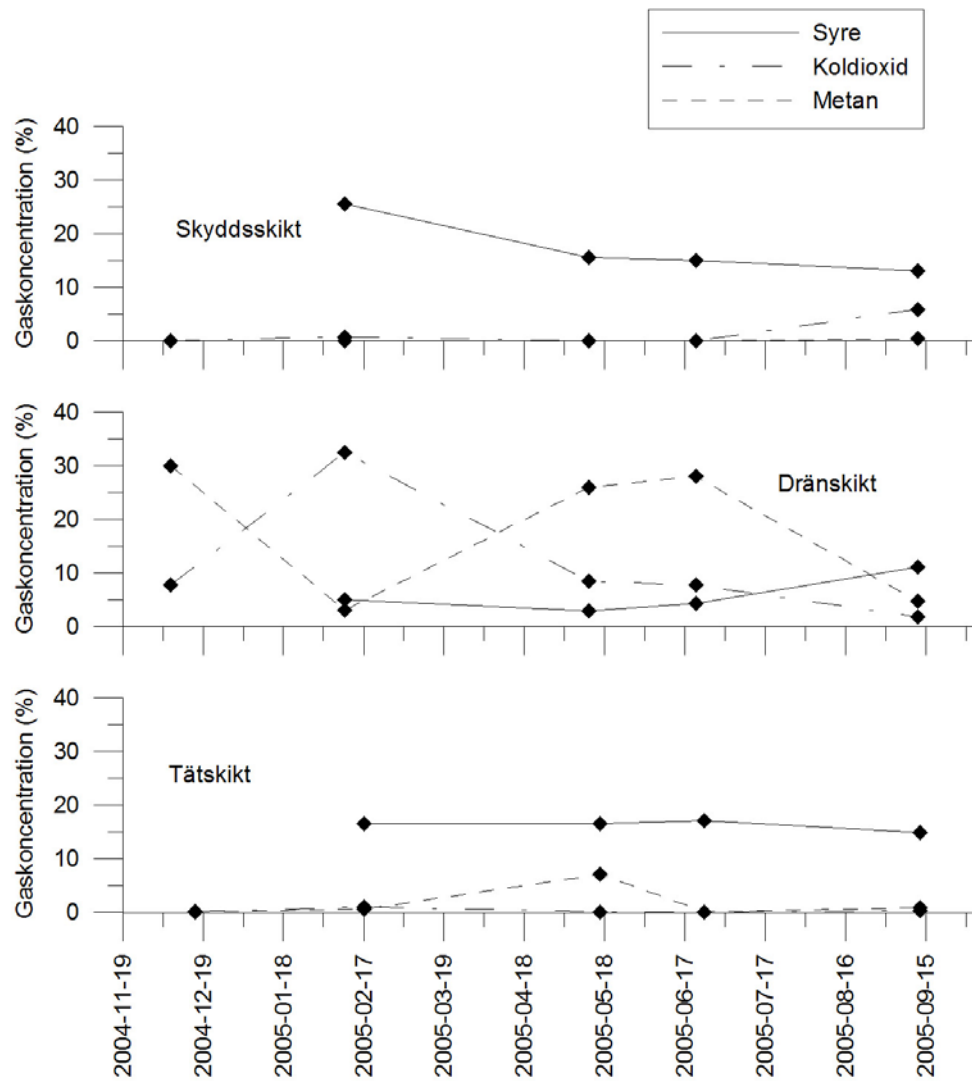
Sundberg, J., Carling, M., Ländell, M., Svensson, B., 2002: Täckning av deponier med blandning av avloppsslam och aska. Erfarenheter, beständighet och andra egenskaper. RVF Utveckling 02:18 (även VA-Forsk 2003-21).

## Bilaga H.A.1: Gaskoncentration mot tid, Tekniska Verken

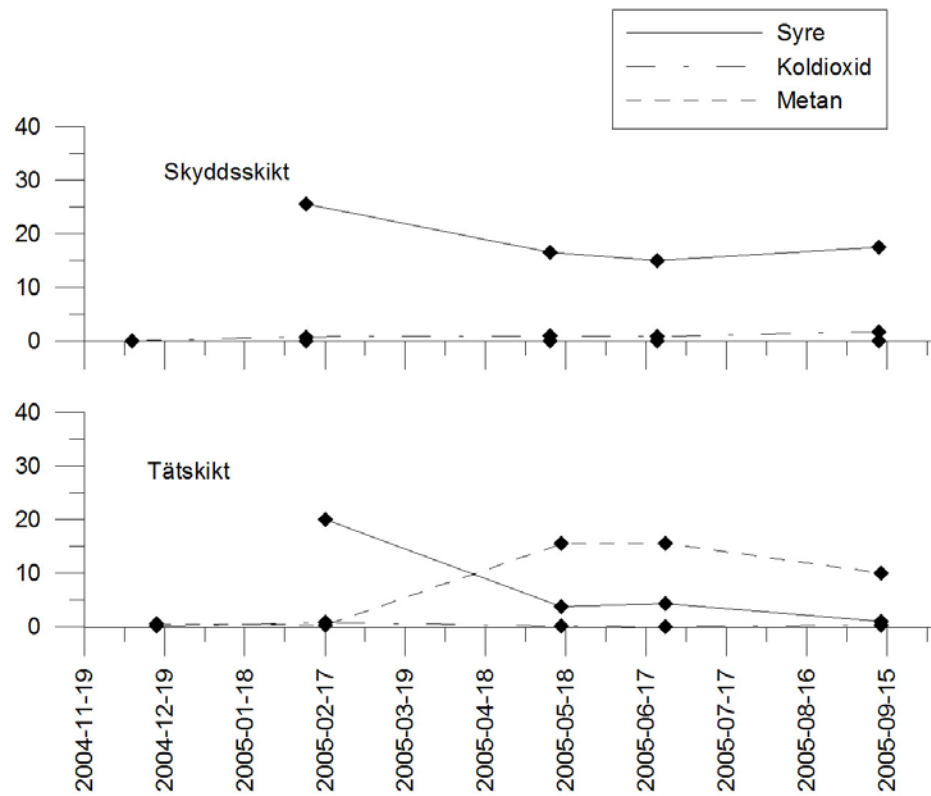
### Provtagningspunkt 1



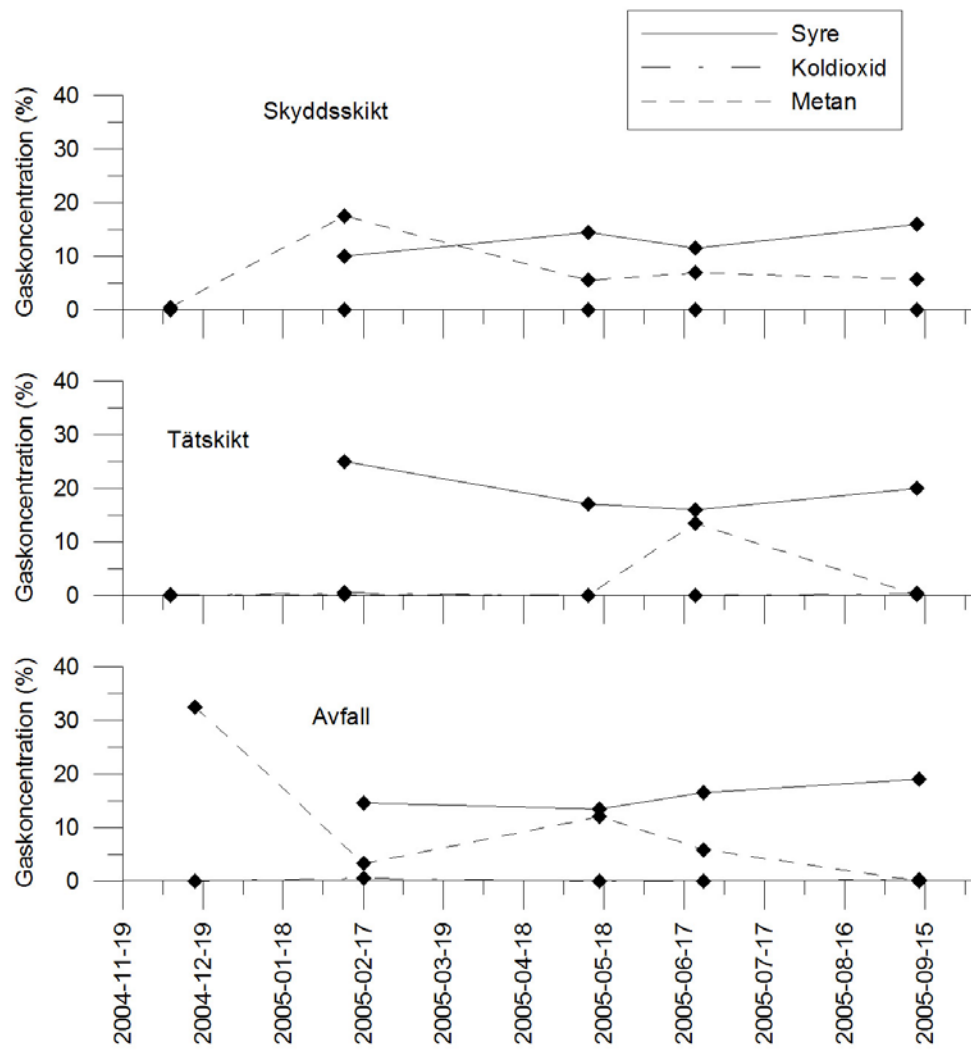
## Provtagningspunkt 2



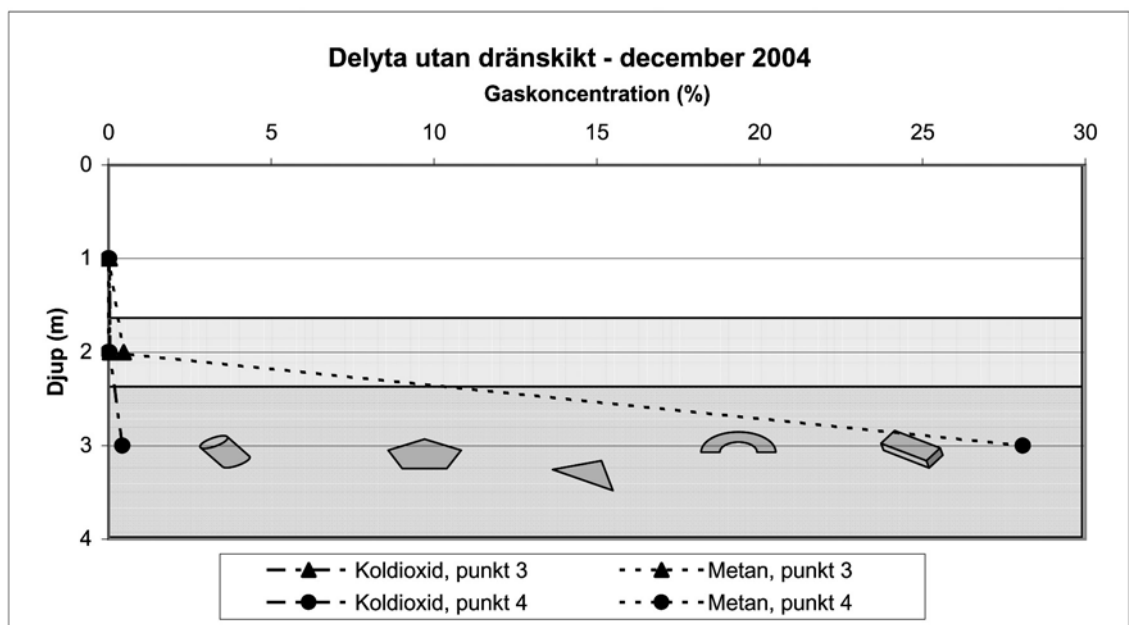
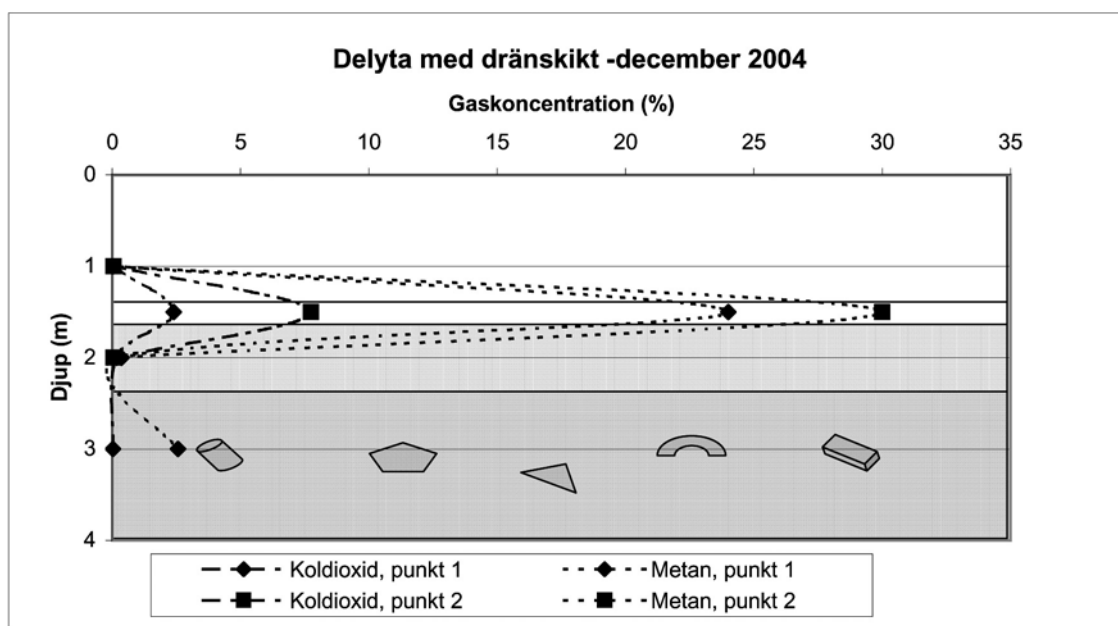
### Provtagningspunkt 3

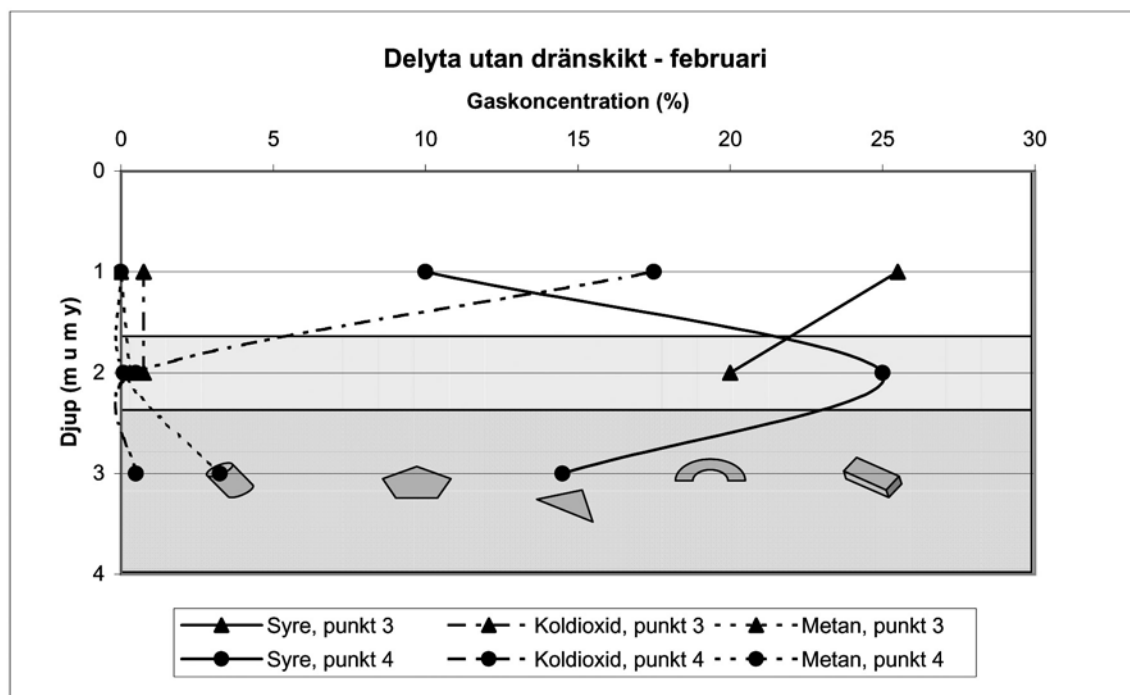
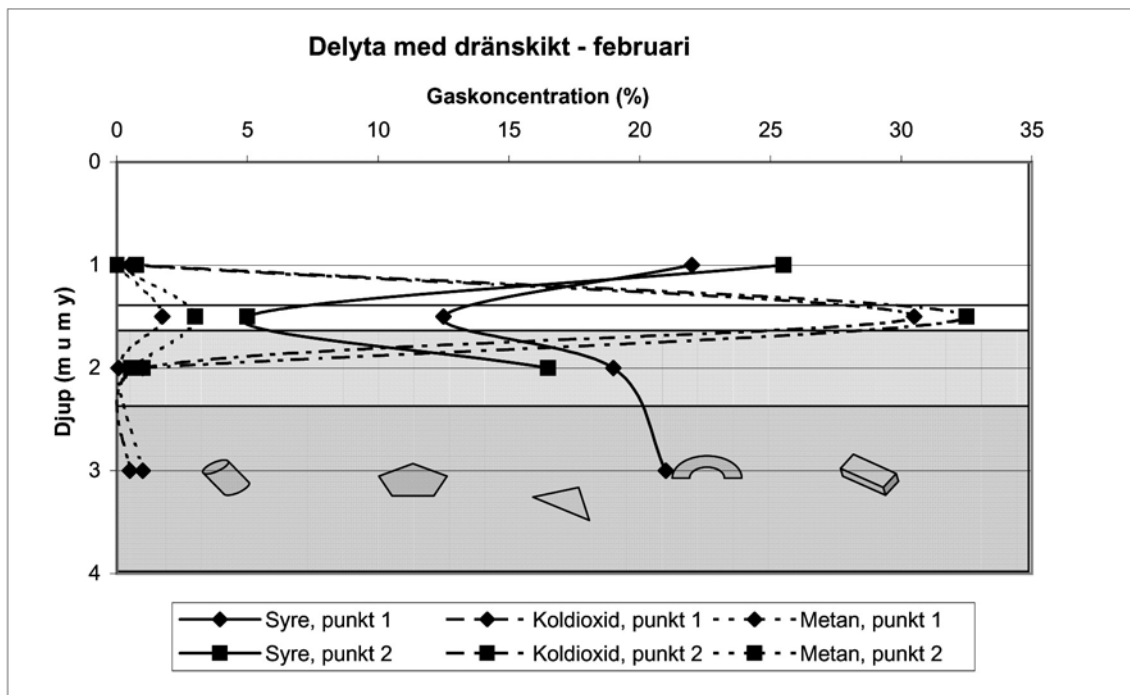


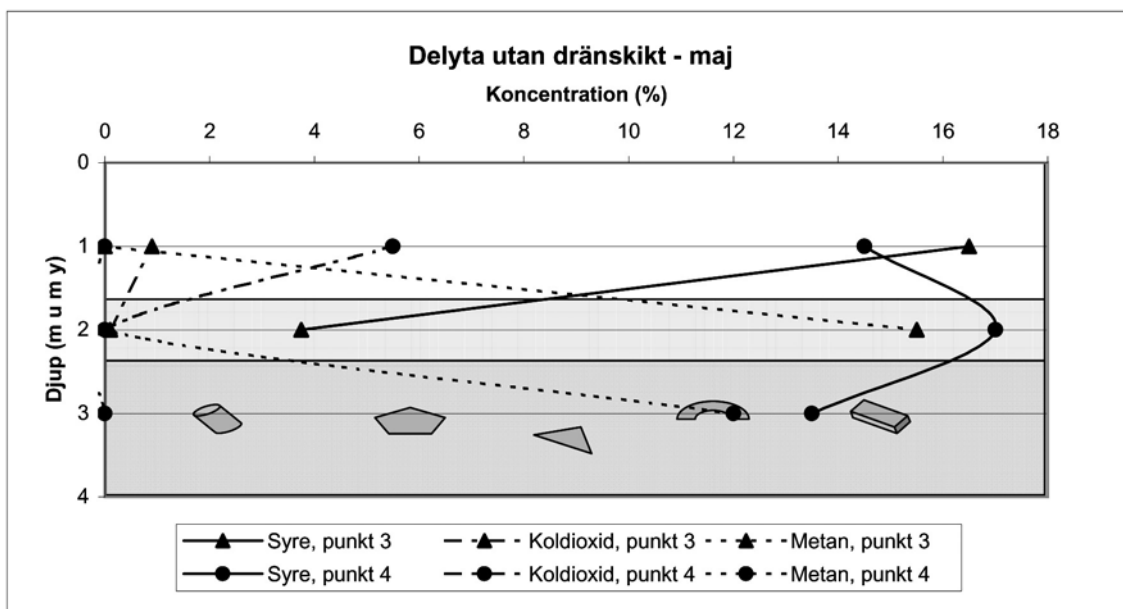
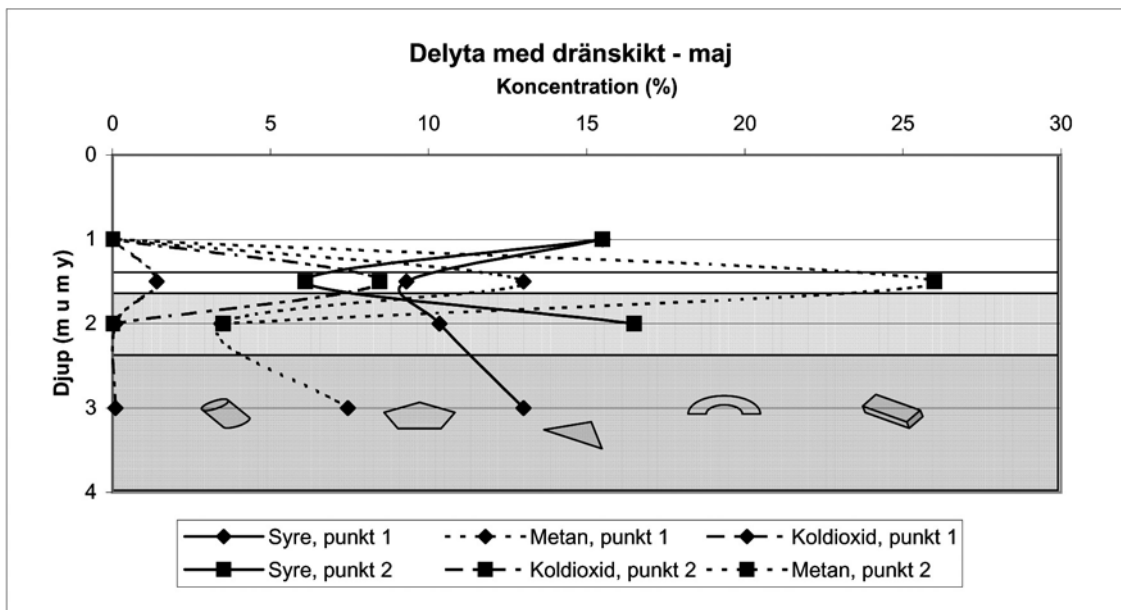
## Provtagningspunkt 4

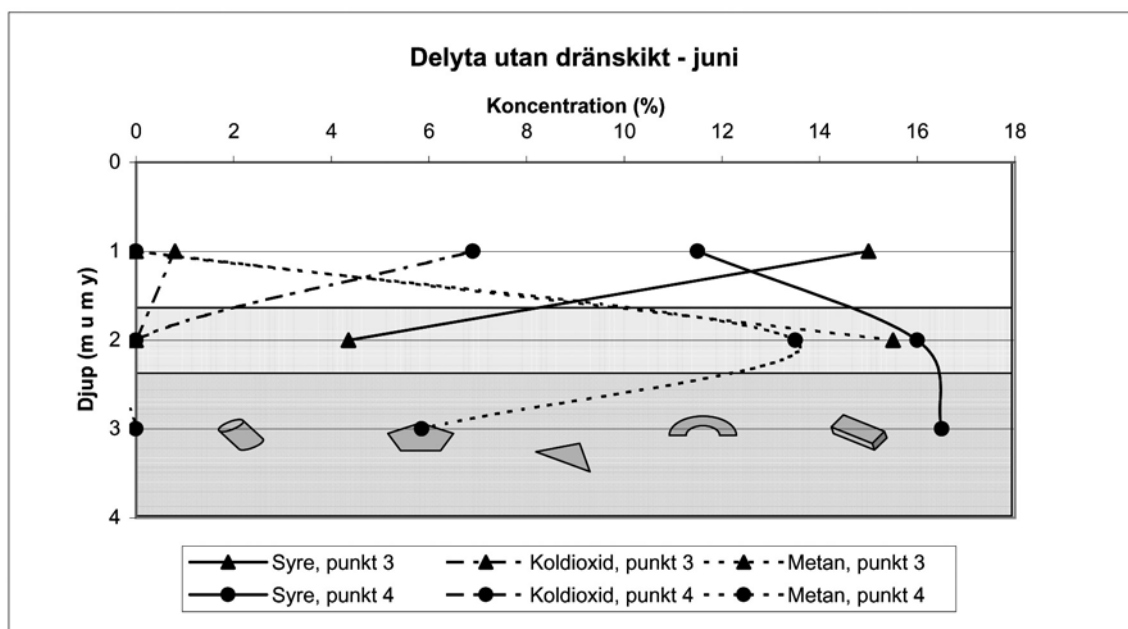
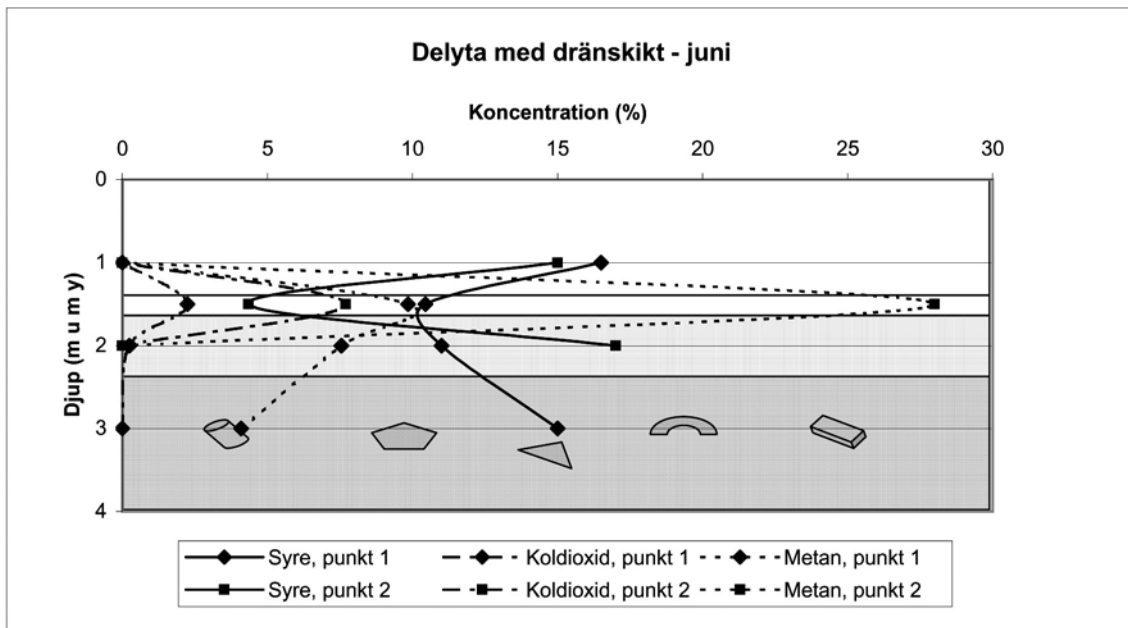


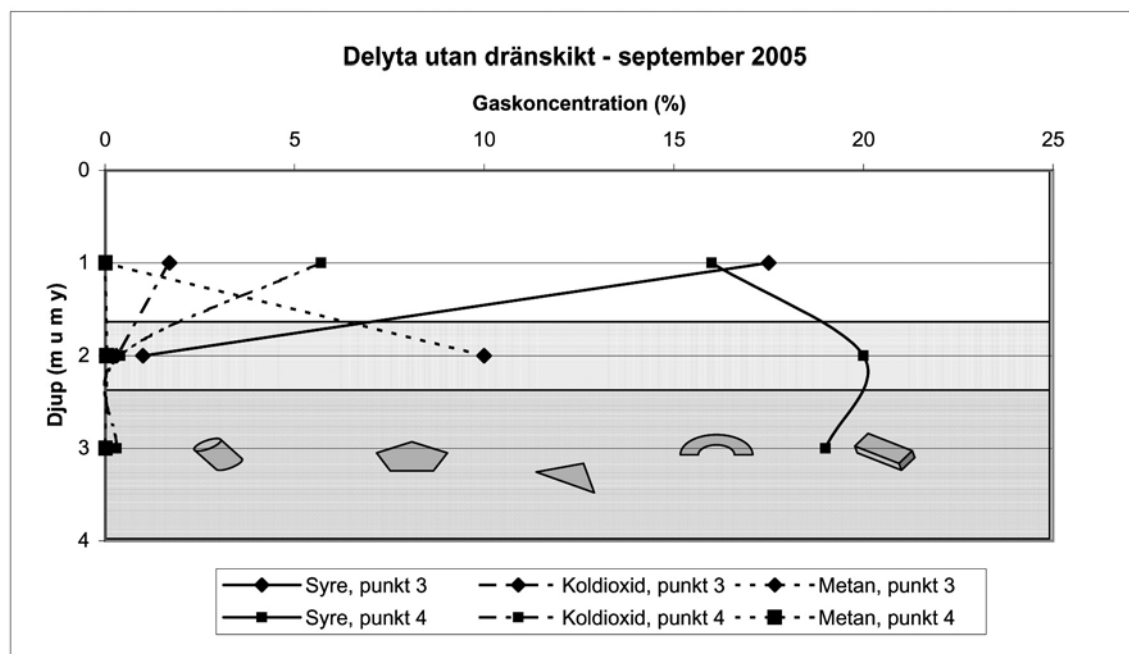
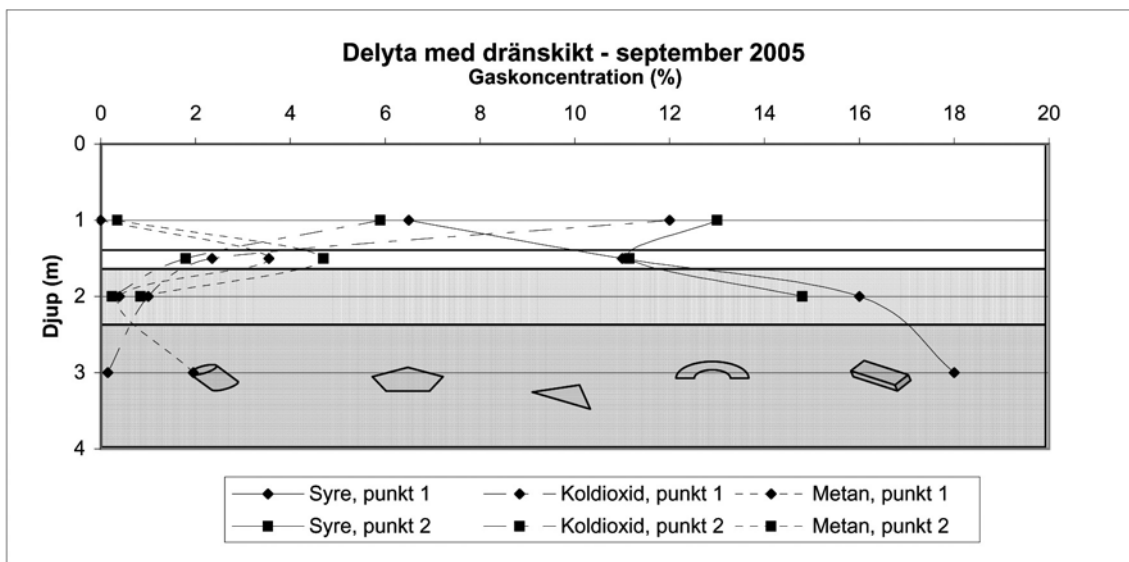
## Bilaga H.A.2: Gasmätning Tekniska Verken



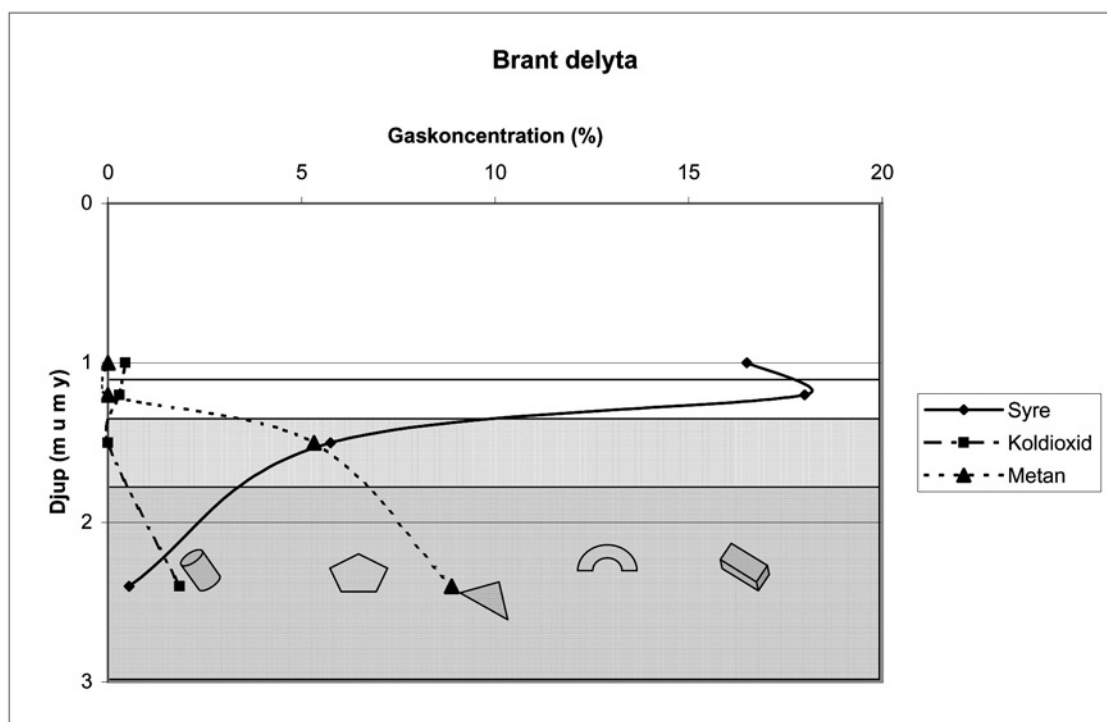
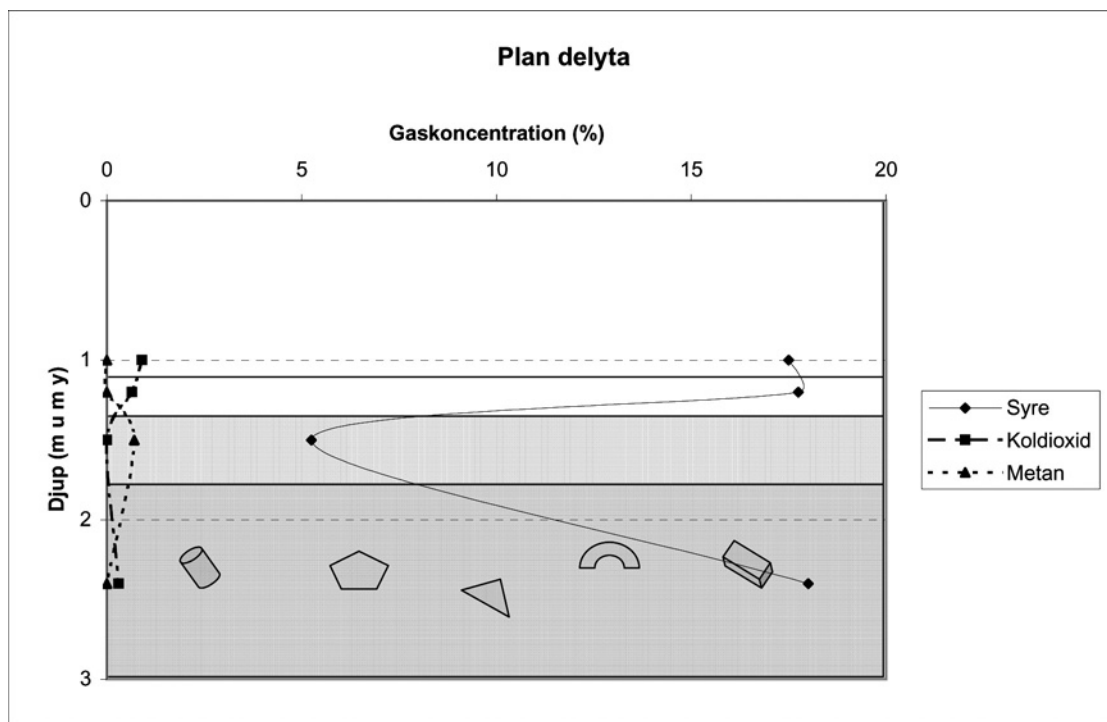








### Bilaga H.A.3: Gasmätning SRV Återvinning



# Bilaga I: Syretillgång och pH – effekter i olika konstruktioner av deponitäckningar

*Datum: 2004-03-23*

*Utförd av: Märta Ländell, Geo Innova AB och Bo Svensson, Tema Vatten, LiU*

## I.1 Effekter av ökad syretillgång och sjunkande pH

Nedbrytning av organiskt material i slam/aska-blandningen är beroende av bl.a. tillgången på syre och pH i blandningen. Nedbrytning kommer att fortgå även i frånvaro av syre, men i betydligt lägre takt än då syre finns tillgängligt. De flesta mikroorganismer i slam och ”normala” jordar har pH-optimum mellan 6 och 8, dvs. de tillväxer snabbast i detta intervall. I alkalina miljöer utvecklas dock mikroorganismer med högre pH-optima. Eftersom mikroorganismerna i ett skikt av slam och aska har sitt huvudsakliga ursprung i slammet, bedöms nedbrytning därför vara långsam så länge pH är högt och syretillgången är låg. Vid en ökning av syretillgången eller en sänkning av pH kan en ökning av nedbrytningshastigheten förväntas.

## I.2 Tillförsel av syre och förändring av pH

Tillförsel av syre till tätskiktet väntas ske genom diffusion och transport med perkolerande vatten. Mängden syre som kan transporteras med vatten är liten, och minskar med stigande temperatur. Diffusionen kan bli betydligt större. Faktorer som påverkar diffusionens storlek är materialets porositet (beror bl.a. av packning), vattenmättnaden i skiktet, skiktets nivå under markytan, överliggande materials beskaffenhet (bl.a. porositet) och skador på skiktet i form av rotpenetration och grävning av människor eller djur.

Förändringar av pH-värdet i materialet kan ha flera orsaker. Jämvikt med omgivningen eftersträvas.

Därför påverkas pH av kontakt mellan tätskiktet och över- och underliggande skikt. Genomströmning av vatten (nederbörd som perkolerar genom tätskiktet eller rinner av vid dess överyta) väntas också ha en neutraliserande effekt. Vid kontakt med luft sjunker pH i materialet, p.g.a. reaktion med koldioxid. Biologisk nedbrytning verkar neutraliserande vid höga pH.

## I.3 Konstruktion av deponitäckning

Deponitäckningen kan utformas på flera sätt, och utformningen kan ha betydelse för syretillförsel och förändringar av pH. I figur I-1 presenteras olika exempel på utformning. Materialet ovan tätskiktet har stor mäktighet, vilket bör minska diffusionshastigheten av syre från atmosfären till tätskiktet. Då tätskiktet är i direkt kontakt med avfallet kan avfallets sammansättning leda till förändring av pH i tätskiktet. I dränsiktet ovan tätskiktet förs perkolerande vatten bort från täckningen. Då detta vatten kommer i kontakt med slam/aska-blandningen (på ytan eller då materialet inte är vattenmättat) sker jämviktsreaktioner mellan matriserna. Då dränsiktet inte är vattenmättat innehåller det relativt stor volym markgas eftersom porositeten är stor. Därigenom kan en hög diffusionshastighet av syre och andra gaser mellan dränsiktet och tätskiktet förväntas. På grund av den stora porositeten i dränsiktet, antas diffusionen i detta skikt vara näst intill obegränsad, och inga koncentrationsgradienter förekomma, förutsatt att materialet är omättat.

Då dränsiktet utesluts, (figur I-1b), väntas strömningen av vatten i anslutning till tätskiktet minska, förutsatt att skyddsskiktet har låg permeabilitet. Därmed skulle utlakningen från tätskiktets yta minskas. En nackdel med att utesluta dränsiktet skulle vara att vattentrycket på tätskiktets yta ökar. För att minska tillgången på syre vid skiktets övre yta kan skyddsskiktets tjocklek ökas, syretillgången minskar med ökat djup. I figur I-1c har tätskiktets mäktighet ökat till 0,75 m. Om syrekoncentrationen

a)

|                      |       |
|----------------------|-------|
| Växtetableringsskikt | 0,2 m |
| Skyddsskikt          | 1,0 m |
| Dränskikt            | 0,5 m |
| Tätskikt             | 0,5 m |
| Avfall               |       |

b)

|                      |       |
|----------------------|-------|
| Växtetableringsskikt | 0,2 m |
| Skyddsskikt          | 1,5 m |
| Tätskikt             | 0,5 m |
| Avfall               |       |

c)

|                      |        |
|----------------------|--------|
| Växtetableringsskikt | 0,2 m  |
| Skyddsskikt          | 1,0 m  |
| Dränskikt            | 0,5 m  |
| Tätskikt             | 0,75 m |
| Avfall               |        |

Figur I-1. Principiell skiss över utformning av deponitäckning, a) med dränskikt över tätskiktet, b) dränskiktet har uteslutits och skyddsskiktets mäktighet ökats, samt c) tätskiktets mäktighet har ökats, i övrigt som i a).

i tätskiktets övre och undre yta inte förändras jämfört med figur I-1a, sjunker gradienten för syrgaskoncentrationen över tätskiktet, vilket leder till ett minskat flöde. Den större mäktigheten gör också att skiktets funktion blir mindre sårbar för mekaniska skador och för nedbrytning av slamdelen.

## I.4 Beräkning av syretillförsel

### Tillförsel via perkolerande vatten

Genom tätskiktet för en deponi med icke-farligt avfall tillåts  $50 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$  infiltrera. Mängden syre som kan transporteras med denna vattenvolym är beroende av temperaturen och varierar mellan 2,2 och  $3,5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ , då temperaturen för perkolerande vatten varierar mellan 20 och  $0^\circ\text{C}$ . För en deponi för farligt avfall är tillåten infiltrerande volym  $5 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ , följaktligen minskar även mängden syre med en tiopotens, till  $0,22\text{--}0,35 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ .

För tillförsel via perkolerande vatten har inte olika utformning av deponitäckningen särskiljts. Beroende på materialens täthet kan infiltrationen bli mindre än ovan.

### Tillförsel via diffusion

Diffusion av syre i mark kan beräknas. Här beräknas endast diffusion genom tätskiktet.

Vid beräkning av syretillförsel i tätskikt används ekvation för flöde enligt Bogner m.fl. (1988). Vid beräkning tas hänsyn till andelen gasfyllda porer, porernas form, den studerade gasens diffusionskoefficient i aktuell gasblandning och koncentrationsgradienten för det studerade skiktet i täckningen. Koefficienten för porernas form har beräknats från gasfylld porvolym på samma sätt som i den studie som utförts av Bogner m.fl. (1988), övriga parametrar har uppskattats, vilket medför att resultaten endast bör användas för inbördes jämförelser mellan olika konstruktioner. Med utgångspunkt från mätningar i Furulund antas diffusionen av syre i skyddsskiktet vara av en sådan storleksordning att syrekonzentrationen i markgasen sjunkit till mellan 5 och 10 % beroende på skyddsskiktets tjocklek, jämfört med 20 % i atmosfären. Under tätskiktet antas koncentrationen vara 1 %. Vidare antas den gasfyllda porvolymen i materialet vara 5 %.

Den beräknade mängden syre är den maximala mängden som teoretiskt kan diffundera ner i materialet. Mängden kan begränsas av yttre faktorer, t.ex. minskad tillgång på syre i överliggande skikt.

Trots att resultaten är osäkra anges beräknade värden på diffunderad mängd syre. Detta i syfte att tydliggöra skillnaden mellan syretillförsel genom

diffusion och genom transport med perkolerande vatten, som har bedömts uppgå till ca  $2\text{--}4\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ , se ovan.

#### **Fall A – Figur I-1a**

Antaganden:

Syrgaskoncentration ovan tätskiktet: 10 %

Syrgaskoncentration under tätskiktet: 1 %

Gasfylld porvolym: 5 %

Tätskiktets tjocklek: 50 cm

Största teoretiska tillskott av syre till tätskiktet blir då ca  $20\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ .

#### **Fall B – Figur I-1b**

Antaganden:

Syrgaskoncentration ovan tätskiktet: 5 %. Det är lägre än i fall A, p.g.a. att skyddsskiktets måktighet ökas (den stora porositeten i dränlagret antas innebära att syrgaskoncentrationen är konstant över detta skikt).

Syrgaskoncentration under tätskiktet: 1 %

Gasfylld porvolym: 5 %

Tätskiktets tjocklek: 50 cm

Största teoretiska tillskott av syre till tätskiktet blir då ca  $10\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ .

#### **Fall C – Figur I-1c**

Antaganden:

Syrgaskoncentration ovan tätskiktet: 10 %

Syrgaskoncentration under tätskiktet: 1 %

Gasfylld porvolym: 5 %

Tätskiktets tjocklek: 75 cm

Största teoretiska tillskott av syre till tätskiktet blir då ca  $15\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ .

För dessa alternativa konstruktioner minskar alltså mängden tillfört syre till hälften, då syrekoncentrationen ovan tätskiktet minskar från 10 till 5 %. Då tätskiktets tjocklek ökas från 50 till 75 cm minskar syretillförseln med 25 %. Om materialet packas ytterligare eller vattenmättnaden ökas, så att den gasfyllda porvolymen uppgår till 2 % istället för 5 %, sjunker syretillskottet till ca 10, 5 och 8 kg för fall A, B respektive C ovan, dvs. en minskning med hälften.

Syrehalten i tätskiktets underkant har betydelse för koncentrationsgradienten över skiktet. Stor skillnad

mellan koncentrationerna över och under tätskiktet medför att gradienten blir stor och utjämning av skillnaderna eftersträvas. Detta åskådliggörs genom skillnaderna för fall A och fall B. Om gradienten minskar ytterligare, genom att syrekoncentrationen antas var 5 % över tätskiktet och 3 % under tätskiktet, minskar den beräknade maximala syretillförseln till tätskiktet till  $5\text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{år})$ .

## **1.5 Åtgärder för att förhindra syretillförsel**

Tillförseln av syre till materialet begränsas effektivast genom att diffusionen minimeras. Skillnaden mellan mängden syre som tillförs via perkolerande vatten och via diffusion är stor. I fallen ovan är syretillförseln via diffusion ca tre tiopotenser större än via perkolerande vatten. Begränsning av diffusionen kan åstadkommas genom att tätskiktet är vattenmättat så stor del av tiden som möjligt och att överliggande skikt är täta och har relativt stor måktighet, så att syrekoncentrationen vid tätskiktets övre yta blir så liten som möjligt.

## **1.6 Förändring av pH**

Förändring av pH i materialet väntas ske till följd av biologisk aktivitet, spädning med vatten i materialet och kontakt med annat material i gränserna mellan skikten. Av dessa faktorer väntas den biologiska aktiviteten ha störst betydelse för sänkning av pH.

## **1.7 Åtgärder för att förhindra sänkning av pH**

Störst effekt för att minska pH-förändringar skulle alltså erhållas om den mikrobiella aktiviteten förhindrades. Detta bedöms dock inte vara möjligt. Vid undersökningar i Furulund konstaterades att den översta halvmetern av slam/kalk-blandningen var påverkad och hade betydligt lägre pH-värde än

materialet hade vid utläggning. Då rötat slam och aska används istället för orötat slam och kalk, väntas samma processer ske i blandningen, men i betydligt långsammare takt.

En annan åtgärd för att förhindra pH-förändring i materialet vore att begränsa infiltrationen av nederbörd. Detta erhålls genom att materialet får låg hydraulisk konduktivitet och kan ytterligare förbättras genom att slam/aska-skiktet får en viss lutning så att vatten rinner av i ett eventuellt dränsikt eller i skyddsskiktet (slam/aska-skiktet kan luta utan att överytan lutar).

Tätskiktet kommer att ha kontakt med andra material vid sin övre och undre yta. Detta kan inte undvikas, men kontakt med särskilt reaktiva material, t.ex. vissa typer av avfall, kan förhindras genom att ett skikt av t.ex. samma material som skyddsskiktet läggs mellan avfallet och tätskiktet eller att tätskiktets mäktighet ökas vilket ger större marginal (acceptabelt att viss del av materialet bryts ned).

## Referenser

Bogner, J., Vogt, M., Piorkowski, R., Rose, C. and Hsu, M., 1988: "U.S. Landfill Gas Research" in Y. R. Alston and G. E. Richards (Editors), *Landfill Gas and Anaerobic Digestion of Solid Waste*, United Kingdom Department of Energy, 313–337

Sundberg, J., Carling, M., Ländell, M., Svensson, B., 2002: Täckning av deponier med blandning av avloppsslam och aska – Erfarenheter, beständighet och andra egenskaper, RVF Utveckling 02:18 (även VA-Forsk 2003-21).

# Bilaga J: Tolkning av fältprovtagning av markprofiler vid Furulunds slamdeponi, hösten 2003

*Datum: 2004-01-20*

*Utförd av: Bo Svensson, Tema Vatten, LiU och Märta Ländell, Geo Innova AB*

## J.1 Syfte

Under sommaren 2002 utfördes provtagning av den utlagda slam/kalk-blandningen i Furulund. Vid provtagningen och vid utvärderingen av laboratorieresultaten konstaterades att några gasprover störts vid provtagningen och att ett utökat antal prover på det fasta materialet skulle kunna ge värdefull information. Resultat från 2002 redovisas i rapport, RVF Utveckling 02:18.

För att komplettera de redovisade resultaten och verifiera slutsatserna, utfördes ytterligare provtagning under hösten 2003. Avsikten med denna provtagning var att ge ytterligare data för att kunna bedöma beständighet hos slam stabiliserat vid högt pH, i detta fall med kalk. Dessa data skulle sedan användas för att förutse hur en blandning av slam och aska skulle kunna bete sig.

## J.2 Bakgrund

Markprofilerna provtogs och analyserades med avseende på torrsubstans, glödförlust och pH samt på markgassammansättning.

Förändringar i fr.a. glödförlust och pH i slammet är starka indikationer på att mikrobiell aktivitet lett till en nedbrytning av det organiska materialet. Gassammansättningen kan konfirmera detta genom att fr.a. visa förhöjda koldioxid- och metanvärden.

## J.3 Genomförande

### Provtagning

Provtagningen av fasta prover utfördes med borrhandsvagn, som tillsammans med skruvar och annan utrustning rengjordes före fältarbetet. Fältarbetena följde i tillämpliga delar råd och anvisningar i SGF:s fälthandbok för miljötekniska markundersökningar (SGF 2004).

Jordprover togs med hjälp av skruvborr i fyra punkter. För varje borrhpunkt noterades jordlagerföljd, grundvattennivå och övriga iakttagelser, se bilaga J.A.1. Prov togs ut varje halvmeter eller vid förändringar i materialet, och förvarades i plastpåsar.

Gasprovtagningen gjordes genom att prover installerades på olika djup i profilerna vid tre av provtagningsplatserna. De fick jämvikta under tre veckor, varefter de provtogs. Tre successiva prover togs ur varje prob och överfördes till vardera en provtagningsflaska (22 ml), dvs. från varje nivå togs trippelprov. Då vatten uppträdde i proverna togs den tillgängliga gasfasen. Proverna analyserades med avseende på syre, metan och koldioxid med hjälp av gaskromatografi.

Primärresultaten redovisas i bilagorna J.A.2 och J.A.3.

### Iakttagelser vid provtagning

Mulljord och sand utgjorde ett övre skikt ned till ca 0,5 m, varefter slam förelåg ned till mellan 2,2 till 3,0 m. Slammet var mörkt i övre delen ned till ca 1 m och ljus ned till ca 2,3 m, varefter ett mörkt skikt uppträdde ned till botten, som kunde bestå av lera eller slagg.

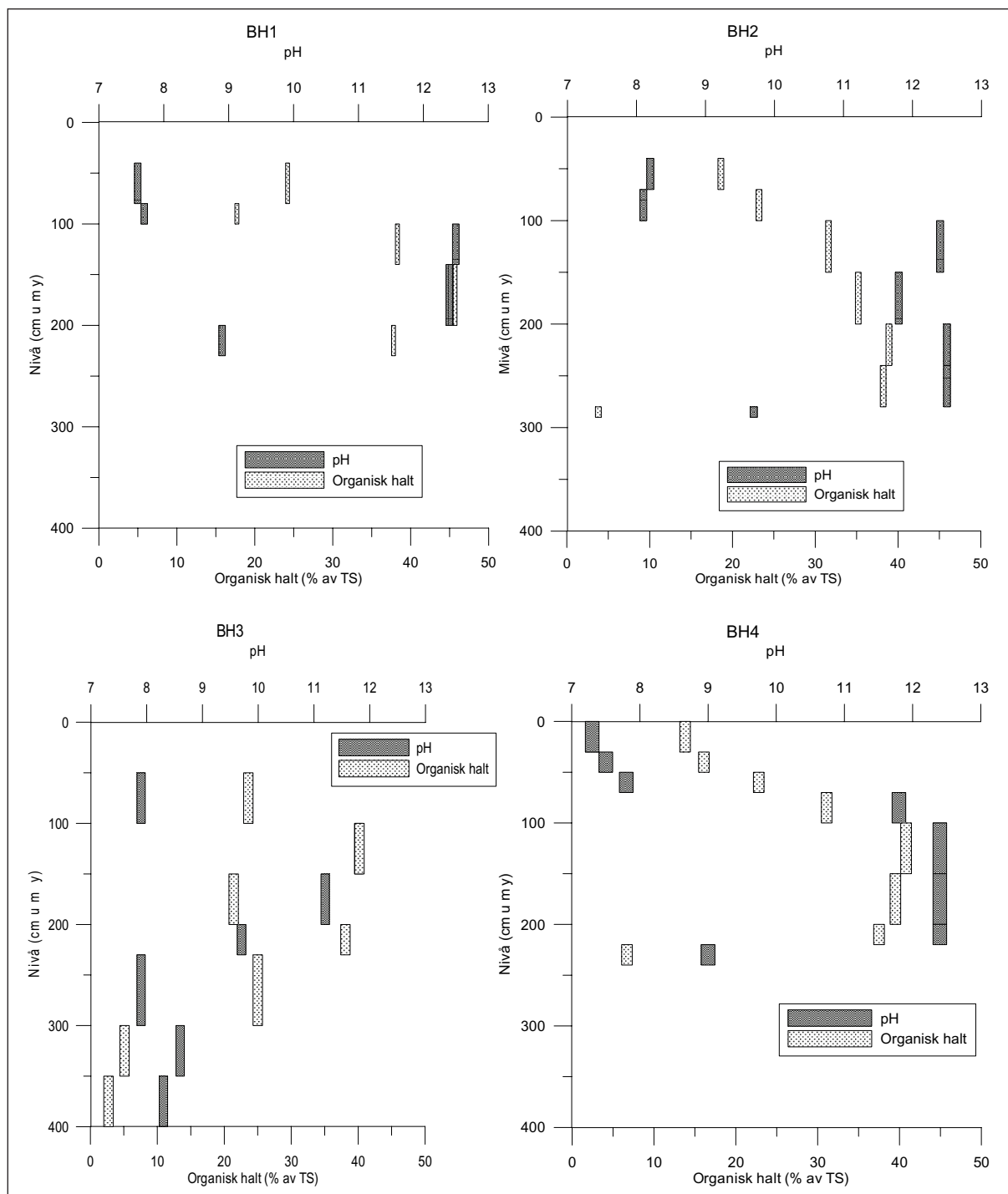
## J.4 Resultat och diskussion

Färgförändring av slammet (mörkt till ljus) var kopplad till en pH-skillnad från 7,6–9,7 till 11,2–12,5

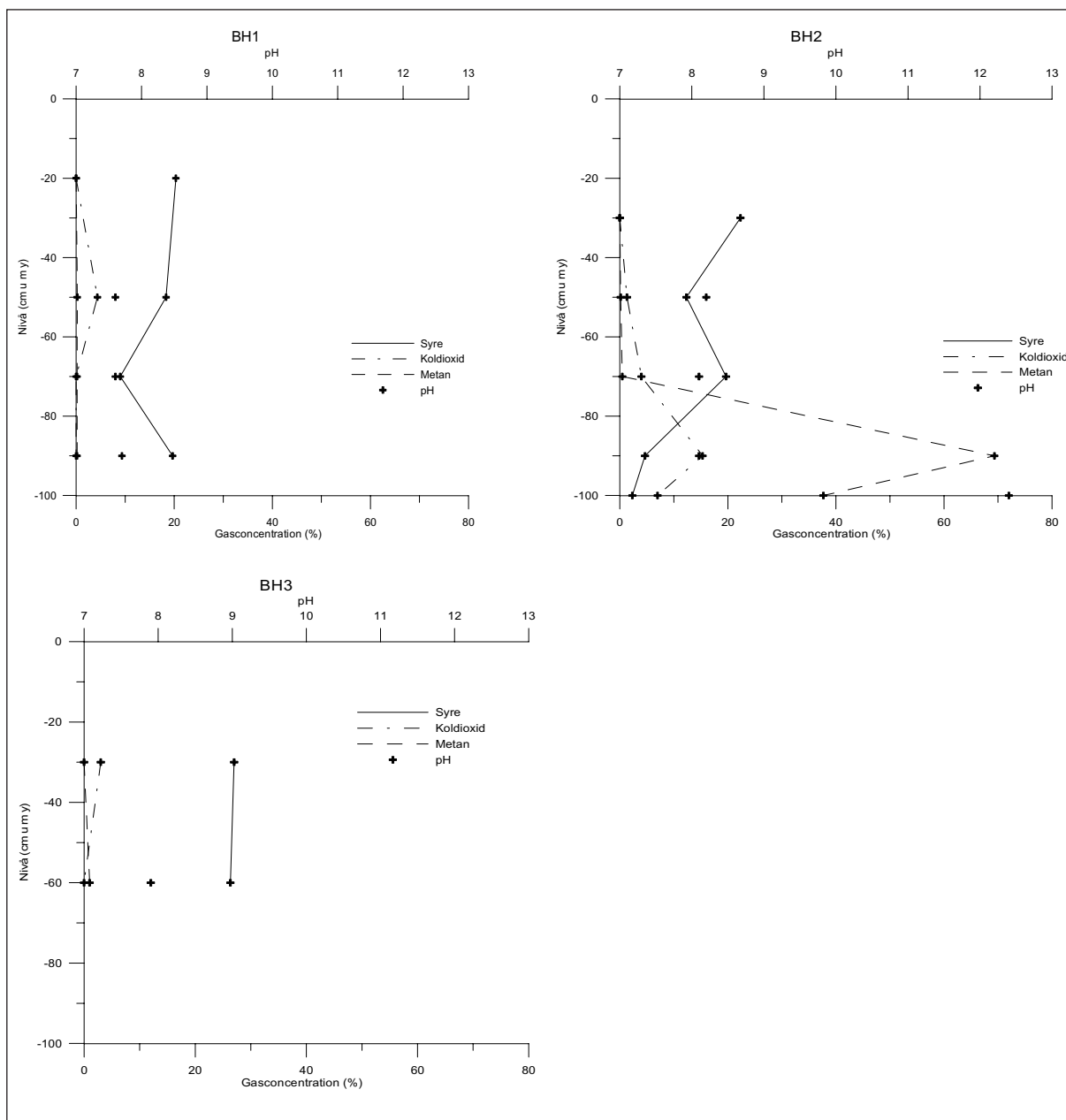
och en skillnad i glödförlust från 13,8–24,2 % av torrsubstansen till 31,1–45,7 %, se figur J-1. Ur figuren framgår att högt pH och hög organisk halt för proverna sammanfaller, med undantag för BH3 1,5–2,0 m u m y och BH1 2,0–2,3 m u m y.

Gasproberna nådde inte ned längre än till gränsen mellan de mörka och de ljusa skikten (ca 1 m). Den förändring av materialet som indikeras vid analys av det fasta materialet kan därför inte beläggas utifrån gasproverna. Förhöjda halter av koldioxid och metan

sågs speciellt i profil 2 på nivå 0,7–1,0 m u m y, och sammanföll med ett pH=8, se figur J-2. Det prov som tagits djupast i denna punkt (1 m u m y) är taget i gränsen mellan neutralt och högt pH. I detta fall var syrehalten också låg vilket tyder på att en anaerob metanogen nedbrytning pågår. Profil 1 ger inte så tydliga svar, men även här förekom förhöjda metan- och koldioxidhalter, vilket tyder på att anaerob nedbrytning sker. Naturlig halt metan i luft är ca 0,0002 %, vilket innebär att då halten är mätbar



Figur J-1. Organisk halt och pH mot djup i slam/kalk-blandningen i Furulund.



Figur J-2. Gassammansättning relativt djup för slam/kalk-blandningen i Furulund. För jämförelse finns även pH i diagrammen. Observera de olika skalorna på axlarna.

med här använd metod, är den förhöjd relativt naturlig halt. Från profil 3 finns endast två mätresultat, p.g.a. problem med provtagningsutrustningen vid denna punkt. Trippelproven från några av nivåerna varierar kraftigt sinsemellan, vilket kan bero på problem vid provtagningen (vatten i provet), provet kan ha kontaminerats med syre eller osäkerhet vid analys (spädningsfel eller mätfel). I några fall överstiger syrehalten i provet naturlig halt i luft, vilket antas bero på mätosäkerhet.

Vid jämförelse med resultat från laboratorieanalyser utförda i samband med utläggning av slammet 1987, konstateras att i det övre, påverkade skiktet har knappt 50 % av det organiska materialet brutits ner.

I det djupare skiktet har mängden organiskt material minskat med ca 5 %. I det ursprungliga materialet var pH drygt 12, vilket inte har förändrats märkbart i det ljusa skiktet (från 1,0 m u m y till 2,0–2,8 m u m y). I den allra djupaste delen av slamblandningen, är återstående mängd organiskt material ca 80 % av den ursprungliga. I detta djupaste skikt är material mörkt och har pH 8–10. En förklaring till denna påverkan kan vara påverkan från underliggande material. Området kring platsen där slam/kalk-blandningen ligger, utgörs av en slänt vilket kan tyda på att grundvattenströmning sker på lägre nivåer.

Nedbrytningshastigheten för de olika skikten i slamblandningen har beräknats utifrån organisk halt

vid utläggning och vid provtagning 2003. I beräkningarna förutsätts att hastigheten är konstant över tiden, vilket är en förenkling. Enligt beräkningarna kommer hälften av det organiska materialet i övre skiktet att ha brutits ner efter 18 år. För det mellersta och det understa skiktet är motsvarande tid 137 och 43 år. Vid undersökningen som gjordes under 2002 analyserades organisk halt på ett prov från det övre, påverkade skiktet och ett prov från det opåverkade skiktet. Beräknade tider för nedbrytning av hälften av det organiska materialet blev då 21 respektive 270 år. Skillnaden i de beräknade tiderna antas bero på skillnader mellan enskilda prover och att endast ett prov från varje studerat skikt undersöktes vid den första provtagningen.

Det slam som använts i blandningen på Furulund hade inte rötats före utläggning. Detta innebär att nedbrytningen är avsevärt större än den skulle varit om rötat slam använts.

## J.5 Slutsatser

Slutsatsen är att det deponerade stabiliserade slammet genomgår en långsam nedbrytning, som huvudsakligen är anaerob. Detta har inneburit att i den övre ca halvmeteren har det organiska materialet brutits ned till ca 50%. I det till synes opåverkade skiktet på nivåerna 1,0–ca 2,5 m u m y har, enligt beräkningar, ca 5 % brutits ner.

Provtagningen och analyserna från 2003 verifierar resultat från den tidigare undersökningen. Högt pH har en fördröjande effekt på nedbrytningen.

I tillämpningar där rötat slam används, kan nedbrytningshastigheten förväntas bli avsevärt lägre.

## Referenser

Svenska Geotekniska Föreningen (SGF), 2004: Miljötekniska markundersökningar. SGF Rapport 1.2004.

Sundberg, J., Carling, M., Ländell, M., Svensson, B., 2002: Täckning av deponier med blandning av avloppsslam och aska – Erfarenheter, beständighet och andra egenskaper, RVF Utveckling 02:18 (även VA-Forsk 2003-21).

## Bilaga J.A.1: Fältundersökning – Furulund

Datum: 2003-10-02

Metod (t.ex. skr): skr

Referensyta (t.ex. my): My

Övrigt (t.ex. väder): sol, lite mulet, ca 15 grader

Signatur: Bo Johansson, GF Konsult, Bo Svensson, Tema Vatten, Märta Ländell, Geo Innova

| Punkt | Djup under markyta (m) | Prov-nummer | Preliminär jordartsbestämning | Kommentar                                   | Grund-vattennivå |
|-------|------------------------|-------------|-------------------------------|---------------------------------------------|------------------|
| BH 1  | 0,0–0,1                |             | mulljord                      |                                             |                  |
|       | 0,1–0,4                |             | sand                          |                                             |                  |
|       | 0,4–0,8                | 1           | slam                          | mörkt                                       |                  |
|       | 0,8–1,0                | 2           | slam                          | mörkt                                       |                  |
|       | 1,0–1,4                | 3           | slam                          | ljus                                        |                  |
|       | 1,4–2,0                | 4           | slam                          | ljus                                        |                  |
|       | 2,0–2,3                | 5           | slam                          | mörkt, stopp på 2,3 m, ingen grundvattenyta |                  |
| BH 2  | 0,0–0,1                |             | mulljord                      |                                             |                  |
|       | 0,1–0,4                |             | sand                          |                                             |                  |
|       | 0,4–0,7                | 1           | slam                          | mörkt                                       |                  |
|       | 0,7–1,0                | 2           | slam                          | mörkt                                       |                  |
|       | 1,0–1,5                | 3           | slam                          | ljus                                        |                  |
|       | 1,5–2,0                | 4           | slam                          | ljus                                        |                  |
|       | 2,0–2,4                | 5           | slam                          | ljus                                        |                  |
|       | 2,4–2,8                | 6           | slam                          | ljus                                        | 2,5 m            |
|       | 2,8–2,9                | 7           | slam                          | mörkt                                       |                  |
| BH 3  | 0,0–0,3                |             | mulljord                      |                                             |                  |
|       | 0,3–0,5                |             | grusig sand                   |                                             |                  |
|       | 0,5–1,0                | 1           | slam                          | mörkt                                       |                  |
|       | 1,0–1,5                | 2           | slam                          | ljus                                        |                  |
|       | 1,5–2,0                | 3           | slam                          | ljus                                        | 2,0 m            |
|       | 2,0–2,3                | 4           | slam                          | ljus                                        |                  |
|       | 2,3–3,0                | 5           | slam                          | mörkt                                       |                  |
|       | 3,0–3,5                | 6           | lera                          |                                             |                  |
|       | 3,5–4,0                | 7           | lera                          |                                             |                  |
| BH 4  | 0,0–0,3                | 1           | mulljord                      |                                             |                  |
|       | 0,3–0,5                | 2           | sand                          |                                             |                  |
|       | 0,5–0,7                | 3           | slam                          | mörkt                                       |                  |
|       | 0,7–1,0                | 4           | slam                          | ljus                                        |                  |
|       | 1,0–1,5                | 5           | slam                          | ljus                                        |                  |
|       | 1,5–2,0                | 6           | slam                          | ljus                                        | 2,0 m            |
|       | 2,0–2,2                | 7           | slam                          | ljus                                        |                  |
|       | 2,2–2,4                | 8           | slagg                         |                                             |                  |

## Bilaga J.A.2: Sammanställning resultat Furulund

### Fasta prover

| Punkt | Djup u my (m) | Provnr | prel. jordart | Kommentar                                   | Gv (djup u my) | pH   | TS (%) | GF (% av TS) |
|-------|---------------|--------|---------------|---------------------------------------------|----------------|------|--------|--------------|
| BH 1  | 0,0–0,1       |        | mulljord      |                                             |                |      |        |              |
|       | 0,1–0,4       |        | sand          |                                             |                |      |        |              |
|       | 0,4–0,8       | 1      | slam          | mörkt                                       |                | 7,6  | 40,6   | 24,2         |
|       | 0,8–1,0       | 2      | slam          | mörkt                                       |                | 7,7  | 44,9   | 17,7         |
|       | 1,0–1,4       | 3      | slam          | ljus                                        |                | 12,5 | 39,5   | 38,3         |
|       | 1,4–2,0       | 4      | slam          | ljus                                        |                | 12,4 | 38,3   | 45,7         |
|       | 2,0–2,3       | 5      | slam          | mörkt, stopp på 2,3 m, ingen grundvattenyta |                | 8,9  | 37,6   | 37,8         |
| BH 2  | 0,0–0,1       |        | mulljord      |                                             |                |      |        |              |
|       | 0,1–0,4       |        | sand          |                                             |                |      |        |              |
|       | 0,4–0,7       | 1      | slam          | mörkt                                       |                | 8,2  | 55,8   | 18,6         |
|       | 0,7–1,0       | 2      | slam          | mörkt                                       |                | 8,1  | 43,2   | 23,2         |
|       | 1,0–1,5       | 3      | slam          | ljus                                        |                | 12,4 | 43,2   | 31,6         |
|       | 1,5–2,0       | 4      | slam          | ljus                                        |                | 11,8 | 41,7   | 35,2         |
|       | 2,0–2,4       | 5      | slam          | ljus                                        |                | 12,5 | 37,1   | 38,9         |
|       | 2,4–2,8       | 6      | slam          | ljus                                        | 2,5 m          | 12,5 | 36,8   | 38,2         |
|       | 2,8–2,9       | 7      | slam          | mörkt                                       |                | 9,7  | 80,7   | 3,8          |
| BH 3  | 0,0–0,3       |        | mulljord      |                                             |                |      |        |              |
|       | 0,3–0,5       |        | grusig sand   |                                             |                |      |        |              |
|       | 0,5–1,0       | 1      | slam          | mörkt                                       |                | 7,9  | 40,9   | 23,6         |
|       | 1,0–1,5       | 2      | slam          | ljus                                        |                | 11,8 | 34,7   | 40,2         |
|       | 1,5–2,0       | 3      | slam          | ljus                                        | 2,0 m          | 11,2 | 53,3   | 21,4         |
|       | 2,0–2,3       | 4      | slam          | ljus                                        |                | 9,7  | 39,3   | 38,1         |
|       | 2,3–3,0       | 5      | slam          | mörkt                                       |                | 7,9  | 46     | 25           |
|       | 3,0–3,5       | 6      | lera          |                                             |                | 8,6  | 67,6   | 5,1          |
|       | 3,5–4,0       | 7      | lera          |                                             |                | 8,3  | 79,5   | 2,7          |
| BH 4  | 0,0–0,3       | 1      | mulljord      |                                             |                | 7,3  | 67,3   | 13,8         |
|       | 0,3–0,5       | 2      | sand          |                                             |                | 7,5  | 49,1   | 16,1         |
|       | 0,5–0,7       | 3      | slam          | mörkt                                       |                | 7,8  | 36,7   | 22,8         |
|       | 0,7–1,0       | 4      | slam          | ljus                                        |                | 11,8 | 41,9   | 31,1         |
|       | 1,0–1,5       | 5      | slam          | ljus                                        |                | 12,4 | 35,9   | 40,8         |
|       | 1,5–2,0       | 6      | slam          | ljus                                        | 2,0 m          | 12,4 | 37,3   | 39,5         |
|       | 2,0–2,2       | 7      | slam          | ljus                                        |                | 12,4 | 35,5   | 37,5         |
|       | 2,2–2,4       | 8      | slagg         |                                             |                | 9    | 93,7   | 6,7          |

## Bilaga J.A.2: Sammanställning resultat Furulund

### Gasprover

Koncentrationerna är i provluften före spädning i provtagningsvialen

| Prov   | Syrgas<br>vol-% | Koldioxid<br>vol-% | Metan<br>vol-% | Djup cm |
|--------|-----------------|--------------------|----------------|---------|
| BH1 1a | 20              | <2                 | <0,1           | 20      |
| BH1 1b | 21              | <2                 | <0,1           | 20      |
| BH1 1c | 20              | <2                 | <0,1           | 20      |
| BH1 2a | 17              | 5                  | 0,3            | 50      |
| BH1 2b | 18              | 4                  | 0,2            | 50      |
| BH1 2c | 20              | 4                  | 0,2            | 50      |
| BH1 3a | 20              | <2                 | 0,2            | 90      |
| BH1 3b | 23              | <2                 | 0,2            | 90      |
| BH1 3c | 16              | <2                 | 0,2            | 90      |
| BH1 4a | 7               | <2                 | 0,2            | 70      |
| BH1 4b | 13              | <2                 | 0,2            | 70      |
| BH1 4c | 7               | <2                 | 0,2            | 70      |
| BH2 1a | 25              | <2                 | <0,1           | 30      |
| BH2 1b | 24              | <2                 | <0,1           | 30      |
| BH2 1c | 18              | <2                 | <0,1           | 30      |
| BH2 2a | 25              | <2                 | 0,1            | 50      |
| BH2 2b | 12              | 4                  | 0,4            | 50      |
| BH2 2c | <2              | <2                 | <0,1           | 50      |
| BH2 3a | 5               | 4                  | 2              | 100     |
| BH2 3b | 2               | 10                 | 19             | 100     |
| BH2 3c | <2              | 7                  | 92             | 100     |
| BH2 4a | 16              | <2                 | 0,2            | 70      |
| BH2 4b | 14              | 2                  | 0,2            | 70      |
| BH2 4c | 29              | 10                 | 1              | 70      |
| BH2 5a | 14              | 6                  | 5              | 90      |
| BH2 5b | <2              | 29                 | 98             | 90      |
| BH2 5c | <2              | 11                 | 105            | 90      |
| BH3 1a | 25              | <2                 | 1              | 60      |
| BH3 1b | 27              | <2                 | 1              | 60      |
| BH3 1c | 27              | <2                 | 1              | 60      |
| BH3 2a | 24              | 3                  | <0,1           | 30      |
| BH3 2b | 29              | 3                  | <0,1           | 30      |
| BH3 2c | 28              | 3                  | <0,1           | 30      |

Kommentar: Från varje nivå har trippelprov tagits, betecknade a, b och c.

## Bilaga K: Förklaring av använda begrepp

Datum: 2005-11-20

Utförd av: Maria Carling, Geo Innova AB

### K.1 Vattenkvot/TS-halt

Vattenkvoten definieras som

$$w = \frac{m_w \cdot 100}{m_s} \quad \text{där}$$

w = vattenkvot, %

m<sub>w</sub> = vattnets massa, g

m<sub>s</sub> = fasta materialets massa, g

Vattenkvot är ett geotekniskt begrepp. I många andra sammanhang används istället TS-halt. Sambandet mellan TS och vattenkvot är

$$TS = \frac{1}{1 + w}$$

Med optimal vattenkvot menas den vattenkvot som ger högsta torrdensitet vid Proctorpackning. Förhållandet mellan vattenkvot och torrdensitet bestäms genom packningsförsök. Resultaten från packningsförsöken ger en packningskurva ur vilket den optimala vattenkvoten kan utläsas.

För slam/aska-blandningar är den "naturliga" vattenkvoten mest intressant och hur den förhåller sig till den optimala vattenkvoten. Rent praktiskt går det inte att i fält torka materialen för att få en lägre vattenkvot än den "naturliga", vilket innebär att den uppmätta optimala vattenkvoten ska ses som en rimlig nedre gräns.

### K.2 Torrdensitet

Torrdensiteten definieras som

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad \text{där}$$

ρ<sub>d</sub> = torrdensitet, ton/m<sup>3</sup>

m<sub>s</sub> = fasta materialets massa, ton

V = materialets totala volym, m<sup>3</sup>

När materialet blir bättre packat ökar successivt materialets torrdensitet. En bättre packad blandning leder normalt till att den hydrauliska konduktiviteten minskar.

### K.3 Kompaktdensitet

Kompaktdensiteten är densiteten hos de enskilda beståndsdelarna i materialet och definieras som

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad \text{där}$$

ρ<sub>s</sub> = kompaktdensitet, ton/m<sup>3</sup>

m<sub>s</sub> = fasta materialets massa, ton

V<sub>s</sub> = fast materialets volym, m<sup>3</sup>

Korndensiteten är partikelmaterialets densitet inklusive eventuella luftblåsor. Normalt motsvarar korndensiteten kompaktdensiteten.

### K.4 Skrymdensitet

Skrymdensiteten avser förhållandet mellan materialets totala massa och dess totala volym:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ρ = skrymdensitet, ton/m<sup>3</sup>

m = materialets totala massa, ton

V = materialets totala volym, m<sup>3</sup>

## K.5 Packningsgrad

Packningsgraden definieras som kvoten mellan uppnådd torrddensitet och maximal torrddensitet, erhållen vid Proctorpackning. Den hydrauliska konduktiviteten minskar när packningsgraden ökar.

## K.6 Hydraulisk konduktivitet

Permeabilitet är ett mått på hur fort en vätska eller gas kan tränga igenom ett material. Hur tätt eller genomsläppligt ett material är för vatten beskrivs av den hydrauliska konduktiviteten. Strömningshastigheten bestäms av den hydrauliska gradienten och den hydrauliska konduktiviteten hos materialet. Hydraulisk konduktivitet definieras av Darcys lag som strömningshastigheten vid den hydrauliska gradienten  $i=1$ .

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{K \cdot h}{l} = K \cdot i \quad \text{där}$$

$Q$  = genomströmmande vattenmängd per tidsenhet,  $\text{m}^3/\text{s}$

$A$  = tvärsnittsarea,  $\text{m}^2$

$v$  = skenbar medelströmningshastighet,  $\text{m/s}$

$K$  = hydraulisk konduktivitet,  $\text{m/s}$

$h$  = skillnad i hydraulisk tryckhöjd på sträckan  $l$ ,  $\text{m}$

$l$  = längd i strömningsriktningen med tryckskillnaden  $h$ ,  $\text{m}$

$i$  = hydraulisk gradient, dimensionslös

Ovanstående innebär för ett tätskikt med den hydrauliska konduktiviteten  $10^{-9} \text{m/s}$  och gradienten 1 (dvs. inget vattentryck över tätskiktet), så blir flödet genom tätskiktet 32 l/år, och vattnets genomsnittliga strömningshastighet genom tätskiktet 3 cm/år.

Den hydrauliska konduktiviteten kan mätas på flera olika sätt i lab, t.ex. genom celltryckspermeameter eller via CRS-försök. I denna studie har CRS-försök använts för att bestämma den hydrauliska konduktiviteten. CRS (Constant Rate of Strain) är ett ödometerförsök med konstant deformationshastighet. Metoden används i första hand för att bestämma kompressionsegenskaper. Den hydrauliska konduktiviteten kan bestämmas indirekt, och beräknas genom sambandet:

$$K = \frac{\gamma_w H^2}{2u_b} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \text{där}$$

$K$  = hydraulisk konduktivitet,  $\text{m/s}$

$\gamma_w$  = vattnets tunghet,  $10 \text{ kN/m}^3$

$H$  = aktuell provhöjd

$u_b$  = aktuellt portryck vid provets odränerade yta,  $\text{kPa}$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \text{deformationshastigheten, } -/s$$

## K.7 Kornstorleksfördelning

Kornfördelningen beskriver fördelningen mellan olika fraktioner i materialet och bestäms genom siktning och sedimentationsanalys. Kornfördelningen påverkar bl.a. materialets packningsegenskaper.

## K.8 Hållfasthet

Hållfasthet beskriver materialets förmåga att klara av belastning. Hur mycket materialet deformeras vid belastning beror på dess styvhet och stabilitet. Även materialets vatteninnehåll är av betydelse.

Genom enaxliga tryckförsök får man fram tryckhållfastheten. Provet utsätts för en enaxlig vertikal tryckspänning. Proven trycks till brott uppstår eller avbryts vid en viss deformation. Hållfastheten utvärderas direkt ur påförd last och belastad yta.

Den odränerade skjuvhållfastheten kan beräknas utifrån erhållet värde för tryckhållfastheten. För lerprover gäller i allmänhet att den odränerade skjuvhållfastheten är halva tryckhållfastheten. Detta beräkningssätt har här använts även för slam/aska (samma förfaringssätt har använts i andra undersökningar).



Box 47607 117 94 Stockholm

Tfn 08 506 002 00

Fax 08 506 002 10

E-post [svensktvatten@svensktvatten.se](mailto:svensktvatten@svensktvatten.se)

[www.svensktvatten.se](http://www.svensktvatten.se)