

Linermaterial med aska och rötslam

*J. Mácsik
A. Mossakowska
Y. Rogbeck
B. Svedberg
O. Uhlander*



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 frivillig. Nästan alla kommuner är med i programmet, vilket innebär att budgeten årligen omfattar drygt åtta miljoner kronor.

VA-Forsk initierades gemensamt av 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:

Ola Burström, ordförande

Olof Bergstedt

Roger Bergström

Stefan Marklund

Mikael Medelberg

Peter Stahre

Jan Söderström

Göran Tägtström

Agneta Åkerberg

Skellefteå

Göteborgs VA-verk

Svenskt Vatten AB

Luleå

Roslagsvatten AB

VA-verket Malmö

Sv kommunförbundet

Borlänge

Falkenberg

Steinar Nybruken, adjungerad

Thomas Hellström, sekreterare

NORVAR, Norge

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
E-post svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se

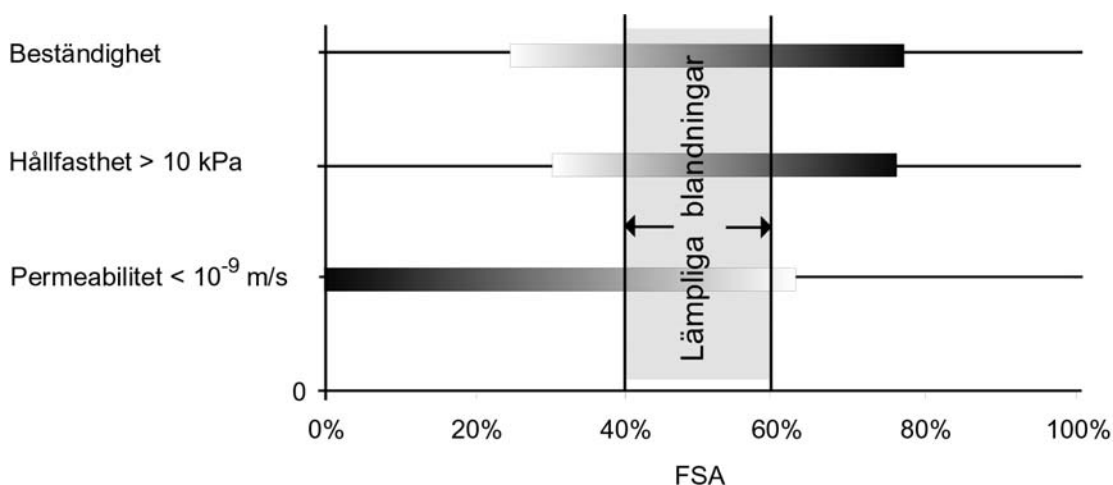
Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Linermaterial med aska och rötslam
Title of the report:	Fly ash and sewage sludge as liner material
Rapportens beteckning Nr i VA-Forsk-serien:	2003-43
ISSN-nummer:	1102-5638
ISBN-nummer:	91-85159-07-7
Författare:	J. Mácsik, Y. Rogbeck, O. Uhlander, SCC, B. Svedberg, Luleå tekniska universitet och A. Mossakowska, Stockholm Vatten AB
VA-Forsk projekt nr:	22-107
Projektets namn:	Linermaterial med aska och rötslam
Projektets finansiering:	VA-Forsk, Värmeforsk, Ångpanneföreningens Forskningsstiftelse, Svenska Renhållningsverksföreningen (RVF), SVAB och SCC
Rapportens omfattning Sidantal:	67
Format:	A4
Sökord:	Avloppsslam, flygaska, tätskikt, stabilisering, deponitäckning, materialkarakterisering
Keywords:	Sewage sludge, fly ash, liner, stabilisation, landfill cover, material characterisation
Sammandrag:	Projektets syfte är att utveckla ett tätskiktsmaterial baserat på avloppsslam och bioflygaska samt att ta fram utförandebeskrivning för pilotförsök på deponi med det nya tätskiktsmaterialet.
Abstract:	The aim of this project was to develop a new liner material based on bio fly ash and sewage sludge and to plan for a pilot test with this new liner (FSA) on a landfill.
Målgrupper:	Deponiägare, entreprenörer, slam- och bioflygaskaproducenter
Omslagsbild:	Assistentmaskin som användes vid tillverkning av prover. Foto: Stina Lenströmer, Scandiaconsult/Ramböll
Rapporten beställs från:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2003
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Sammanfattning

Projektets syfte är att utveckla ett tätskiktsmaterial baserat på avloppsslam och bioflygaska samt att ta fram utförandebeskrivning för pilotförsök på deponi med det nya tätskiktsmaterialet. De genomförda undersökningarna visar att flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) har stor potential att kunna uppfylla krav som ställs på ett tätskikt, ur beständighetsmässig, teknisk-, och inte minst, ekonomisk synpunkt. Flygaskorna som har ingått i denna bedömning är bioflygaskor. Det här projektet utgör en del av ett större projekt, där målsättningen är att resultat och erfarenheter beträffande nyttjande av FSA-material som tätskikt ska presenteras i en handbok som ska vara tillgänglig för alla intressenter.

Vid utförda laboriearbeten har recept på blandningsförhållanden tagits fram för att få ett ur teknisk och miljömässig synpunkt lämpligt material som tätskikt. Inom projektet har FSA-material tagits fram som med god marginal uppfyller permeabiliteten $< 10^{-9}$ m/s och har därmed stor förutsättning att uppnå ställda krav på tätskiktskonstruktioner som gäller icke farligt avfallsdeponier, dvs. genomsläpplighet < 50 l/m² och år. FSA bedöms ha tillräckligt hög skjuvhållfasthet och bedöms vara beständigt mot biologisk nedbrytning. Utifrån resultat från laboriearbeten utförda inom detta och andra projekt har kvalitetskrav ställts på beståndsdelarna avloppsslam och flygaska, som kan vara lämpliga i FSA. I Figur 1 avtar lämpligheten hos FSA som tätskikt mot ljusare ton. FSA40 står för 40 % tillsats av TS flygaska, FSA60 för 60 % av TS tillsats flygaska osv.



Figur 1. Undersökta FSA-materials lämplighet ur permeabilitets-, hållfast- och beständighets-synpunkt.

Figure 1. Suitability of tested FSA-materials according to permeability, un-drained shear strength and long term durability.

Några viktiga faktorer är de ingående materialens TS-halt (eller vattenkvot), flygaskans pH och CaO-halt. Vid utläggningen av FSA som tätskikt bör omgivande skikt ha hög vattenhållande kapacitet, detta för att skydda tätskiktet från uttorkning. Dränerings- och skyddsskikten som överlagrar tätskiktet bör ha en funktion att ta bort överflödigt vatten

och att samtidigt bibehålla en fuktig miljö som skyddar mot syrenedträngning till tätskiktet. Vidare visar utredningen att vid blandning i fält bör en skruvblandare nyttjas som kan producera FSA kontinuerligt.

Den kostnadsbedömning som görs i rapporten visar att kostnaden blir i samma storleksordning som för en traditionell lösning om materialkostnaden sätts till noll. Om kostnaden för kvittblivning för slam och aska tas med i jämförelsen, kan i princip hela arbets- och materialkostnaden för täckningen bekostas av den besparing som man gör med att använda slam och aska som konstruktionsmaterial.

Undersökningen indikerar att erhållna resultat är allmängiltiga, dvs. gäller flygaskor från biobränsle och rötat avloppsslam, förutsatt att ingående material klarar uppsatta kvalitetskrav. FSA-materialets egenskaper skall alltid verifieras i laboratorium före fältarbete.

De föreslagna pilot-/fältundersökningarna kommer att ge viktiga drifttekniska erfarenheter vad gäller hantering och blandning av flygaska och avloppsslam. Försöksytorna som planeras utföras på Dragmossens deponi, Älvkarleby, följs upp under minst ett år ur tekniska och miljötekniska aspekter, där sättningar, täthet (genomsläpplighet av vatten), skjuvhållfasthet, biologisk aktivitet etc. följs upp för att verifiera erhållna resultat i laboratorium. Ytterligare laboratorieförsök föreslås också vad gäller utredning av långtidsstabiliteten hos FSA-materialet i tätskiktet.

Summary

The aim of this project was to develop a new liner material based on bio fly ash and sewage sludge and to plan for a pilot test with this new liner (FSA) on a landfill. The investigation shows that FSA has potential to fulfill technical and economical requirements as well as requirements of durability. This project constitutes part of a larger one, where the overall aim is to collect information/experience of FSA as a liner for presentation in a handbook.

During the conducted laboratory work recipes for mixture proportions for application as landfill liner were controlled according to technical end environmental aspects. A recipe for FSA material has been prepared, which has permeability values lower than 10^{-9} m/s. This low permeability can assure a low percolation of precipitated water through the landfill liner, < 50 litre / m^2 , year. FSA has sufficient un-drained shear strength and has an estimated slow bio degradation (long term durability), which can assure a long duration period. Based on results from tests conducted in this and other projects, where FSA materials were tested, necessary quality verifications has been conducted for the ingredients bio-fly-ash and sewage sludge and for the FSA-mixture. In Figure 1 the FSA materials potential as liner increases with darker colour (bordering black). FSA40 is a mixture of 40 % dry solid (DS) fly ash and 60 % DS sewage sludge, and FSA60 is a mixture containing 60 % DS fly ash and 40 % DS sewage sludge and so on.

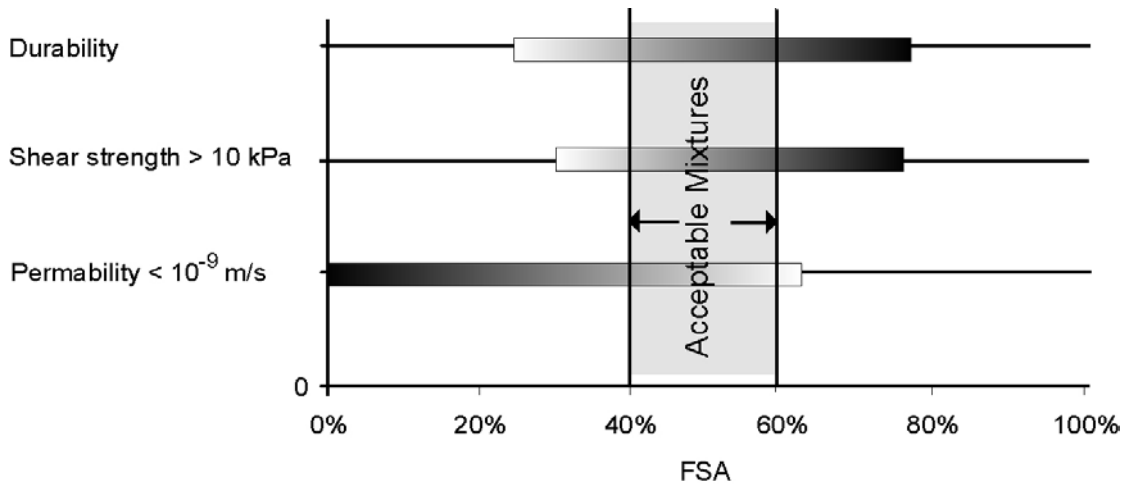


Figure 1. Acceptable mixtures of tested FSA-materials according to permeability, un-drained shear strength and long term durability.

Some important parameters of the ingredient materials are DS content (or water content) and pH and CaO content of the fly ash. A liner made of FSA should have surrounding layers of high water containing capacity in order to protect the FSA-liner from drying. The drainage and oxidation protection layers have to transport precipitated water as well as contain sufficient pore water in order to be an oxygen barrier above the liner (FSA). In addition, the investigation shows that a paddle blender should be used in order to guarantee a continuous FSA-mixture.

The evaluation made in this report shows that FSA liner has about the same price as traditional liner materials (with bentonite mats etc.) if material costs are not accounted for. However, when the non-payment of waste taxes and deposition costs are accounted for, fly ash and sewage sludge can contribute to cover work and material costs of the liner with FSA.

The investigation indicates that the results presented in this report are universal for FSA. This is valid as far as certain qualities of the fly ash and the sewage sludge are granted. Still, FSA with new fly-ash material and/or sewage sludge should be investigated in laboratories before using it at a field application.

The proposed pilot/field investigation will provide important management, operational and working information on the FSA material as a liner. According to plans, the test site will be located at Dragmossen landfill site, Älvkarleby, Sweden. The test site will be controlled at least for a one-year period. Geotechnical and environmental aspects, as settlement, densities, permeability, un-drained shear strength, biological activity etc. will be followed up. New laboratory tests on bio degradation (long term durability) of the proposed FSA liner will be conducted as well.

Förord

I flera olika utredningar och examensarbeten har flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) undersökts av Scandiaconsult Sverige AB (SCC) på uppdrag av bl.a. Stockholm Vatten AB (SVAB). Föreliggande projekt utfördes i samarbete mellan SVAB och SCC i syfte att ta fram *underlag för genomförande av pilotförsök med en blandning av stabiliserat avloppsslam och flygaska som tätskiktmaterial*.

Arbetet genomfördes av en grupp med kompetens inom miljögeoteknik, ekonomi och juridik av Josef Mácsik, Yvonne Rogbeck, Olof Uhlander, Bo Svedberg och Margareta Mizgalewicz vid Scandiaconsult Sverige AB och Agnes Mossakowska (projektledare), Bengt Göran Hellström och Birgit Öster vid Stockholm Vatten AB. Laboratoriearbeten och sammanställning av laboratorierapporten utfördes av Stina Lenströmer (SCC). Laboratorieundersökningen utfördes vid Luleå tekniska universitets geotekniska laboratorium. Litteraturundersökningen utfördes av Helena Palmqvist, Luleå tekniska universitet.

Projektet har finansierats av Svenskt Vatten (VA-Forsk), Värmeforsk, Ångpanneföreningens Forskningsstiftelse, Svenska Renhållningsverksföreningen (RVF), SVAB och SCC. Projektets referensgrupp och styrgrupp bestod av Claes Ribbing (Värmeforsk), Thomas Hellström (VA-Forsk), Magnus Berg (ÅF), Lars Dalgren (Fortum Värme), Thomas Rihm (RVF), Caroline Eklund (Econova) och Karl-Erik Isaksson (Boliden) Bengt Göran Hellström (SVAB).

Innehållsförteckning

1	BAKGRUND	1
2	INLEDNING	2
3	SYFTE	3
3.1	ÖVERGRIPANDE SYFTE	3
3.2	PROJEKTETS SYFTE	3
4	RESULTATREDOVISNING	5
4.1	ALLMÄNT	5
4.2	FRAMTAGNING AV RECEPT	6
4.3	FÖRSLAG PÅ TÄTSKIKTSKONSTRUKTIONER	12
5	KVALITETSASPEKTER	14
5.1	INGÅENDE MATERIAL	14
5.2	BLANDNINGEN FSA	16
6	UTFORMNING AV PILOTOBJEKT	17
6.1	ALLMÄNT	17
6.2	PROVYTOR, MÄNGDER AVLOPPSSLAM OCH FLYGASKA	18
6.3	TEKNIK OCH MILJÖ	21
7	PROJEKTPLANERING	24
7.1	ALLMÄNT	24
7.2	FÖRTEST	24
7.3	UTLÄGGNINGEN	25
8	LÄMPLIGA DEPONIER	26
8.1	INVENTERING	26
8.2	LOKALA FÖRUTSÄTTNINGAR	27
9	TILLVERKNING	28
9.1	ALLMÄNT	28
9.2	TRANSPORT AV RÅVAROR	28
9.3	BLANDNINGSPROCESSEN	28
9.4	KONTINUERLIG BLANDARE (LUXTABLANDARE) – UTRUSTNING OCH EKONOMI	29
9.5	SATSBLANDARE – UTRUSTNING OCH EKONOMI	30
9.6	REKOMMENDATIONER	31
9.7	APPLICERING PÅ DEPONIN	31
9.8	ENTREPRENAD	32
10	TILLVERKNING	34
10.1	EKONOMI	34
10.2	JURIDIK	36
11	SLUTSATSER	38
12	LITTERATURREFERENSER	40

Bilagor

- A AVLOPPSSLAM SOM LINERMATERIAL – LABORATORIERAPPORT**
- B AVLOPPSSLAM SOM LINERMATERIAL – LABORATORIEFÖRSÖK: AVLOPPSSLAM STABILISERAT MED FLYGASKA**

1 Bakgrund

För att utveckla ett hållbart samhälle på lång sikt erfordras ständigt ny kunskap. Det finns ett tydligt behov av tekniska och praktiska lösningar som syftar till att begränsa uppkomsten av avfall och förbättra hanteringen av det avfall och de potentiella resurser som därmed uppkommer i vårt samhälle. Den nya kunskapen skall svara på hur vi ska:

- Minska resursbehovet för att skapa en viss produkt eller åstadkomma en viss funktion.
- Återanvända material.
- Återvinna material i andra processer för att minska åtgången av andra råvaror och resurser.
- Hantera material, som trots insatser för att optimera resurs- och råvaruförbrukningen inte kan återinföras i kretsloppet, på bästa möjliga sätt.

Behovet av tätskiktsmaterial blir stort de närmaste åren i Sverige. Bara i Stockholmsområdet kommer de närmaste 5–10 åren ca 100 ha att sluttäckas. Användning av avloppsslam och bioflygaska som råvara för tillverkning av tätskikt på deponier har i flertalet utredningar bedömts ha stor potential ur tekniskt, miljömässigt och inte minst ett ekonomiskt perspektiv. Nyttjare/avnämare av denna produkt är t.ex. kommuner, entreprenörer, deponiägare m.fl. som vid en avsättning på deponier också förmodas få en "miljöpoltisk" gångbar lösning. I denna rapport har enbart flygaskor från biobränsle undersökts.

Stockholm Vatten AB och Scandiaconsult Sverige AB har under de senaste två åren genomfört förstudie, fördjupad undersökning och ett examensarbete beträffande möjligheten att nyttja stabiliserat avloppsslam och flygaska i mark- och anläggningsbyggande. Studierna som omfattade såväl miljömässiga, tekniska och ekonomiska aspekter visar att ett stabiliserat avloppsslam med tillsats av flygaska har en god teknisk och ekonomisk potential för att kunna nyttjas som tätskiktsmaterial.

Avloppsslam är en restprodukt som är lättillgänglig över hela landet. Förbud mot deponering av såväl brännbart som organiskt avfall, samt deponi- och förbränningsskatt kommer att gynna utvecklingen av alternativa avsättningar för både avloppsslam och flygaska, däribland som tätskiktsmaterial. Producenter av avloppsslam och flygaska, kommuner, deponiägare, konsulter och entreprenörer är målgruppen som kommer att ha direkt nytta av detta projektarbete.

2 Inledning

De hittills genomförda utredningarna visar på följande kunskapsläge i frågan:

Av litteraturstudier, som bl.a. gjorts av SVAB/SCC och Geo Innova AB, framgår att erfarenheterna av avloppsslam som tätskiktsmaterial är begränsade såväl i Sverige som i andra länder. I syfte att öka kunskapsnivån, vad gäller användning av avloppsslam i tätskikt, har två forskningsprojekt och ett examensarbete utförts av SVAB/SCC under 2000/2001 i en första etapp. Nedan redogörs i korta ordalag för dagens kunskap map. tekniska, miljömässiga och ekonomiska aspekter (för utförligare bakgrund se [2] och [3]).

Teknik

Avloppsslam har låg permeabilitet, låg hållfasthet och hög vattenkvot. Därmed är avloppsslam ett besvärligt material ur hanteringssynpunkt. Undersökningar som redovisas i Stockholm Vattens rapporter nr [2] och [3] från 2001 visar att avloppsslammets geotekniska egenskaper kan förbättras genom inblandning av flygaska. Genom att dosera mängden flygaska som tillsätts avloppsslammet kan blandningens tekniska egenskaper finjusteras vad gäller hållfasthet och permeabilitet, två normgivande egenskaper hos blandningen i applikation som tätskiktsmaterial.

Miljö

Tidigare arbeten visar att kunskapsunderlaget avseende nedbrytning är begränsat. Vid en stabilisering med flygaska kan en förväntad pH-ökning skapa förhållanden som hämmar nedbrytning. Här erfordras ytterliggare studier företrädesvis i fält, kopplade till studier av materialets tekniska egenskaper. Lakbarheten av olika ämnen är en viktig aspekt som bör studeras i fältskala. Utlakningen begränsas bl.a. av linermaterialets låga permeabilitet. Kontroll av de ingående ämnen och dess halter är en viktig miljöaspekt.

Ekonomi

En inventering av behovet av tätskiktsmaterial vid tio deponier i Stockholmsområdet har utförts. Den visar att behovet är stort, de närmaste 5–10 åren skall drygt 100 ha sluttäckas bara i Stockholm. Omfattningen i Sverige har ej bedömts, men torde vara betydande. Dessutom har en kostnadsjämförelse gjorts mellan traditionell sluttäckning och sluttäckning med behandlat slam om tätskikt, se Stockholm Vattens rapporter nr 1 [2] och 21 [3] från 2001. Jämförelsen visar att kostnadsintervallet för de båda alternativen är av samma storleksordning utan att hänsyn tas till kostnad för kvittblivning eller deponiskatt. En lösning med stabiliserat avloppsslam och flygaska kan förväntas vara den kostnadseffektivaste lösningen i flera fall.

3 Syfte

3.1 Övergripande syfte

Det övergripande syftet med projektet är att utifrån nu rådande miljö kvalitets- och återvinningsmål utveckla ett tätskiktsmaterial baserat på avloppsslam. Projektet har delats in i mätbara delmål:

- att inventera möjligheten att nyttja avloppsslam och utreda dess tillämplighet. Detta delmål har uppnåtts under 2001, se Stockholm Vattens rapporter nr 1 och 21 från 2001.
- *att ta fram utförandebeskrivning för att kunna utföra fältarbete med stabiliserat avloppsslam som tätskiktsmaterial på deponi. Detta arbete avses slutföras under våren 2003. Projektet startade under november 2002 och avslutas före maj 2003.*
- att utföra prov-/pilotobjekt med avloppsslam med flygaska som tätskikt. Enligt en preliminär planering påbörjas arbetet under hösten 2003.
- att ta fram en handbok med beskrivning av undersökningsmetodik för att varudeklarerat avloppsslam under hösten 2004. Applikationsinriktade varudeklarationer för tätskiktsapplikation bör finnas klara 2003/2004
- att genomföra sluttäckning med stabiliserat avloppsslam och flygaska som tätskiktsmaterial på en deponi under 2004.
- att resultaten sprids till målgrupper genom rapporter och seminarier. Andra slammaterial kan bli godkända efter att dessa undersöks enligt den handbok som tas fram.

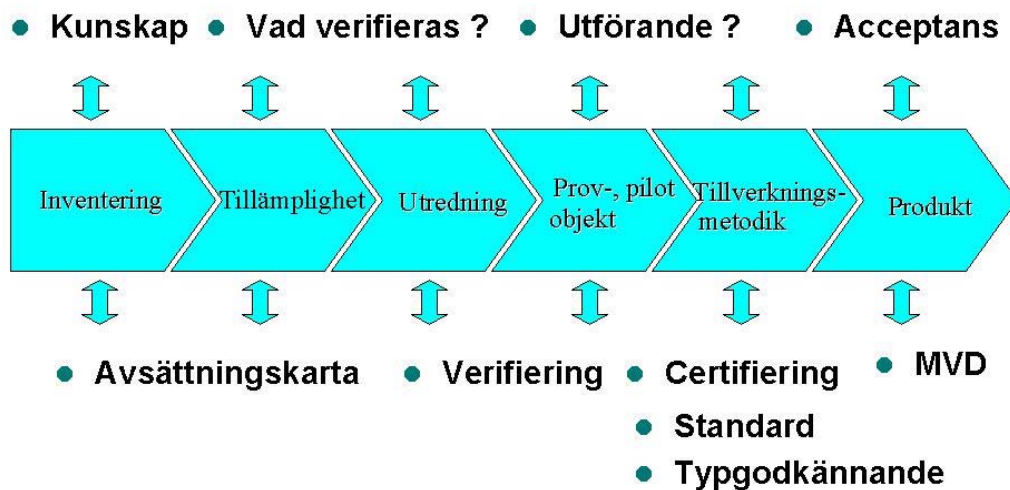
3.2 Projektets syfte

Projektmålet är att förbereda pilot/fältundersökningen genom att:

- ta fram slutligt recept för tätskikt
- utvärdera ekonomiska och juridiska effekter för pilotobjektet gällande användning av det framtagna tätskiktsmaterialet
- föreslå projektorganisation samt projektplan för ett pilotförsök
- beskriva hur arbetet med tätskikt i pilotskala skall drivas.

Det nu pågående projektet har initierats utifrån resultat från två tidigare projekt, en inventering (SVAB 2001a) [2] och en förstudie (SVAB 2001b) [3], som båda utförts av SVAB och SCC i samverkan. I dessa båda projekt har frågeställningar avseende teknik, miljö, ekonomi och juridik behandlats. Dessutom har två examensarbeten utförts på temat i SVAB:s och SCC:s regi, Cronquist 2002 [5] och Lenströmer 2002 [6]. Vi känner till ett näraliggande projekt som har bedrivits av Geo Innova och som finansierats av RFV och VA-Forsk, (RVF-utveckling 2001 [4] och 2002). Geo Innovas rapport bekräftar slutsatser presenterade i våra tidigare publicerade rapporter, [2] och [3]. De hittills utförda arbetena, med anslutning till figur 2, har omfattat inventering, tillämplighet och utredning. Det pågående projektet avser förberedelser för pilotstudie på en deponi.

Materialprocessen



Figur 2. Stegvis process från idé till färdig produkt, efter Mácsik och Svedberg (2000) [1]

Figure 2. Stepwise process from idea to product, after Mácsik and Svedberg (2000)

4 Resultatredovisning

4.1 Allmänt

Det huvudskaliga skälet till att sluttäcka avfall är att begränsa spridningen av skadliga ämnen från avfallet till omgivningen (NV-rapport 4474) [12]. Omfattningen av spridningen av vattenlösliga ämnen från avfallet begränsas genom att minska omsättningen av vatten. Täckningens främsta uppgift är därmed att begränsa andelen av nederbörden som rinner igenom avfallet. Sluttäckningen som utgör denna vattenbarriär kan delas in i två funktionella grupper, tätskikt och skyddsskikt, figur 3. *Skyddsskiktets* funktion är att skydda underliggande material mot erosion, frostspåverkan, uttorkning och rotpenetration. *Tätskiktet* är den barriär i deponin som skall hindra vatten att ta sig in i deponin och bilda lakvatten, samt hindra uttransport av gas och partiklar (NV 4474) [12]. Tätskiktet kan i sin tur delas in i två skikt, dränskikt och tätskikt. Dränskiktets funktion är att transportera undan vatten från deponin och tätskiktet ska genom sin låga permeabilitet utgöra ett hinder för vatteninströmning in i avfallet.

<i>Utan specificering</i>	<i>Exempel på specificering</i>
<i>skyddsskikt</i>	<i>växtskikt</i>
	<i>erosionsskikt</i>
	<i>rotskikt</i>
	<i>isolerskikt</i>
	<i>rotpärr</i>
<i>tätskikt</i>	<i>filterskikt</i>
	<i>dränskikt</i>
	<i>tätskikt</i>
	<i>kapillärbrytande skikt</i>

Figur 3. Skydds och tätskikt, efter NV 4474.

Figure 3. Protection and impermeable layers.

I beskrivningen av pilotförsöken läggs tyngdpunkten på tätskiktets konstruktionens tätskikt och dess funktion. Övriga skikt har därmed inte studerats och undersökts i samma utsträckning som tätskiktet.

Resultaten från tidigare utförda laboratorieundersökningar visar att stabiliserat avloppsslam med tillsats av flygaska har egenskaper som behövs för att kombinera låg permeabilitet med ökad hållfasthet. Därmed kan FSA passa bra som tätskikt. För att kunna nyttja FSA i en tätskiktets konstruktion bör blandningsförhållandet mellan flygaska och avloppsslam optimeras med avseende på FSA-materialets täthet, skjuvhållfasthet och beständighet. Syftet med laboratorieundersökningen var:

- att hitta parametrar med vars hjälp råmaterialens (avloppsslammets och flygaskans) kvalitet och lämplighet enkelt kan kontrolleras
- att hitta/bestämma recept och andel avloppsslam respektive flygaska, uttryckt i % av torrsubstans (TS), som är lämplig i en tätskiktets konstruktion.

Tätskiktets beständighet mot nedbrytning är en annan viktig parameter i och med att tätskiktets funktion, täthet, ska bestå under en lång period. Beständighetsfrågan utreddes

genom litteraturstudie, där vinklingen på undersökningsmetodiken var hur mycket flygaska kan tillsättas avloppsslammaterial utan att negativt påverka nedbrytningen (komposteringen).

4.2 Framtagning av recept

4.2.1 Bakgrund

Vid tidigare arbeten, Stockholm Vattens rapporter nr 1 och 2 från 2001, har ett antal intressanta blandningsförhållanden kommit fram. Dessa tidigare undersökningar hade ”skanningskaraktär”, dvs. ett stort antal olika blandningsserier har prövats. Inför fältarbetet är det viktigt att visa hur erhållna resultat på hållfasthet, permeabilitet etc. varierar och hur inhomogenitet i vattenkvot påverkar erhållna resultat. Resultaten i sin helhet redovisas i bilaga A. Nedan redogörs en sammanställning av erhållna resultat.

4.2.2 Laboratieförsök

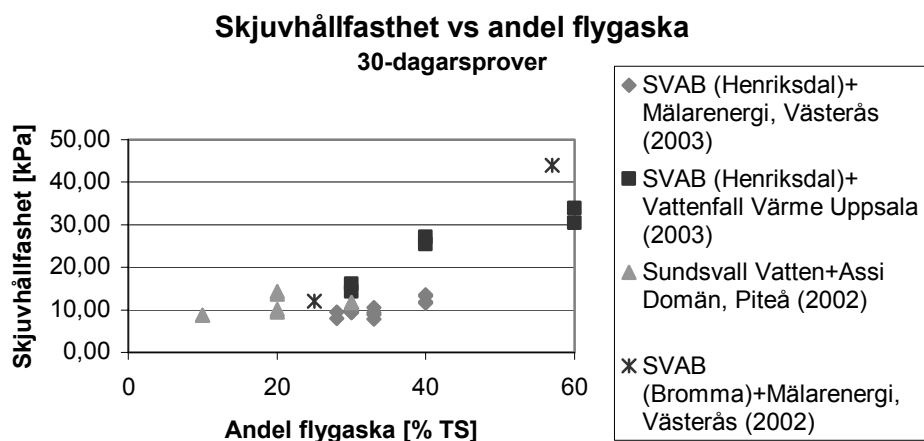
Vid laboratieförsöken användes avloppsslam från Henriksdal med flygaskor (biobränsle), från Mälarenergi i Västerås och från Vattenfall Värme i Uppsala, som tillsatsmedel för att öka TS-halten och därmed hållfastheten. Resultaten redovisas i bilagorna 1 och 2. Båda askorna kommer från biobränsleanläggningar, där det främsta bränslet är torv och trä.

- Sydkraft Mälarvärme AB, Åbyverket: bränslet är 80 viktprocent torv och 20 viktprocent sågspån från trä. Panntypen är CFB.
- Vattenfall Värme Uppsala: bränslet är torv och trä. Panntypen är pulver

Vid laboratieförsöken har flygaskorna varit torra, dvs. haft en TS-halt på 100 %. I vanliga fall befuktas flygaskorna, så att TS-halten blir ca 91 % (w=10 %) för att undvika damning vid förvaring. Enstaka prover har tillverkats med befuktad flygaska (w =10 %).

Blandningsförhållandena på proverna som har undersökts har varit mellan 30/70 och 40/60 (TS) för flygaska/avloppsslam. Även försök på blandningar med 60/40 har utförts. Det senare blandningsförhållandet är främst tänkt att användas som avjämnings- och oxidationsskyddsskikt. Notera att inblandningsförhållandet avser TS halten och inte de ingående materialens våta vikt eller skrymvolym. Hädanefter benämns *Flygaska Stabiliserat Avloppsslam*, FSA. FSA 30 innebär att blandningen består av 30 % (TS) flygaska osv.

Det är viktigt att notera att TS-halten på avloppsslammet vid laboratieförsöken låg på ca 24–25 %. TS-halterna på FSA 30 var ca 32–34 % medan TS-halten på FSA 40 var ca 36–37 %. Skrymdensiteten på blandningarna ligger mellan 1,0–1,2 ton/m³. Densiteten ökar något med ökad mängd flygaska inblandat.



Figur 4. Skjuvhållfasthet vs. andel flygaska.

Figure 4. Un-drained shear strength vs. amount of fly ash

Det är av intresse att utreda hur hållfastheten och permeabiliteten utvecklas med tiden efter tillverkning, därför har försök utförts på prover en dag efter tillverkning och 25–30 dagar efter tillverkning. Proverna förvarades vid en temperatur på 8–10°C. De prover som härdade 25–30 dagar utsattes för en belastning motsvarande ett moränlager på ca 1–1,5 meter (20 kPa). FSA-materialens skjuvhållfasthet efter 30 dagar redovisas i figur 4. Efter 30 dygns konsolidering hade proverna komprimerats upp till ca 10 %. De flesta prover komprimerades mellan 4,5–7 %, figur 5 och 6.

De undersökta blandningarna uppvisar alla en mycket låg permeabilitet, $< 10^{-9}$ m/s, som med god marginal kan klara krav på tätskikt för deponier med icke farligt avfall. Det har visat sig att permeabiliteten inte ökar nämnvärt med ökad mängd flygaska inblandat i avloppsslammet, när det gäller slam från Henriksdal och flygaska från Mälarenergi och Vattenfall, vid mängder mellan ca 20–60 % (TS), se figur 3. Inblandning av 60 % (TS) flygaska ger en permeabilitet som är ca $3 \cdot 10^{-10}$ m/s.

Skjuvhållfastheten på FSA 30 efter ett dygn var 5–6 kPa, efter 30 dygn hade den ökat till 9–10 kPa, dvs. en ökning på nästan 50 % för blandningar med flygaska från Mälarenergi. Andra försök, där avloppsslammets TS har höjts till 32,9 % visar på skjuvhållfasthet runt 20 kPa efter 30 dagar för FSA30. Försök med Vattenfalls flygaska visar att hållfastheten för FSA 40 och FSA60 och ger ca 30 kPa efter 30 dagar. I det senare försöket har avloppsslam med TS-halt på ca 24–25 % nyttjats, figur 4.

Vid tidigare laborieförsök har det antytts att vid höga temperaturer (rumstemperaturer) pågår biologisk aktivitet i slamblandningar. Den biologiska aktiviteten medför att slammets luckras upp vilket kan medföra att permeabiliteten ökar. För att verifiera detta tillverkades prover med FSA0 och FSA 28 som förvarades vid en temperatur på 15°C och belastades med en vikt som motsvarar ca 1 meter morän (20 kPa) under 30 dagar. Kompressionen mättes kontinuerligt över tiden. FSA0 (endast avloppsslam, ingen flygaskatillsats) uppvisade svällningar, vilket tyder på att biologisk aktivitet har pågått, se figur 5 och 6.

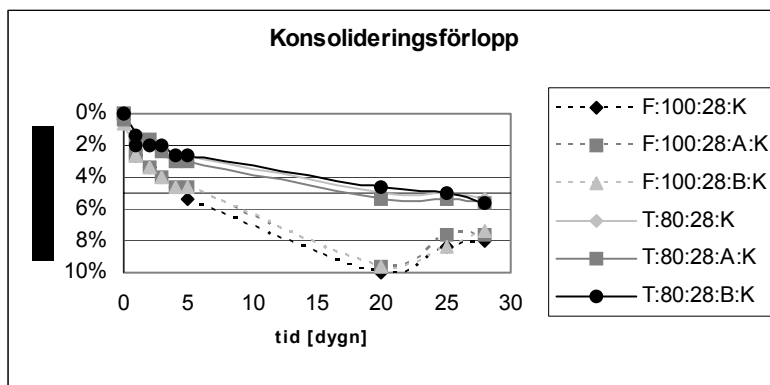
Det andra provet (FSA28) som förvarades vid samma temperatur har inte svällt, utan istället komprimerats. Ask tillsatsen höjer pH, vilket hämmar den biologiska aktiviteten.

Vad som är av intresse är att undersöka materialets hanterbarhet vid fältförhållanden, dvs. hur det går i praktiken att lägga ut materialet, packa det osv. Laboratorieförsöken visar att en lämplig blandning mellan avloppsslam och flygaska är FSA 40 – FSA60, dvs. tillsatsen av flygaska är mellan 40 och 60 % av TS. Avloppsslammets TS-halt bör ligga >30 %. Nästa steg är att gå vidare med dessa blandningar i ett pilotförsök för att kontrollera det framtagna barriärmaterialets tekniska och miljömässiga egenskaper. Fältförsöken kommer även att ge viktig information om hur det storskaliga arbetet ska utföras.

4.2.3 Beständighet

Arbeten som har utförts av Geo Innova AB (2002) visar att kalkat slam som har legat deponerat inte har påverkats nämnvärt av nedbrytning. Undersökningen tyder på att ytskiktet och bottenkiktet har påverkats något. Materialets höga pH och låga permeabilitet medför att nedbrytning sker långsamt. Motsvarande resultat har uppnåtts vid laboratorieförsök, där färskt avloppsslam och färskt avloppsslam med inblandning av färsk flygaska har lagrats. Tillsatsen av flygaska var 50 viktsprocent av våtvikt, vilket i det aktuella fallet motsvarar ca 75 % flygaska och 25 % avloppsslam i TS vikt. I prov utan tillsats av flygaska är den mikrobiologiska aktiviteten markant, stora mängder metan och koldioxid bildas, försöken pågick i ca 80 dagar. Motsvarande prov med tillsats av flygaska visar inga tecken på mikrobiologisk aktivitet.

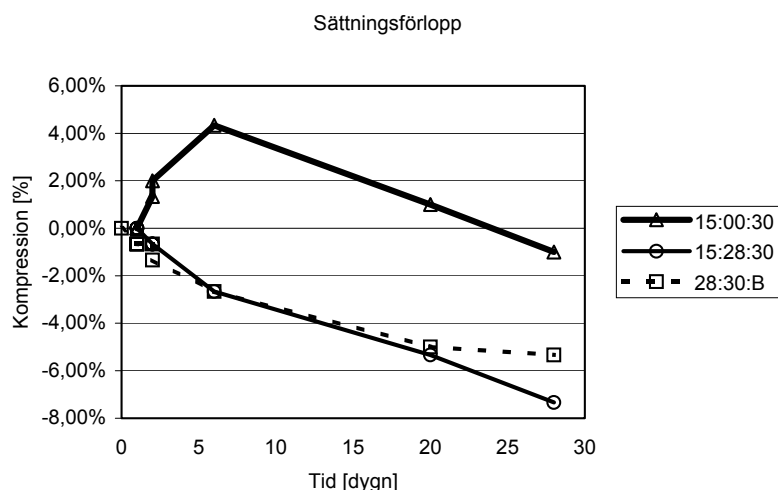
Tidigare undersökningar där avloppsslam från Sundsvall Vatten AB, Tivoliverket (T) och Fillanverket (F), har undersökts visar att utan tillsats av flygaska till avloppsslam är den biologiska aktiviteten förhållandevis liten vid ca 8°C, se figur 5. Proverna förvarades i kylskåp vid ca 7°C. Efter ca 20 dagar höjdes temperaturen till rumstemperatur, ca 17°C under några dygn. Därefter återställdes den ursprungliga temperaturen på 7 °C. Resultaten visar, figur 6, att det sker en svällning i prov utan tillsats av flygaska medan 20 % tillsats av flygaska minskar denna biologiska aktivitet, Lenströmer, (2002). Av figuren framgår att sättningen avstannar vid >20 % tillsats av flygaska. Avloppsslam är 100 och 80 % av TS, dvs. 0 % och 20 % av TS är tillsatsen av flygaska, se figur 5.



Figur 5. Sättningsförlopp för de prover som har konsoliderat under härdningstiden (28 dagar), Lenströmer 2002.

Figure 5. Compression of samples during a 28 day curing period.

Motsvarande försök har utförts med Stockholm Vatten AB:s avloppsslam och flygaska från Mälarenergi i Västerås. Resultaten redovisas i bilaga A och i figur 5. Proverna förvarades vid 8°C respektive 15°C. Som det framgår av figuren sker det en svällning (jäsning) i det prov som består av endast avloppsslam, medan i det prov som har en tillsats av flygaska (från Mälarenergi) motsvarande 30 % av avloppsslammets TS, påverkas ej av svällning (mikrobiologisk aktivitet). Prov 15:00:30 och 15:28:30 (temperatur: TS procent flygaska:härdningstid) förvarades vid 15°C under 30 dagar, figur 6. Tillsatsen av flygaska var 0 respektive 28 % av TS. Det tredje provet förvarades vid 8°C under 30 dagar och hade flygaskatillsats motsvarande 28 % av TS.



Figur 6. Laboratorieundersökning av kompression (sättning) hos avloppsslam från Sundsvall Vatten AB.

Figure 6. Result from compression tests conducted on sewage sludge from Sundsvall Vatten AB.

De blandningar som har studerats vid de laboratorieförsök som har utförts i detta projekt ligger mellan 30–60 % flygaska i TS vikt. Geo Innova AB:s blandning, med 75 % TS-tillsats av flygaska, ligger utanför de blandningar som bedöms vara aktuella vid sluttäckning av deponier (i tätskikt). Med så mycket tillsats av flygaska riskeras att materialblandningens permeabilitet blir högre än 10^{-9} m/s, vilket i sin tur kan försämra tätskiktets konstruktionens genomsläpplighet.

Litteraturundersökningen, utförd av LTU (bilaga C), indikerar att vid kompostering, aerob nedbrytning, finns det en brytgräns där den mikrobiologiska aktiviteten hämmas/avbryts vid tillsats av flygaska. Denna brytgräns ligger på ca 25–35 % tillsats av flygaska. Vid 35 % hämmas den biologiska aktiviteten.

Beständigheten är hos avloppsslam i applikationen som tätskikt på deponi bedöms i LTU rapporten enligt nedan:

- Man har i många fall undersökt hur effektiv kompostering av slam (som stabiliseringsmetod eller för jordförbättring) blir trots att man blandar aska i slammet. Motivet till askinblandningen verkar oftast vara att hygienisera och stabilisera slammet. Syftet med undersökningarna har varit att hitta största möjliga mängd aska som kan blandas in utan att hämma den mikrobiella aktiviteten. En brytgräns för detta verkar gå vid 25–35 viktsprocent. Vid 35 % inblandning verkar en signifikant hämning av den mikrobiologiska aktiviteten inträffa.
- Viss fokusering har gjorts på termofila bakterier eftersom de är de mest intressanta vid kompostering – dessa är inte lika intressanta för applikationen som tätskikt. De flesta publikationer som refereras i bilaga C handlar om en strävan efter en bibehållen mikrobiologisk aktivitet, medan fokus i det nu aktuella projektet handlar om att hitta en gräns där mikrobiologin och nedbrytningen av det organiska materialet avklingar och slammet stabiliseras.

Vidare konstateras det i bilaga C att den mikrobiella aktiviteten som ombesörjer nedbrytning av organiskt material i slam och ask-/slamblandningar hämmas tydligt av:

- de höga saltkoncentrationer som askan medför
- de höga pH-värden som också medföljer askinblandningen

När slam blandats med högre procenthalter aska minskar mobiliteten hos närsalterna vilket delvis innebär att kemiska förändringar i blandningens innehållsmässigt minskar och att tillgången på närsalter för mikroorganismer minskar. Detta torde i sin tur innebära en stabilisering av slammet.

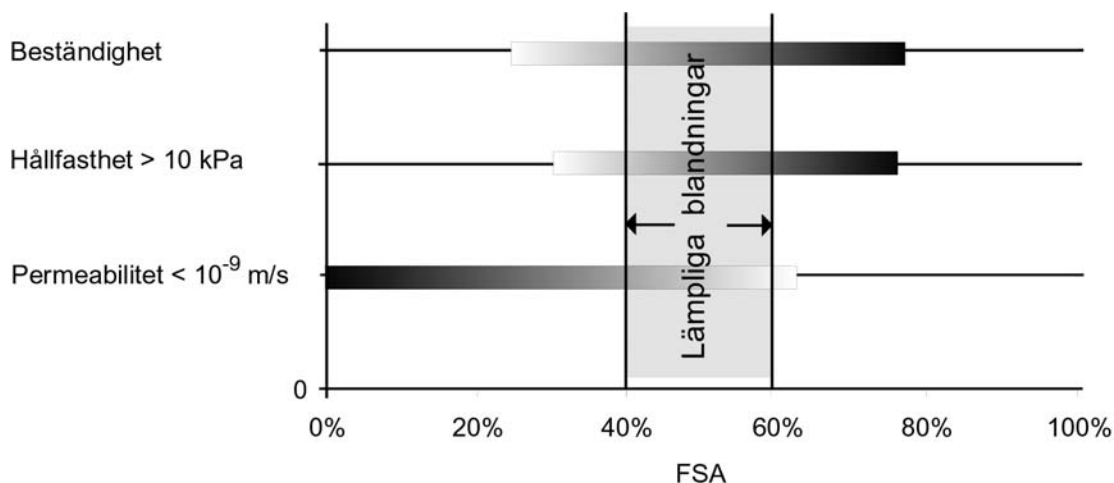
Inom FACE-projektet (Värmeforsk) har konstaterats att flygaskornas pH och CaO-halt kan variera. Ur beständighetssynpunkt är det därmed viktigt att flygaska tillsätts i tillräckligt stor mängd för att hämma den mikrobiologiska aktiviteten. Eftersom olika flygaskor har olika halt av CaO är det viktigt att undersöka flygaskan för att försäkra sig om FSA-materialets beständighet.

4.2.4 Slutsatser – Laboratieförsök och litteraturundersökning

I undersökningen ingick blandningar mellan två bioflygaskor och ett avloppsslam. Flygaskorna som nyttjades var från Mälarenergi i Västerås och Vattenfall Värme i Uppsala. Blandningarnas innehåll av flygaska var 30, 40 och 60 % av avloppsslammets TS innehåll. Tre styrande parametrar:

1. FSA-materialets täthet
2. FSA-materialets hållfasthet
3. FSA-materialets beständighet

var normgivande för de recept som togs fram för tätskiktsmaterialet, se figur 7, där lämpligheten avtar mot ljusare ton. Hållfastheten som redovisas i figuren avser värden från konförsök där ingen reduktion avseende den organiska halten har gjorts.



Figur 7. Blandningarnas lämplighet ur permeabilitets-, hållfast- och beständighetssynpunkt

Figure 7. Suitability of tested FSA-materials according to permeability, un-drained shear strength and long term durability.

Avloppsslammet uppvisar permeabilitet vid laboratieförsök som ligger >10–100 ggr under 10^{-9} m/s. Därmed antas avloppsslam kunna uppfylla de funktionskrav som ställs på tätskikt på ”deponier med icke farligt avfall” dvs. att genomsläppligheten är <50 l/m² och år. Avloppsslammet har dock en låg hållfasthet och är mycket sättningsbenägen. För att höja hållfastheten kan flygaska tillsättas i olika proportioner. Undersökningen visar att avloppsslammets TS-halt bör vara >30 % och tillsatsen flygaska >40 % av avloppsslammets TS-halt för bästa effekt. Högre tillsats av flygaska än 60 % av blandningens TS medför att blandningens permeabilitet riskerar att bli högre än 10^{-9} m/s. Ur beständighetssynpunkt medför tillsatsen av flygaska att pH höjs i slammet till värden >10 och den biologiska aktiviteten i slammet avstannar. Denna effekt kommer att bestå så länge askans pH-höjande effekt kvarstår. En nedre gräns på tillsats av flygaska kan sättas på ca 20 % flygaska. Laboratorieresultaten visar att blandningarnas hållfasthet efter 1 dygn är låg även vid ca 60 % TS tillsats av flygaska vid TS-halt lika med ca 24 % hos

avloppsslammet. Undersökningen visar dock att hållfastheten ökar med tiden och att under de första 30 dygnen vid en belastning med motsvarande 1–1,5 m skyddsskikt (20 kPa). Hållfastheten efter 1 dygn kan höjas om avloppsslammets TS-halt höjs till värden ≥ 30 %.

Följande kriterier har föreslagits för tätskikt inför pilotförsöket:

- a. Avloppsslammets TS-halt på ca 30–33 % (w <233 %). Undersökningarna visar att TS-halt på 24–27 % ger FSA-material med låg skjuvhållfasthet. Högre TS-halt än ca 33 % har ej undersökts. Låga skjuvhållfasthetsvärden kan orsaka stabilitetsproblem vid större släntlutningar efter att drän- och skyddsskikten har installerats.
- b. Flygaskatillsats mellan 30 och 60 % av TS. Beroende på avloppsslammets TS-halt och släntlutningen kan FSA-materialets täthet och skjuvhållfasthet anpassas för att klara de funktionskrav som ställs på tätskikt. Detta sker med mer eller mindre tillsats av flygaska till blandningen.
- c. Flygaskans kornstorlekssammansättning bör ligga i sandfraktion eller finare. Grövre fraktion kan ge förhöjd permeabilitet hos FSA-materialet.
- d. Flygaskans TS bör vara >91 % (w <10 %) och flygaskan bör ej befuktas mer än ca 24 timmar före blandning med avloppsslam. Tillsats av vatten till en färsk/torr flygaska startar härdningsprocessen i askan. Härdningen avtar med tiden. Eftersom härdningen medför att FSA-materialets hållfasthet ökar bör flygaskan vara så torr som möjligt och eventuell bevattning bör ej ske mer än 24 timmar före blandning.
- e. Flygaskans pH bör vara >12. Högt pH i FSA medför att den biologiska aktiviteten i FSA avstannar.
- f. CaO-halten >3 %[‡], ju högre CaO-halt desto bättre antas blandningens hållfasthet och beständighet bli.

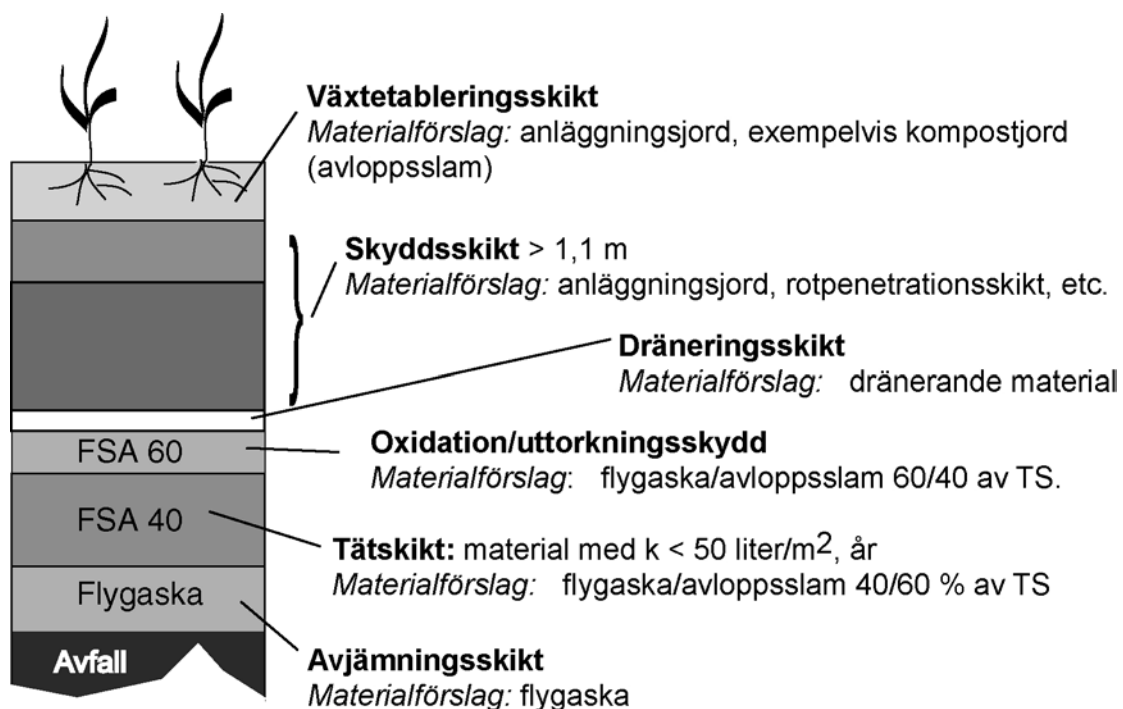
[‡] Det har ej undersökts hur flygaskans (flygaskor från biobränsle och utan tillsats av avloppsslam) halt av CaO påverkar beständigheten hos blandningen. Att halten >3 % valdes baserar sig på erfarenheten att flygaskor som har CaO-halt <2 % uppvisar lägre pH. Noteras bör att det inte enbart är CaO innehållet som ökar blandningens beständighet utan även flygaskornas innehåll av bl.a. S, K, Na och hög konduktivitet är hämmande för bakteriell aktivitet.

4.3 Förslag på tätskiktskonstruktioner

Vid traditionell sluttäckning av ett avfallsupplag kan täckningens funktion delas in i två funktionella delar, tätskikt och skyddsskikt (NV 4474). Tätskiktskonstruktionens funktion är att begränsa lakvattenbildningen genom att avleda vatten från upplagsytan via ett dräneringsskikt. I fallet med flygaskastabiliserat avloppsslam kommer materialblandningens vattenkvot att spela en viktig roll, både under utläggning och under tätskiktets funktionella tid. Vid blandnings- och utläggningsarbetet kommer avloppsslammets vattenkvot (TS-halt) att vara avgörande för FSA-materialets skjuvhållfasthet. TS-halt lägre än 30 % kommer inte att fungera vid utläggningsarbetet med tillsats av flygaska som är mindre än 40 % av TS. Laboratorieundersökningen visar att blandningens hållfasthet är låg för avloppsslam med låg TS halt. För att öka tätskiktets hållfasthet måste innehållet av flygaska höjas samtidigt som det ingående avloppsslammets TS-halt höjs (vattenkvot minskas). Avloppsslammets TS-halt bör ej vara lägre än ca 30 %.

Uttorkning av tätskiktet bör förhindras eftersom det kan påverka skiktets täthet och kan påverka nedbrytningen hos avloppsslammet. Täckningen, dvs. tät- och skyddsskikten, se figur 8, bör därför utformas på ett sätt som kan säkerställa en ”fuktig” miljö. Detta kan åstadkommas genom att nyttja förhållandevis täta och vattenhållande skikt som skyddar tätskiktet från uttorkning. Ett annat problem som tätskiktskonstruktionen måste vara motståndskraftig mot, är utlakning orsakad av eventuell sur nederbörd. Tätskiktets täthet ligger på $< 10^{-9}$ m/s. Med en nettoinfiltration på 50 l/m² och år kommer L/S-kvot 10 att uppnås efter ca 300 år, där L/S står för vikt vätska (L) dividerad med vikten på torrsubstansen (S). Vid L/S 10 rinner/perkolerar 10 kg vatten (ca 10 liter) igenom varje kilogram (torrvikt, TS) tätskiktsmaterial.

Uttorkning kan förhindras genom att omge tätskiktet (FSA) med material som har vattenhållande kapacitet.



Figur 8. Täckningskonstruktion, principskiss

Figure 8. Barrier layers

5 Kvalitetsaspekter

5.1 Ingående material

För att uppnå tillfredsställande resultat på blandningar av flygaska och avloppsslam måste de ingående materialens kvalitet garanteras före tillverkningen.

5.1.1 Allmänt

Ett visst spann hos den optimala blandningen kan accepteras. I den nu aktuella projekt-etappen ges förslag på det kvalitetsfönster som kommer att tillåtas. De materialblandningar som kommer att tillverkas är med tillsats av flygaska på 40–60 % av TS. Avloppsslammets och flygaskans TS-halter och andel flygaska som tillsats är avgörande ur hållfasthets-synpunkt som i sin tur kommer att påverka utläggningsarbetets utformning.

5.1.2 Avloppsslam

Avloppsslammets kvalitet (i denna applikation) kommer att bestämmas av dess TS-halt (vattenkvot). Vid låga TS-halter kommer materialet att vara svårt att bearbeta. Därför kommer ett fönster, som beskriver lämpliga TS-halter att anges och kontrolleras för det avloppsslam som ska nyttjas. Det är viktigt att slammet har en jämn och god kvalitet (hög TS-halt) när det lämnar reningsverket. Med hjälp av kontroller kan driftsstörningar i reningsprocessen, som påverkar TS-halten, upptäckas innan slammet har tagits ut och transporterats till den aktuella deponin. Avloppsslammets TS halt bör ligga på ≥ 30 % TS. Avloppsslam med TS-halt över 35 % har inte undersökts.

5.1.3 Flygaska

Flygaskans kvalitet bestäms av flera variabler. Driftförhållanden, panna, bränsletyp som ger olika TS-halt, CaO-halt, skrymdensitet och kornstorleksfördelning etc. I det nu aktuella fallet har två flygaskor nyttjats. Den ena flygaskan som användes vid laboratorieförsöken kommer ifrån MälarEnergis biobränsleanläggning i Västerås (CFB-panna). Den andra flygaskan kommer från Vattenfall Värme Uppsala (pulverpanna med torv och trä). Flygaskorna är siltiga och kan damma. Flygaskorna, ca 200 ton av vardera, (totalt 400 ton TS) kommer att förvaras torra inför försöken. Vid uttag måste flygaskorna befuktas pga. damningsrisk. Flygaskornas vattenkvot bör vara < 10 %. Efter befuktning bör flygaskorna blandas med avloppsslammet inom ca 24 timmar. Detta för att förhindra att härdning och bildning av större agglomerat i askan.

Mellan Västerås, där flygaskan kommer ifrån, och Älvkarleby/Skutskär är avståndet ca 17 mil. Avståndet från Vattenfall Värme Uppsala är ca 10 mil. Kontakt har tagits med respektive askleverantör om möjligheten att förvara och transportera askorna.

Båda flygaskorna kan förvaras i torrt tillstånd. Den totala kapaciteten i Västerås är 600 ton medan i Uppsala kan ca 1 400 ton förvaras. Av praktiska skäl kommer bara en mindre

mängd att bli aktuell för torrförvaring. Inom projektet kommer ca 400 ton flygaska att nyttjas på en ca 1 800 m² stor provyta.

Parallellt med detta projekt pågår ett projekt där nio flygaskor undersöks vad gäller tekniska egenskaper och deras bedömda potential. Projektet Q-107 SCC: FACE finansieras av Värmeforsks "Askprogram". Flygaskor från följande nio producenter (numrerade från 1–9) har undersökts:

1. Braviken
2. Händelöverket
3. TVL
4. Åbyverket
5. StoraEnso Fors
6. Mälarenergi, Västerås
7. Vattenfall Värme Uppsala
8. Sandviken Energi AB
9. Fortum Värme Stockholm AB, Värtan

Av dessa nio askor är två flygaskor, från Mälarenergi Västerås och Vattenfall Värme Uppsala, aktuella som tillsatsmedel i avloppsslam från Henriksdal.

Resultaten visar att flygaskorna uppvisar varierande höga hållfasthetsvärden efter härdning under 14 dagar. Av de analyserade värdena framgår att flygaskans ursprungliga vattenkvot (*w*), CaO-halt och härdningstemperatur är viktiga faktorer som styr de härdade provkropparnas hållfasthet efter en viss tids härdning. Andra parametrar som kan påverka är materialets kornstorleksfördelning, innehåll av Na, K, Mg, Si och sulfater. I tabell 5.1 redovisas laboratorieresultat från undersökningen.

Tabell 5.1 Sammanställning av uppmätta parametrar. Det gråa fältet representerar de flygaskor som har undersökts inom ramen för detta projekt.

Ask nr	w	pH	CaO,	Torr densitet	w _{opt} ,	CaO/ w	T	Enaxligt tryckförsök,
	[%]		[%]	[kg/m ³]	[%]		[°C]	[MPa]
1	1,5	12,6	5,2	885	55	3,47	35	3
2	1,1	12,7	12,2	1510	30	11,09	37	4,1
3	78,3	9	1,1	980	56	0,014	-	0,8
4	65,8	12,6	10	1100	52	0,152	-	1
5	0,4	12,8	12,4	960	38	31	90	4,5
6	0,1	12,6	4,6	1425	28	46	35	12,2
7	0,3	12,8	9,9	1684	20,6	33	45	2
8	0,4	11,9	1,7	1025	49	4,25	20	1,4
9	0,1	12,5	1,8	1680	16	18	-	8,1

w – vattenkvot, *T* är temperatur

Bästa resultat har man alltid med torra ("färska") flygaskor. Möjlighet att lagra flygaskorna torrt ökar askans potential.

De flygaskor som har undersökts som tillsatsmedel i avloppsslam visar att CaO-halten kan ha en avgörande betydelse för materialets hållfasthetsutveckling. Följande slutsatser kan dras utifrån erhållna delresultat från undersökningen Q-107 SCC: FACE:

- Flygaskans ursprungliga vattenkvot påverkar hållfastheten. Bevattning medför att flygaskans kvarstående härdningskapacitet avtar med tiden efter bevattning.
- Redan vid en vattenkvot på 0,3–4% reduceras hållfastheten något.
- Vattenkvot på 60–70 % ger låga hållfasthetsvärden. Detta på grund av att materialets kvarstående härdningskapacitet minskar efter vattentillsats.
- Det finns även ett visst samband mellan hållfasthet och CaO-halt i materialet.
- CaO-halt på ca 2 % kan ge hög hållfasthet, förutsatt att askans ursprungliga vattenkvot är låg (<0,1 %).

När det gäller att nyttja flygaskorna som stabiliseringsmedel i avloppsslam, bör askor som har härdat och har hög vattenkvot ej nyttjas utan tillsats av aktivator (exempelvis cement, torr flygaska etc.). Askorna 3 och 4 är exempel på sådana flygaskor. Även flygaskor med låga pH-värden och låg CaO-halt bör undvikas pga. osäkerhet vad gäller blandningens beständighet. Även i dessa fall kan tillsats av aktivator, som cement, osläckt kalk etc. medföra att flygaskorna blir lämpliga. Exempel på sådana flygaskor är askorna nr 8 och 9, se tabell 6.1. I de fall aktivator tillsätts, bör effekten av tillsatsen och mängden kontrolleras i laboratorium.

De övriga flygaskorna kan, efter en kontrollundersökning, nyttjas utan tillsats av aktivator som tillsatsmedel i avloppsslam. Som undersökningen antyder, bedöms fem av de nio flygaskorna med stor sannolikhet kunna nyttjas som tillsatsmedel i avloppsslam. De övriga flygaskorna kan fungera, exempelvis med större inblandningsmängd eller med tillsats av aktivator i form av cementtillsats, kalk, merit etc.

5.2 Blandningen FSA

Inför fullskaleapplikation kommer blandningen som tillverkas att kvalitetssäkras genom kontroll av skrymdensitet, vattenkvot, skjuvhållfasthet (konförsök) och okulär kontroll. FSA-materialets hållfasthet kontrolleras på plats med hjälp av konförsök. Inför fältförsöket kommer försök i mindre skala att utföras för att kontrollera FSA-materialets tekniska egenskaper.

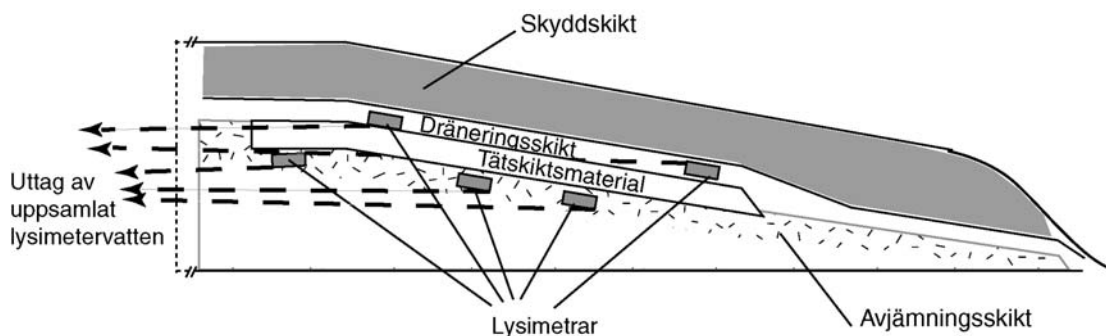
6 Utformning av pilotobjekt

6.1 Allmänt

Provytans storlek måste vara tillräckligt stor för att inte resultaten ska påverkas av randeffekter. Här föreslås en 30*60 m² stor yta som ska täckas. För att undvika eller minimera störningar av resultaten, bör pilotobjektet ha stora likheter med det ”verkliga” utförandet. Kantflödets inverkan bör minimeras, vattenbelastningen ska efterlikna verkliga förhållanden, risken att fel i konstruktionen påverkar mätresultaten och därmed utvärderingen bör minimeras genom exempelvis flera mindre lysimetrar istället för en stor. Utformningen av testcellen bör vara sådan att den är enkel och prisvärd att utföra. Konstruktionen bör kunna ge svar på täthet, lakbarhet, sättningar osv.

Ett förslag på en ny och förbättrad konstruktion redovisas i figur 9. Denna konstruktion har flera funktioner:

1. vid utförandet kan packbarhet (med skopa), bearbetbarhet etc. studeras vid släntlutningar som motsvarar verkliga förhållanden på en deponi
2. utläggningsarbetet kan studeras, dvs. hur väl utläggningen av ett visst material (tätskiktmaterial) fungerar vid en viss lutning
3. installation av flera lysimetrar minskar påverkan från kantflöden
4. detaljerad information kan fås, beroende på var lysimetrarna är installerade



Figur 9. Förslag på utformning av testcell, principskiss, efter Mácsik 2003

Figure 9. Test cell construction with lysimeter

Det är funktionen hos en tätkonstruktion som är av stor vikt, dvs. i fallet med en deponi för icke farligt avfall är att genomsläppligheten ska vara <50 l/m² och år. Med hjälp av den i figur 9 redovisade konstruktion, skulle lämpligheten kunna bedömas på ett tillfredsställande sätt.

En nackdel med flera mindre lysimetrar är att dessa kan ge stora variationer vid inbyggda inhomogeniteter i tätskiktstrukturen. Flera lysimetrar kan dock ge information om eventuella variationer.

En viktig parameter som kommer att ge effekt på resultaten, oberoende vilken konstruktion man väljer, är tätskiktets materialets packbarhet. Packbarheten är beroende av materialets vattenkvot.

6.2 Provytor, mängder avloppsslam och flygaska

6.2.1 Allmänt

Här kommer tre olika förslag på deponitäckskikt att föreslås. På provyta 1 och 2 nyttjas samma material men olika tjocklekar på dränskikt och skyddsskikt. Provyta 1 har 0,1 m dränskikt och 1,1 m skyddsskikt, medan provyta 2 har 0,2 m dränskikt och 1,1 m skyddsskikt. Provyta 1 och 2 byggs med oxidationsskikt och dräneringsskikt, medan provyta 3 kommer att byggas utan dessa skikt. Oxidationsskiktets funktion kommer att vara att dels hålla vatten, vilket kommer att skydda tätskiktet från uttorkning (nedträngning av luft/syre) och dels att buffra pH vid nedträngning av eventuellt surt nederbördsvatten. Försöksytornas storlek begränsas till 30*60 m², där varje provyta har ytan 30*20 m². I nedanstående mängdberäkningar antogs avloppsslamets TS-halt vara ca 30 %, figur 10.

6.2.2 Provyta 1

I tabell 6.1 redogörs tätskiktets konstruktionens uppbyggnad på provyta 1.

Tabell 6.1 Tätskiktets konstruktionens uppbyggnad på provyta 1–3.

Skikt	Provyta 1	Provyta 2	Provyta 3	Materialval
Växtetableringsskikt	0,2 m	0,2 m	0,2 m	100% återvunnen jord
Skyddsskikt	1,1 m	1,1 m	1,3 m	100% återvunnen jord
Dräneringsskikt	0,1 m	0,1 m	0,1 m	slaggrus
Oxidationsskyddsskikt	0,2 m	0,5 m	-	40% slam/60% aska
Tätskikt	0,5 m	0,5 m	0,5 m	60% slam/40% aska
Avjämningskikt	0,5 m	0,5 m	0,5 m	aska (biobränsle)

Avjämningskikt tillverkas av flygaska, med en vattenkvot på ca 40 %. Flygaskan transporteras till deponin, läggs ut och packas. Avjämningskiktets tjocklek är 0,5 m och blandningens skrymdensitet ligger på ca 1,0 ton/m³. På en 30*20 m² yta läggs det ut ca 208 ton TS flygaska.

Tätskikt tillverkas med skruvsblandare, ca 500 m³/timme är kapaciteten. Blandningen består av 60 % TS avloppsslam och 40 % TS flygaska, FSA 40. Efter blandning transporteras materialet till deponin och läggs ut ovanpå avjämningskiktet. Utläggningen kommer att ske i strängar. Tätskiktets tjocklek är ca 0,5 m. Materialets täthet ligger på <10⁻⁹ m/s, skjuvhållfastheten är >10 kPa och blandningens skrymdensitet efter packning ligger på ca 1,2 ton/m³. På en 30*20 m² yta läggs det ut ca 72 ton TS avloppsslam och 80 ton TS flygaska.

Oxidationsskyddsskikt tillverkas av flygaska och avloppsslam med hjälp av rotorskopa. Blandningen som nyttjas består av 40 % TS avloppsslam och 60 % TS flygaska, FSA 60.

Efter blandning transporteras materialet till deponin, läggs ut och packas. Oxidationsskyddsskiktets tjocklek är 0,2 m. Materialets täthet ligger på $<10^{-9}$ m/s, skjuvhållfastheten är ca 30 kPa (efter 30 dagar) och blandningens skrymdensitet ligger på ca 1,25 ton/m³. På en 30*20 m² yta läggs det ut ca 42 ton TS avloppsslam och 63 ton TS flygaska.

Dräneringsskikt består av slaggrus och har tjocklek på ca 0,1 m. Materialets permeabilitet ligger på ca 10^{-5} m/s och skrymdensitet ligger på ca 1,0 ton/m³. På en 30*20 m² yta läggs det ut ca 60 ton blandning med en vattenkvot på ca 15 %.

Skydds- och växtetableringsskikt består av 100 % återvunnen jord som tillverkas av hygieniserat avloppsslam. Skyddsskiktets tjocklek är 1,1 m. Växtskiktets tjocklek är 0,2 m. Materialets skrymdensitet ligger på ca 0,8 ton/m³. På en 30*20 m² yta läggs det ut ca 624 ton, varav ca 237 ton TS avloppsslam om inblandningen av avloppsslam motsvarar 33 %.

6.2.3 Provyta 2

I tabell 6.1 redogörs tätskiktets konstruktionens uppbyggnad på provyta 2.

Avjämnningsskikt, tätskikt och oxidationsskyddsskikt tillverkas på motsvarande sätt som avjämnningsskiktet på provyta 1. Oxidationsskiktets tjocklek ökas dock till 0,5 m. På en 30*20 m² yta läggs det ut ca 63 ton TS avloppsslam och 94 ton TS flygaska.

Dräneringsskikt består av slaggrus och har tjocklek på ca 0,3 m. Materialets permeabilitet ligger på ca 10^{-5} m/s och skrymdensitet ligger på ca 1,0 ton/m³. På en 30*20 m² yta läggs det ut ca 156 ton slaggrus med en vattenkvot på ca 15 %.

Skydds- och växtetableringsskikt består av 100 % återvunnen jord som tillverkas av hygieniserat avloppsslam. Skyddsskiktets tjocklek är 1,1 m. Växtskiktets tjocklek är 0,2 m. Materialets skrymdensitet ligger på ca 0,8 ton/m³. På en 30*20 m² yta läggs det ut ca 231 ton TS avloppsslam om inblandningen av avloppsslam motsvarar 33 %.

6.2.4 Provyta 3

I tabell 6.1 redogörs tätskiktets konstruktionens uppbyggnad på provyta 3.

Avjämnningsskikt och tätskikt tillverkas på motsvarande sätt som avjämnningsskiktet på provyta 1.

Oxidationsskyddsskikt installeras ej.

Dräneringsskikt installeras ej.

Skydds- och växtetableringsskikt består av 100 % återvunnen jord som tillverkas av hygieniserat avloppsslam. Skyddsskiktets tjocklek är 1,3 m. Växtskiktets tjocklek är

0,2 m. Materialets skrymdensitet ligger på ca 0,8 ton/m³. På en 30*20 m² yta läggs det ut ca 720 ton, varav ca 164 ton TS avloppsslam om inblandningen av avloppsslam motsvarar 33 %.

Yta 1 Ytan 600 m2	Materialval										/m2		
	Måktighet, m	Aska	FSA 40	FSA 60	Slaggrus	100%		Skrymdensitet, ton/m3	Vikt ton	Avloppsslam, kgTS	Andel slam	Flygska kg TS	
						återvunnen jord							
Växtebärlingsskikt	0,2					x		0,8	0,16	41	33%		
Skyddsskikt	1,1					x		0,8	0,88	196	33%		
Dräneringsskikt	0,1				x			1	0,1	-	-		
Oxidationsskikt	0,2			x				1,25	0,25	42	40%	63	
Tätskikt	0,5		x					1,2	0,6	120	60%	80	
Avjämningsskikt	0,5	x						1	0,5			208	
Tätskiktskonstruktion	2,6								2,5	398		351	

Yta 2 Ytan 600 m2	Materialval										/m2		
	Måktighet, m	Aska	FSA 40	FSA 60	Slaggrus	100%		Skrymdensitet, ton/m3	Vikt ton	Avloppsslam, kgTS	Andel slam	Flygska kg TS	
						återvunnen jord							
Växtebärlingsskikt	0,2					x		0,8	0,16	41	33%		
Skyddsskikt	1,1					x		0,8	0,88	196	33%		
Dräneringsskikt	0,1				x			1	0,1	-	-		
Oxidationsskikt	0,5			x				1,25	0,63	104	40%	156	
Tätskikt	0,5		x					1,2	0,6	120	60%	80	
Avjämningsskikt	0,5	x						1	0,5			208	
Tätskiktskonstruktion	2,9								2,9	461		444	

Yta 3 Ytan 600 m2	Materialval										/m2		
	Måktighet, m	Aska	FSA 40	100%		Skrymdensitet, ton/m3	Vikt ton	Avloppsslam, kgTS	Andel slam	Flygska kg TS			
				återvunnen jord									
Växtebärlingsskikt	0,2					x	0,8	0,16	41	33%			
Skyddsskikt	1,3					x	0,8	1,04	231	33%			
Dräneringsskikt	0						0	0	-	-			
Oxidationsskikt	0						0	0	-	-			
Tätskikt	0,5		x				1,2	0,6	120	60%	80		
Avjämningsskikt	0,5	x					1	0,5	-	-	208		
Tätskiktskonstruktion	2,5							2,3	392		288		

Figur 10. Beräknade volymer och mängder

Figure 10. Calculated volumes and amount of materials.

6.3 Teknik och miljö

6.3.1 Beständighet

Linermaterialets beständighet ska kontrolleras. Här finns det möjlighet att installera termoelement för mätning av temperatur i tätskiktet på olika nivåer. Efterkontroll efter en längre period kan verifiera eller förkasta de resultat som indikeras av de resultat som erhålls vid olika laboratoriestudier, dvs. att en blandning av avloppsslam och flygaska är ett beständigt linermaterial.

I detta projekt föreslås att det görs, parallellt med fältförsöket, en serie laboratorieförsök där hela tätskiktet kontrolleras genom en serie lakförsök. Syftet med denna undersökning är att se hur L/S 1, 2, 10, 50 och 100 kommer att påverka tätskiktets beständighet.

6.3.2 Kontrollprogram

Kontrollprogrammets syfte är att kontrollera:

- a. de ingående materialens kvalitet
- b. FSA-materialets kvalitet
- c. utlägningsarbetet
- d. installation av mätinstrument
- e. efterkontroll av funktion och miljö

Kontroll av ingående materials innehåll av ämnen sker utanför detta projekts ramar. Kontrollprogrammet beskriver hur kontroll av sättningar, hållfasthet, permeabilitet, beständighet, utlakning etc. kommer att utföras på prov-/ pilotobjektet.

Kontroll av de ingående materialens kvalitet

- Avloppsslam
 - Avloppsslammets TS-halt behöver vara mellan 30–35 %.
- Flygaska
 - Mälarenergi, Västerås, möjlighet att lagra upp till 200 ton torr flygaska
 - Vattenfall Värme Uppsala möjlighet att lagra upp till 200 ton torr flygaskaBåda askorna är undersökta inom FACE-projektet (Värmeforsk). Den tillåtna lägsta TS-halten är 91 % (w = 10 %).

Den totala lagringskapaciteten att förvara torr flygaska är mycket större än det behov som finns för att utföra pilotförsöket. Vid uttag av de torra flygaskorna kommer dessa att bevattnas för att minska damningsproblemen. Flygaskornas vattenkvot höjs då till ca 10 %, dvs. TS-halten sänks till ca 91 %. Flygaskorna ska nyttjas inom en dag efter bevattning.

Kontroll av FSA-materialets kvalitet

FSA framställs genom mekanisk blandning av avloppsslam och flygaska. Blandningens homogenitet kommer att kontrolleras med hjälp av okulärbesiktning, provuttag med tillhörande undersökning av TS-halt (vattenkvot), skrymdensitet och skjuvhållfasthet

med hjälp av konförsök. Dessa kontroller kommer att utföras varje timme, samt när blandningsförhållanden ändras. Provmängden som tas ut är ca 300 gram per tillfälle.

Kontroll av utläggningsarbetet

Inför utläggning kommer material som nyttjas i de olika ”funktionella skikten” att vägas. Varje skikts skrym- och torrdensitet kommer att kontrolleras. Kontroll utförs för att kontrollera att skiktens tjocklek uppfyller de krav som har ställts i beskrivningen av respektive provyta.

Installation av mätinstrument för miljöprovtagning

Installation sker av lysimetrar, sättningsslangar, termoceller etc. Med hjälp av lysimetrar kommer de olika skiktens genomsläpplighet och det uppsamlade vattnets kemi att kunna kontrolleras. Tre provytor, med något olika sammansättning, kommer att undersökas. Undersökningen kommer att utföras på samma sätt på samtliga provytor.

Tätskikt – Lysimetrar för kontroll av tätskiktets genomsläpplighet (täthet). Installation av lysimetrar sker i förberedda sandfyllda gropar i det asklager som underlagrar tätskiktet. Lysimetrarna kommer att vara fyllda med grus och uttag av uppsamlat vatten (perkolat genom tätskiktet) kommer att undersökas vad gäller mängd. Enstaka vattenprov kommer att analyseras på pH, konduktivitet, metaller, total organisk innehåll (TOC), löst organiskt innehåll (DOC) etc. Antalet lysimetrar som installeras under tätskiktet är 6 stycken per provyta (totalt 18 st.). Det kommer att installeras ”behållare” som kommer att samla upp gas som finns i tätskiktet. Gasprov tas upp till en gång i månaden. Detta för att få en uppfattning om hur gassammansättningen är i djupare delar av tätskiktet.

Oxidationsskyddsskikt – Lysimetrar för kontroll av oxidationsskyddsskiktets genomsläpplighet (täthet). Installation av lysimetrar sker i förberedda sandfyllda gropar i det tätskiktet som underlagrar oxidationsskyddsskiktet. Lysimetrarna kommer att vara fyllda med sand och uttag av uppsamlat vatten (perkolat genom oxidationsskyddsskiktet) kommer att undersökas vad gäller mängd. Enstaka vattenprov kommer att analyseras på pH, konduktivitet, metaller, TOC, DOC. Antalet lysimetrar som installeras under oxidationsskiktet är 4 stycken, fördelat på två provytor med oxidationsskyddsskikt (totalt 4 st.)

Skyddsskikt – Lysimetrar för kontroll av skyddsskiktets genomsläpplighet (täthet). Installation av lysimetrar sker i förberedda sandfyllda gropar i dräneringsskiktet. Lysimetrarna kommer att vara fyllda med sand och uttag av uppsamlat vatten (perkolat genom skyddsskiktet) kommer att undersökas vad gäller mängd. Enstaka vattenprov kommer att analyseras på pH, konduktivitet, metaller, TOC, DOC. Antalet lysimetrar som installeras är 2 stycken per provyta (totalt 6 st.)

Installation av mätinstrument och kontroll av funktion

Barriär- och oxidationsskyddsskiktets sättningsfunktion kommer att påverka dessa skikts funktion. Sättningen medför att skiktets täthet och skjuvhållfasthet höjs, samtidigt som dess beständighet antas öka. En grov uppfattning om skjuvhållfastheten i tätskiktet kan erhållas om vingförsök med handhållen utrustning av typ ”Doctors kit” används i olika punkter på ytan. Erhållen packning i tätskiktet föreslås mätas med vatten-/sand-

volymeter och/eller med Toxler. Här kommer Toxler-volymetern att kunna kalibreras mot vattenvolymeter. Toxler-volymeter är icke förstörande och snabbare testmetod än de övriga. På så sätt kan jämförelser göras med erhållen packning i fält kontra i laboratorium och uppfattning fås om permeabiliteten i fält.

Medan materialet komprimeras (i det initiala skedet) kommer en del porvatten att pressas ut ur dessa skikt. Sättningsslangar kommer att installeras under och ovanpå tät-skiktet, samt under dräneringsskiktet. Avvägning av deponiytan kommer att ske vid tre mättillfällen.

Efterkontroll av funktion och miljö

Kontroll av funktion och miljö kommer att ske under ett år totalt vid tre–fyra mättillfällen.

Parallellt fältundersökningen kommer laboratorieundersökning att utföras för att utreda FAS-materialets beständighet. För detta kommer undersökning av den biokemiska metanpotentialen (BMP) att användas, dvs. en bedömning av metanbildningspotentialen. Undersökningen utförs på prov från fältförsöken, där FSA-material lakas med upp till L/S-kvot 100 (L/S-kvot 2, 10, 50 och 100). L/S-kvot 100 kommer att motsvara >> flera hundra år vid en permeabilitet på $< 10^{-9}$ m/s.

7 Projektplanering

7.1 Allmänt

Pilotprojektet planeras att utföras under två arbetsveckor under hösten 2003 alternativt våren 2004. Efter att blandningsverktyget har etablerats, utförs ett förförsök under dag 1. Dag 2–8 sker blandningen och utläggning av FSA-materialet och sluttäckningen av den planerade 1800 m² stora deponiytan. Blandningsverktyget kommer att hyras för en två veckors period. Utläggning och även blandningsarbetet är väderberoende. Arbetet bör ej utföras vid kraftigt och ihållande regn eller under sträng kyla.

7.2 Förtest

Mindre volymer av FSA40-60 kommer att tillverkas under dag 1. FSA-blandningarna kommer att undersökas på försöksytor på ca 10–20 m². Blandningarnas hållfasthet, densitet och vattenkvot kommer att kontrolleras samtidigt som hanterbarheten kommer att dokumenteras. FSA kommer att läggas ut på lutningar mellan 1:12 och 1:3 eller till den lutning där brott inträffar i materialet. Under utläggningsarbetet kommer hanterings- och logistikproblem att studeras och dokumenteras inför fullskaleförsöket.

Utförandebeskrivning på hur blandnings- och utläggningsverktyg ska nyttjas, optimering av parametrar som blandningsenergi, blandningstid etc. kommer att ges i detta skede. Vid detta tillfälle kommer bestämning av skrymdensitet på avloppsslam och flygaska att göras. Vid laboratorieförsöken har torrsubstansens vikt nyttjats som mått när det gäller framställningen av de olika blandningarna, FSA40, FSA60 etc. I det storskaliga fältarbetet kommer de ingående materialens volym att bli mått på blandningsförhållandena. Under dag ett kommer kontroll av skrymdensitet i skopa att beräknas och en omräkningsformel att tas fram för att försäkra att blandningen är av rätt sort, dvs. omräkningsfaktor tas fram för att exempelvis tillverka FSA40 utifrån avloppsslammets och flygaskans volym. Därmed kommer kravet på kontroll av bl.a. vattenkvot hos de ingående materialen och vattenkvoten samt densiteten hos FSA-produkten att vara avgörande för barriär-materialets hanterbarhet, skjuvhållfasthet och täthet.

Utläggningen är en annan viktig del i arbetet som måste beskrivas och där fält-erfarenheter måste dokumenteras. En viktig del i detta moment är att få en bättre uppfattning och beskriva hur materialet beter sig under fältmässiga förhållanden. Dessa egenskaper kommer att beskrivas som bearbetbarhet och hanterbarhet. Släntlutningar där linermaterialet kommer att läggas ut kommer att varieras, detta för att få en uppfattning om de gränser där materialet fungerar, dvs. gränsen för ”släntstabiliteten” hos linermaterialet. Här kommer även packningsförsök att göras med en lättare vält.

7.3 Utläggningen

7.3.1 Avjämningskikt

Avjämningskiktet kommer att bestå av flygaska som har lagrats öppet under en längre tid (> 1 månad). Den lagrade flygaskans härdningsegenskaper och packbarhet medför att avjämningskiktet är ett bra underlag för tätskiktet. Flygaskan kommer från biobränsleförbränning (Econova).

7.3.2 Tätskikt och oxidationsskyddsskikt

Tätskiktet blandas enligt recept som beskrivs i avsnitt 6, samt de erfarenheter som erhålls vid försökstillfället dag 1. Tätskiktets (FSA) tjocklek kommer att vara 0,5 m. FSA-materialet kommer att läggas ut i tre skikt och packas/jämnas av med skopa. Materialets initialt låga skjuvhållfasthet medför att transport direkt på tätskiktet ej är tillåtet. Oxidationsskyddsskiktet läggs ut direkt ovanpå tätskiktet, med en tjocklek på 0,2 m.

7.3.3 Dräneringsskikt

Dräneringsskiktet kommer att bestå av slaggrus via Econova. Dräneringsskiktet kommer att under- och överlagras av geotextil som materialavskiljande lager.

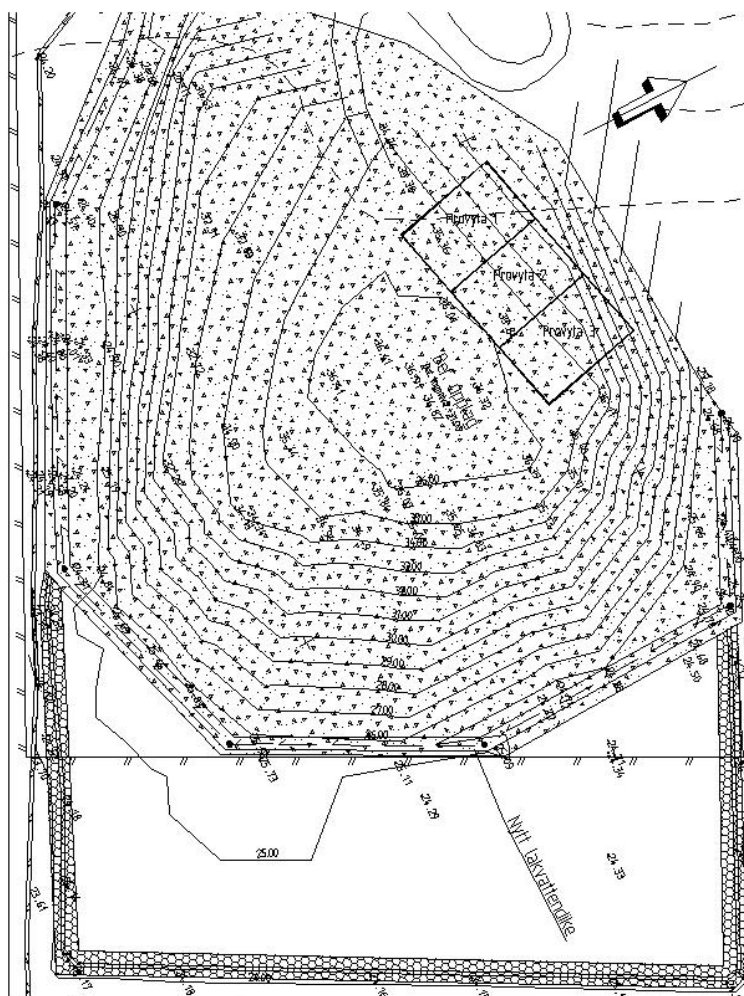
7.3.4 Skyddsskikt

Skyddsskiktet kommer att bestå av 100 % återvunnen jord som kommer från Econovas verksamhet.

8 Lämpliga deponier

8.1 Inventering

Diskussion med intressenter och ”kontroll” av engagemang för att nyttja de som vill och inser nyttan av att samarbeta är en viktig del i projektet. Två deponier har diskuterats under projektets gång, Stora Ensos deponi i Skutskär och Dragmossen i Älvkarleby kommun. Den senare deponin valdes som plats för pilotförsöket.



Figur 11. Dragmossens avfallsanläggning med de tre provytornas preliminära plats på deponin. Provytornas storlek är 3x20x30 m².

Figure 11. The landfill at Dragmossen with the three proposed test areas.

Älvkarleby kommun har visat intresse att utföra ett försök med avloppsslam som tätskikt på Dragmossens deponi. Tillstånd att få utföra försöket på Dragmossens avfallsanläggning behandlas nu av Länsstyrelsen i Uppsala län. Dragmossens avfallsanläggning är 5 ha, med en deponiyta på ca 2,6 ha. Försöksytan som planeras är ca 1 800 m² stor, se figur 11.

8.2 Lokala förutsättningar

Deponin på Dragmossens avfallsanläggning avslutades 1995 och ska sluttäckas. Det finns en avslutningsplan på behandling hos länsstyrelsen. Det är många faktorer som gör Dragmossens avfallsanläggning till ett bra alternativ att utföra ett pilotprojekt, med avloppsslam som tätskikt. En av fördelarna är att Dragmossen redan idag tar emot avloppsslam från Stockholm Vatten AB och flygaska från bl.a. Mälarenergi, Västerås.

I Econovas maskinpark finns hjullastare och grävmaskiner som behövs vid pilotprojektet. Personal på Dragmossen har erfarenhet av blandning med ”rotorskopa” där smetrest (visst fiberinnehåll), askor och grönlutslam har blandats. Även försök med utläggning av dessa massor har gjorts.

Blandning av avloppsslam och flygaska kan utföras på de ytor där Econova hanterar askor i dagsläget. En anmälan till kommunen bör göras för själva blandningsförfarandet. Redan idag hanteras avloppsslam på Dragmossen, utan klagomål från omgivningen.

Det är viktigt att kontrollera vad för slags avfall som underlagrar försöksytan. Deponin har tagit emot bygg- och rivningsavfall, men även slam och hushållsavfall har deponerats. Sättningar kan förekomma och fortgå på deponin. Där slam har deponerats kan det vara sättnings- och stabilitetsproblem. Det är därför viktigt att försöksytan väljs efter att försöksytan har besiktigats.

9 Tillverkning

9.1 Allmänt

Vid dimensionering i fält av hur blandningarna ska utföras följs en blandningsbeskrivning som baseras på ett i laboratoriet framtaget recept. Även här kommer en toleransnivå på blandningens innehåll (TS flygaska/TS avloppsslam) att anges och följas upp. Eventuella avvikelser kommer att dokumenteras.

9.2 Transport av råvaror

De i tätskiktskonstruktionen ingående materialen tillhandahålls fritt till anläggningen. Materialtransport till deponi förutses ske i oblandat skick.

Slam transporteras till deponi med slambilar som SVAB använder idag. Slammet skall lagras på plattan i direkt anslutning till blandarstationen. Transport av aska sker lämpligen med en bulkbil om kapacitet $25 \text{ m}^3/\text{bil}$. Askan transportas direkt till blandningsstationen.

Blandningsstation bör placeras i närheten av den yta i aktuell deponi som skall täckas.

9.3 Blandningsprocessen

Dimensionerade kapacitet för blandningsutrustning skall vara en färdigblandad (homogen) volym om $500 \text{ m}^3/\text{dag}$. Den färdigblandade produkten har liknande konsistens som en siltig lera, men uppvisar ett ”gummiartat” beteende. Produktens densitet ligger mellan $1,0\text{--}1,25 \text{ ton/m}^3$.

Efter samtal med entreprenörer, företrädesvis TESAB, samt utifrån egna erfarenheter, föreslås en konventionell blandningsmetodik (med vissa förfiningar) som mest lämplig för de material som ska blandas.

Blandningsanläggningen skall grovt bestå av en samlingsficka för slam, en silo för aska, transportanordning för transport från samlingsficka/silo till själva blandaren, en blandare samt borttransport från blandaren av den färdiga produkten (gäller vid kontinuerlig blandning). Samlingsfickan/silon skall vara dimensionerad enligt ovan nämnda produktionskapacitet ($500 \text{ m}^3/\text{dag}$).

Transport av aska till silon i blandarutrustningen sker direkt från bulkbil. Samlingsfickan skall fyllas på innan den är helt tom.

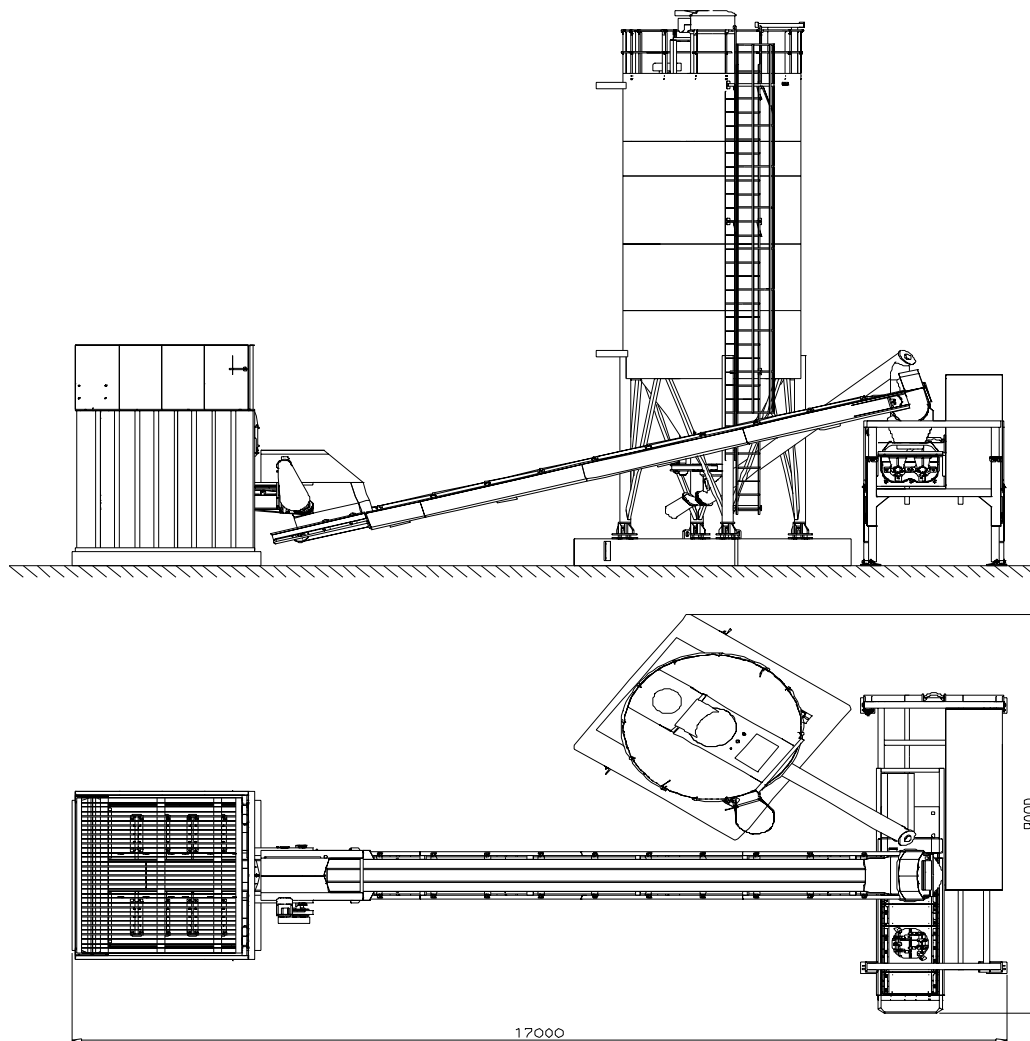
Slammet förflyttas från lagringsplatsen till en separat slamficka med hjälp av en hjullastare. Med ovanstående volym så har denna hjullastare hela sin kapacitet låst till blandarstationen.

Dosering av slam och aska till blandningsprocessen sker med hjälp av en enklare modell av styrautomatik. En enklare styrning kan väljas eftersom noggrannheten på blandningen

tillåter det. Blandningsutrustning skall vara av sådant slag att man relativt enkelt kan plocka upp/ner den för transporter mellan olika deponier.

9.4 Kontinuerlig blandare (Luxtablandare) – utrustning och ekonomi

Tekniska data samt prisuppgifter kommer från Röbbäcks, figur 12.



Figur 12. Uppställning av en kontinuerlig blandarutrustning. (Röbbäcks Sweden AB)

Figure 12. Arrangement of a continuous paddle blender. (Röbbäcks Sweden AB)

Teknisk utrustning:

<i>Matarficka:</i>	Förberedd för hydrauliskt rörliga sidor med avskiljningsgaller
<i>Bandmatare:</i>	b=1 000 mm monterad under matarficka
<i>Inmatningsband (täckt):</i>	b=1 000 mm
<i>Blandarenhet på stödben:</i>	3 m lång och tvåaxlad med effektmätare, spolutrustning och kompressor
<i>Vattentank:</i>	Utrustad med stativ, givare och ventiler, volym 1 500 l
<i>Silo:</i>	Avsedd för aska, med filter, doseringsskruv och frekvensstyrning, volym 50 m ³
<i>Styrutrustning:</i>	Avsedd för kontinuerlig dosering/blandning
<i>Elcentral inkl. elutrustning</i>	

Ekonomi:

Utrustningspris vid inköp: 3 500 000 SEK
Utrustningspris vid hyra: 130 000 SEK/vecka

9.5 Satsblandare – utrustning och ekonomi

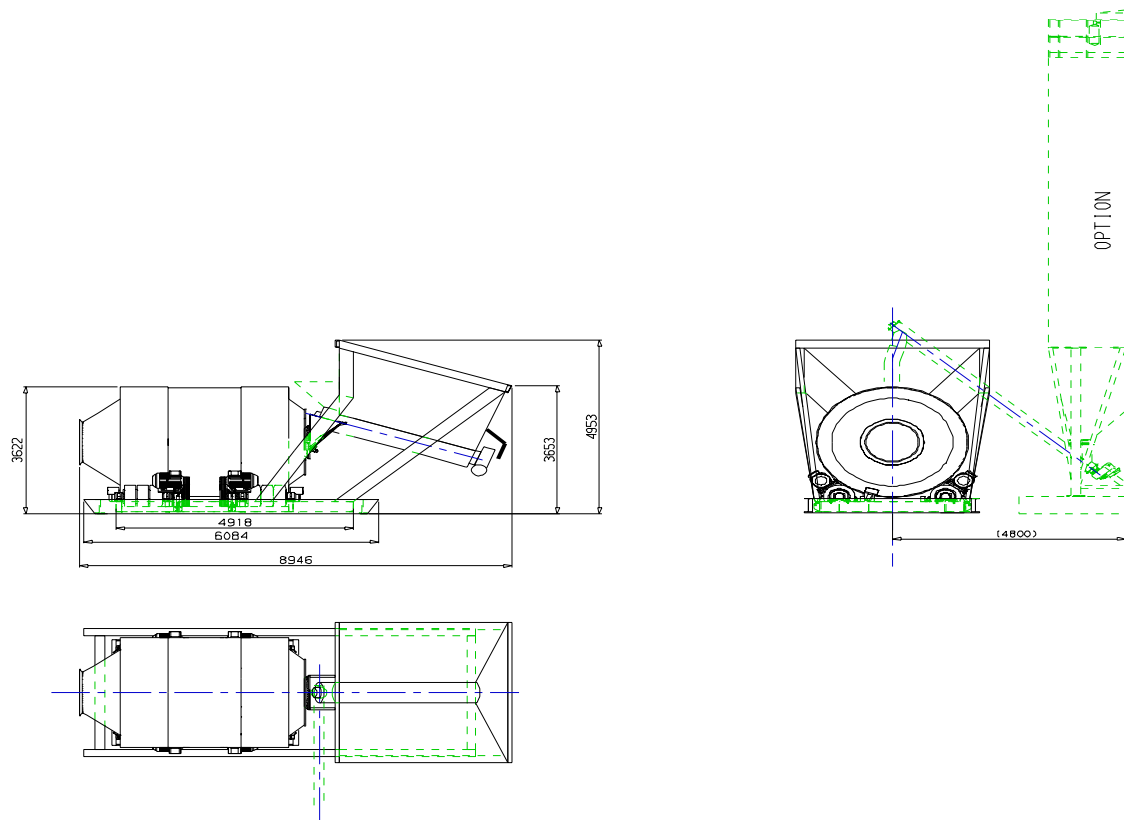
Tekniska data samt prisuppgifter kommer från Röbbäcks Sweden AB, figur 13.

Teknisk utrustning:

<i>Matarficka:</i>	Förberedd för hydrauliskt rörliga sidor med avskiljningsgaller
<i>Bandmatare:</i>	b=1 000 mm monterad under matarficka
<i>Inmatningsband (täckt):</i>	b=1 000 mm
<i>Blandarenhet på stödben:</i>	Trumblandare på 6 m ³ med skovlar infodrade med polyuretan, blandaren är placerad på lastceller
<i>Vattentank:</i>	Utrustad med stativ, givare och ventiler, volym 1 500 l
<i>Silo:</i>	Avsedd för aska, med filter, doseringsskruv och frekvensstyrning, volym 50m ³
<i>Styrutrustning:</i>	Lastceller enligt ovan
<i>El-central inkl. el-utrustning</i>	

Ekonomi:

Utrustningspris vid inköp: 4 700 000 SEK
Utrustningspris vid hyra: 170 000 SEK/månad



Figur 13. Uppställning av en trum(sats)- blandarutrustning. (Röbäcks Sweden AB)

Figure 13. Arrangement of a drum (batch) blender. (Röbäcks Sweden AB)

9.6 Rekommendationer

Som blandare föreslås en Luckstablandare – typ (skruvblandare), figur 12. Det är en enklare (mer ekonomisk) variant av blandare än en konventionell tvångsblandare (satsblandare) och den utför en kontinuerlig blandning som kan prestera stora volymer per dag.

Kringutrustningen är ungefär densamma för både kontinuerlig och satsblandare men den högre kapaciteten, ekonomin samt den enklare hanteringen, ur produktionssynpunkt, gör att man bör välja en kontinuerlig blandare.

9.7 Applicering på deponin

Den färdiga blandningen, *tätskiktetsmaterial* (FSA), går lämpligen från blandningsstationen direkt till väntande dumper för vidare transport till deponin. Detta blir mest ekonomiskt med den kontinuerliga blandaren där man backar till med en dumpers och när den går iväg så backar nästa dumpers till. För den satsvisa blandningen med en 6 m³'s trumma så nyttjas inte dumparnas kapacitet fullt ut.

Lämpligen så delar man in deponin med körvägar, så kallade produktionsvägar, för dumpertrafik på vilka man kör ut massorna. En grävmaskin med hydrotilt och traktor med skopa tar emot tätskiktsmaterialet där dumprarna ändtippar det och lägger ut det. Produktionsvägarna bör utformas så att grävmaskinen kan nå materialet drygt över halva sträckan mot nästa produktionsväg. Eftersom man inte kan köra i det utlagda materialet så måste man avsluta produktionsvägarna genom att backa ur dessa. Med tanke på dumpertrafiken och att produktionsvägarna motsvarar en betydande volym så bör dessa produktionsvägar utformas med en väl tilltagen bredd.

Det är två blandningsmaterial (FSA 40-FSA 60) som skall läggas ut i två skikt. Rent blandningsmässigt får man troligen för dessa produktionsvägar ackumulera en volym av den första blandningen för att sedan blanda i ordning nästa delblandning eftersom man måste lägga båda lagren vid urbackningen från produktionsvägarna. Det går åt två dumprar för denna hantering under förutsättning att blandarstationen är placerad i anknytning till aktuell deponi.

FSA-materialet är av sådan karaktär att någon packning inte kan utföras med exempelvis vibrovält, däremot kommer materialet att kunna packas med skopa.

9.8 Entreprenad

Provytan planeras att bli ca 1 800 m² stor med tre olika tätskikt á 30*20 m², vilka byggs i anslutning till varandra.

Täckningsalternativen för de tre provytorna redovisas i figur 10. I en av provytorna kan ett hygieniserat avloppsslam, framställt och kontrollerat av Econova, bli aktuellt i halva provytans tätskikt. För hela provytan, 1 800 m², blir följande aktuellt:

- Transport av avloppsslam från SVAB sker med lastbil från Stockholm till Dragmossens deponi.
- Transport av flygaskor från Uppsala och Västerås till Dragmossens deponi. Askorna som ska blandas med avloppsslam får ej ha högre vattenkvot än ca 10 %. Transport av flygaskorna, ca 200 ton TS från respektive källa transporteras i exempelvis flistransportbil eller motsvarande.
- Innan täckningsarbetena påbörjas ska skrot och diverse grovsopor, som kan riskera att punktera tät- och dräneringsskikten, tas bort.
- Kontroll att det inte pågår bildning av deponigas på deponiytan som väljs för försöket.
- Kontroll att inte slam är deponerat under försöksytan.
- Den aktuella deponiytan formas om för att få till en ytavrinning.
- Bygghandlingar upprättas, dvs. ritningar, text beskrivningar och digital anläggningsinformation som visar projektets utförande. Terrängmodell upprättas. Ritningar och textdokumentation levereras i digital form.

- Utsättning och avvägning av deponiytan med provytorna. Krav vid inmätning, utsättning och avvägning anges i föreskrifter för geodetiska mätningar. Mätning skall utföras enligt SS-ISO 4463-1. Mätband skall ha noggrannhet enligt SS 64 11 12 respektive SIS 64 11 13 klass II. Utsättning och inmätning av detaljpunkter i plan och höjd skall utföras med en noggrannhet i plan ± 20 mm, i höjd ± 10 mm.
- Deponiytan kompakteras innan avjämningskikt läggs på.
- Efter avjämnings/omformning av avfallsupplaget utläggs avjämningskikt, tätskikt, dränskikt, skydds- och växtetableringskikt, se figur 10. Det är viktigt att undersöka och dokumentera (miljötekniskt och geotekniskt) de material som nyttjas i de olika skikten.
- Tätskiktsmaterialet blandas av underentreprenör (UE) med hjälp av skruvblandare. Tätskiktsmaterialets minsta tjocklek är 0,5 m. Transport och utläggning av barriär-materialet görs av entreprenör (Econova).
- FSA-materialets skjuvhållfasthet, densitet, vattenkvot/TS-halt kontrolleras.
- Oxidationsskyddet (FSA 60) tillverkas med hjälp av en rotorskopa eller med hjälp av skruvblandare,. Totalt kommer ca 150 ton FSA 60 att blandas. Rotorblandarens kapacitet kommer med andra ord att vara tillräckligt stor.
- Geotextil utläggs (bruksklass 3) på tätskikt respektive dränskikt. Det ytvatten som kommer att bildas bör avledas och infiltreras i jorden.

Produktionen och utläggningen av FSA kontrolleras, följs upp och dokumenteras. Här är det av stor vikt att utforma en bra produktionsmanual/produktionsbeskrivning, där arbetsgång, eventuella problem beskrivs och diskuteras. Syftet är att underlätta framtida bruk av FSA i tätskiktskonstruktioner.

10 Tillverkning

Ekonomiska och juridiska effekter studeras och utvärderas, vad gäller användning av avloppsslambaserat tätskiktmaterial på deponi. De juridiska aspekterna beaktas avseende möjligheten att utföra fullskaleförsök på deponi.

10.1 Ekonomi

Den ekonomiska potentialen vad gäller användning av avloppsslam (med flygaska som bindemedel) som tätskikt presenteras i kapitlet.

En inventering av deponier i Stockholmsområdet visar att behovet av sluttäckning är ca 110 ha inom de närmaste åren på de 7 deponier som lämnat uppgifter till SCC. Tas hänsyn till behovet runt om i Sverige så finns en stor potential för användning av tätskikt.

En kostnadsjämförelse har gjorts för ett stabiliserat slam som tätskikt i toptäckning av deponi jämfört med en ”traditionell täckning”. Jämförelsen är gjord för ett icke farligt avfall, dvs. klass II deponi, där kravet är att läckaget får vara max 50 l/m², år. Denna jämförelse görs dels för hela konstruktionen, dels för enbart tätskiktet med avjämnings-skikt. Tillgången på material och transportavståndet styr till stor del kostnadsbilden. Därför redovisas kostnaden i ett intervall för att ge en bild av storleksordningen. Kostnadsjämförelsen görs i kr/m² eftersom det då går att göra jämförelsen med lergeo-membran (bentonitmembran) som är ett alternativt utförande.

Kostnaden avser färdigt utlagt material inklusive lastning, transport och utläggning, räknat per m². Följande antaganden har gjorts:

- Transportavstånd 50 km (materialtäkt – anläggning)
- Materialkostnad för slamråvaran är 0 kr
- Materialkostnaden för aska är 0 kr
- Stabiliserat slam läggs i ett 0,5 m tjockt tätskikt samt 0,2 m oxidationsskyddsskikt
- Inblandning av stabiliseringsmedel sker på deponiområdet
- Inblandning sker med kontinuerlig blandare, med en kapacitet på 500 m³/dag, som förses med material direkt från bulkbil
- Två dumpers används för att köra från blandare till deponi och ändtippa
- En grävmaskin med hydrotilt och traktor med skopa tar emot och lägger ut materialet
- Effekter av kostnader för att bli av med slam och aska redovisas separat

En traditionell uppbyggnad av en toptäckning jämförs med motsvarande uppbyggnad av stabiliserat slam, se tabell 10.1 respektive 10.2. De delar av toptäckningen som påverkar tätskiktet har i tabellerna markerats med fet kursiv text.

Tabell 10.1 Traditionell toptäckning

Lager	Material	Lagertjocklek (m)	Kostnad (kr/m ²)
Växtetableringsskikt	Sprutsådd	-	60 – 80
Skyddsskikt	Anläggningsjord, schaktmassor	1,0	150 – 210
Materialskiljande lager	Geotextil, bruksklass 2-3	-	10 – 15
Dräneringsskikt	Grus/sand	0,3-0,5	75 – 125
Skyddsskikt för lergeomembran	t ex stenmjöl	0,2	40-50
Tätskikt	<i>Lergeomembran (bentonitmembran)</i>	-	60-80
Avjämningskikt för lergeomembran	t ex stenmjöl	0,2	40-50
Avjämningskikt	Aska	0,2	25 – 35
		TOTALT	460 – 645 kr/m²

Tabell 10.2 Stabiliserat slam

Lager	Material	Lagertjocklek (m)	Kostnad (kr/m ²)
Växtetableringsskikt	Sprutsådd	-	60 – 80
Skyddsskikt	Anläggningsjord, schaktmassor	1,0	150 – 210
Materialskiljande lager	Geotextil, bruksklass 2-3	-	10 – 15
Dräneringsskikt	Grus/sand	0,3-0,5	75 – 125
Materialskiljande lager	Geotextil, bruksklass 2-3	-	10 – 15
Oxidationsskydds-skikt	Stabiliserat slam FSA 60	0,2	35 – 45^{*1)}
Tätskikt	Stabiliserat slam FSA 40	0,5	80 – 110^{*2)}
Avjämningskikt	Aska	0,2	25 – 35
		TOTALT	445 – 635 kr/m²
		Alternativ avsättning slam/ aska i enbart tät och oxidationsskikt	- 300 kr/m²
		Alternativ avsättning slam i skyddsskikt (33 % slam) samt aska i avjämningskikt	-140 kr/m²

Anm.

*1) ca 2/3 av summan utgörs av lastning och transport kostnad

*2) ca 2/3 av summan utgörs av lastning och transport kostnad

En jämförelse mellan tabell 10.1 och 10.2 visar att kostnaden som är relaterad till tätskiktet blir i storleksordningen 140–180 kr/m² för tätskikt med lergeomembran och något lägre för stabiliserat slam. Detta utan att hänsyn tas till kostnader för alternativ avsättning med slam och aska.

Om en jämförelse görs med att slam och aska ska deponeras är kostnaden för deponiskatt för närvarande 370 kr/ton, därtill kommer transportkostnad och deponeringsavgift. För slam finns i dagsläget en alternativ avsättning och kostnaden är då 350 kr/ton. För att återföra aska till skogen är kostnaden 500–800 kr/ton. Det finns dock alternativ avsättning för aska och kostnaden har här satts till densamma som för slam, dvs. 350 kr/ton. I föreslagen konstruktion förutsätts att slam och aska accepteras som konstruktionsmaterial varvid deponiskatten utgår. I tabell 10.2 redovisas besparingen

med att använda slam och aska i konstruktionen i förhållande till att kostnaden är 350 kr/ton för alternativ avsättning av materialet. Det innebär att besparingen med att välja aska och slam som konstruktionsmaterial i stort sett bekostar hela täckningen av deponin. Det finns möjlighet att använda alternativa material i fler lager av konstruktionen varvid ytterligare besparingar kan göras. I det här fallet har dock valts att i första hand jämföra kostnaderna för tätskikt.

10.2 Juridik

10.2.1 Allmänt

De juridiska aspekterna för att få utföra fullskaleförsök med blandning av slam och aska i tätskikt på deponi har undersökts via kontakter med olika länsstyrelser.

Till den 1 juli 2002 lämnades många avslutningsplaner in för sluttäckning av deponier. Det är stor skillnad på detaljeringsgrad i dessa. I många fall har länsstyrelserna ännu inte hunnit behandla avslutningsplanerna, men dessa påverkar möjligheten att använda slam/aska som tätskikt.

Kontakt har tagits med länsstyrelsen i Stockholm. Man är där i dagsläget tveksam till att använda slam/aska som tätskikt i sluttäckning på deponi. Om försöket utförs som mellantäckning kan det utföras på deponi där tillstånd redan finns att deponera slam och aska. Om man inte har tillstånd måste det sökas hos tillsynsmyndigheten som kan vara kommun eller länsstyrelse. De avgör om ärendet är tillståndsärende eller om det räcker med att anmälan görs. Om ärendet är tillståndsärende som ska prövas av miljöprövningsdelegationen på länsstyrelsen så tar det 4–6 månader efter att komplett ansökan inlämnats.

Länsstyrelsen i Jönköping räknar med att många avslutningsplaner kommer att behandlas först under 2004. Det bör redovisas för tillsynsmyndigheten hur lösningen ser ut för att uppfylla kraven på sluttäckning. Om fullskaleförsöket i detta projekt ska användas som sluttäckning så måste man komma överens med tillsynsmyndigheten. I de fall konstruktionen ligger inom den lösning som angetts i avslutningsplanen så borde en anmälan räcka för att utföra försöket enligt Länsstyrelsen i Jönköping. Komplettering av avslutningsplanen kan lämnas. Man har inte tagit ställning till vilken bevisbörda som krävs för att godkänna ett tätskikt, t.ex. om laboratieförsök är tillräckliga för att visa ett materials egenskaper.

Att använda slam och aska som tätskikt i deponi bedöms principiellt möjligt, men det är då av stor vikt att fullskaleförsök utförs och att det går att bevisa att tätskiktet fungerar.

10.2.2 Deponi Dragmossen

För deponin Dragmossen i Älvkarleby kommun har SWECO upprättat en avslutningsplan och därmed också förslag till sluttäckning. I planen anges att tätskiktet kan bestå av morän, lerjordar eller andra täta material. Som alternativ anges restprodukter från

Korsnäs pappers industri eller slam/aska enligt denna rapport. Länsstyrelsen i Uppsala ska ta beslut om avslutningsplanen och sluttäckningen av deponin. Ärendet ska prövas av Miljöprövningsdelegationen och beslut förväntas tas under april 2003. Vad som krävs för att få utföra försöket beror av vad som står i avslutningsplanen och om försöket kan utföras inom det beslut som kommer. Om mindre förändring ska utföras inom ramen för gällande tillstånd så ska ärendet hanteras av Bygg- och miljönämnden i kommunen.

11 Slutsatser

Som det framgår av rapportens innehåll har FSA-material (*Flygaska Stabiliserat Avloppsslam*) en stor ekonomisk, teknisk och miljömässig potential att kunna nyttjas som tätskikt vid sluttäckning av deponier. Denna bedömning baseras bl.a. på fyra olika undersökningar bestående av FSA-material med olika bioflygaskor och avloppsslam, se nedan.

<i>Avloppsslam</i>	<i>Flygaska</i>	<i>Referens</i>
Stockholm Vatten AB	Mälarenergi, Västerås	Cronqvist, 2002
Sundsvall Vatten AB	AssiDomän, Piteå	Lenströmer, 2002
Stockholm Vatten AB	Mälarenergi, Västerås	Bilaga A, 2003
Stockholm Vatten AB	Vattenfall Värme Uppsala	2003

Samtliga FSA-material (upp till FSA60) uppvisar låga permeabilitetsvärden. FSA60 består av 60 % av TS flygaska och har en permeabilitet $< 10^{-9}$ m/s.

Skjuvhållfastheten hos FSA-materialen är låg, men den ökar med tiden. Prover har undersökts som har härdat i upp till 30 dagar. Avloppsslammets TS halt är en kritisk faktor och TS halten bör vara >30 % för att erhålla FSA-material som är bearbetbart. Tillsatsen av flygaska bör ligga över 30 % av TS för att erhålla ett tillräckligt hållfast och bearbetbart material. Tillsats med större andel flygaska än 60 % av TS har ej undersökts, men FSA-materialets permeabilitet antas öka med ökande andel flygaska.

En viktig brytgräns för tillsats av flygaska, ur beständighetssynpunkt, ligger på 35 %, då en signifikant hämning av den mikrobiologiska aktiviteten inträffar. Vidare kan det konstateras att den mikrobiella aktiviteten som ombesörjer nedbrytning av organiskt material i slam och ask-/slamblandningar hämmas tydligt av:

- höga saltkoncentrationer
- höga pH-värden

Tätskiktets beständighet är beroende av skydd mot uttorkning och mot urlakning av den pH-höjande effekten. Därför bör tätskiktetskonstruktionen byggas så att tätskiktet skyddas med hjälp av skikt som är vattenhållande och buffrande.

Inom FACE-projektet (Värmeforsk) har konstaterats att flygaskornas pH och CaO-halt kan variera. Ur beständighetssynpunkt är det därmed viktigt att flygaska tillsätts i tillräckligt stor mängd för att hämma den mikrobiologiska aktiviteten. Eftersom olika flygaskor har olika halt av CaO och olika hög pH-höjande effekt, är det viktigt att undersöka flygaskan för att försäkra sig om FSA-materialets beständighet.

Följande kriterier har föreslagits för tätskikt inför pilotförsöket:

- a. Avloppsslammets TS-halt på ca 30–33 % (w <233 %).
- b. Flygasketillsats mellan 30 och 60 % av TS.
- c. Flygaskans kornstorlekssammansättning bör ligga i sandfraktion eller finare.

- d. Flygaskans TS bör vara >91 % (w <10 %) och flygaskan bör ej befuktas mer än ca 24 timmar före blandning med avloppsslam
- e. Flygaskans pH bör vara >12.
- f. CaO-halten >3 %[‡], ju högre CaO-halt desto bättre antas blandningens hållfasthet och beständighet bli.

[‡] Det har ej undersökts hur flygaskans (flygaskor från biobränsle och utan tillsats av avloppsslam) halt av CaO påverkar beständigheten hos blandningen. Att halten >3 % valdes baserar sig på erfarenheten att flygaskor som har CaO-halt <2 % uppvisar lägre pH. Noteras bör att det inte enbart är CaO innehållet som ökar blandningens beständighet utan även flygaskornas innehåll av bl.a. S, K, Na och hög konduktivitet är hämmande för bakteriell aktivitet.

Resultatsammanställning från de ovan nämnda försöken visar att avloppsslam och flygaska från biobränsleförbränning generellt kan fungera som tätskikt. Det bör dock poängteras att flygaskor och avloppsslam med nytt ursprung bör undersökas i laboratorium, där FSA-materialens täthet, hållfasthet och beständighet kan bekräftas och recept för optimal blandning kan tas fram.

Kostnadsbedömningen indikerar att kostnader för en lösning med den föreslagna produkten blir lägre än med traditionella material. Kalkyler visar att jämfört med traditionella lösningar kan lösning med alternativa material i princip bekosta täckningen för avnämaren samtidigt som leverantören av alternativa material minskar sina kostnader genom att slippa avgifter och skatter på ”avfall”.

Några viktiga för- och nackdelar med det föreslagna tätskiktsmaterialet redovisas i tabell 11.1. Till fördelarna hör att FSA är ett plastiskt material, vilket medför att tätskiktet tål viss deformation utan att den förlorar sin täthet. Eventuella skador som uppstår, exempelvis vid stora sättningar, kan enkelt repareras med nytt FSA-material. Råvaran, flygaska och avloppsslam, finns över hela landet, vilket minimerar transportavståndet. FSA är ett prisvärt tätskiktsmaterial. De viktigaste nackdelarna med materialet är att dess beständighet under fälthållanden har ännu ej prövats. Eftersom FSA är ett nytt material saknas det erfarenheter från blandning, hantering och utläggning. Utvecklingskostnader i samband med dessa kvarstår. Varje ny blandning, dvs. nytt avloppsslam och eller flygaska, måste kontrolleras i laboratorium. FSA-materialets TS-halt är en kritisk faktor för dess hållfasthet och hanterbarhet. Flygaskan måste vara torr och avloppsslammets TS-halt bör ej vara lägre än 30 %.

Tabell 11.1 För- och nackdelar med FSA som tätskikt

<i>Fördelar (+)</i>	<i>Nackdelar (-)</i>
Plastisk material	Beständigheten i fält har ej utretts
Tål deformation	Inga erfarenheter i fält
Mindre känslig för ojämnheter	Det krävs speciell blandare
Enkelt att reparera	Utvecklingskostnader kvarstår
Låg permeabilitet	Uppföljning och kontroll
Finns tillgängligt råmaterial över hela landet	Varje ny blandning måste kontrolleras i laboratorium
Prisvärd alternativ	Flygaska måste lagras i torrt tillstånd

12 Litteraturreferenser

- [1] Mácsik J. och Svedberg B., 2000. Schematisk beskrivning av projektprocess. SCC intern skrift.
- [2] Stockholm Vatten AB, 2001a. Slam i mark och anläggningsbyggande, avvattnat vattenverks- och avloppsslam. Rapport 1, jan 2001
- [3] Stockholm Vatten AB, 2001b. Slam i mark och anläggningsbyggande; utredning: Tätskikt i deponier. Rapport 21, augusti 2001
- [4] Sundberg J., Nilsson U., 2001. Användning av avloppsslam för tätning av deponier – Förstudie. RVF-Utveckling, RVF Rapport 01:17
- [5] Cronquist S., 2002. Alternativa material i Stockholms län – askstabilisering av avloppsslam. TRITA-LWR Master Thesis 02-01. KTH, Stockholm
- [6] Lenströmer S., 2002. Avloppsslam som tätskikt på avfallsdeponier. Master Thesis, Luleå tekniska universitet, Civilingenjörsprogrammet, Samhällsbyggnadsteknik / 2002:284
- [7] RVF-utveckling, 2002 Täckning av deponier med blandning av avloppsslam och aska – Erfarenheter, beständighet och andra egenskaper, Rapport 02:18.
- [8] Lundgren, T., 1995, Sluttäckning av avfallsupplag – Krav, material utförande och kontroll. Naturvårdsverket rapport 4474.
- [9] Dragmossens deponi, avslutningsplan 2003-01-23, PM- SWECO
- [10] Dragmossens avfallsanläggning – Begäran om slutlig prövning av villkor för deponins slutliga utformning och anmälan enligt miljöbalken om avslutning av deponin, 2003-01-21, SWECO
- [11] Mácsik et al., 2003, Askblandningar i anläggningsprocesser – Användning av askblandningar vid provväg och täckning av tipp, EU strukturfond mål 1 projekt, <http://www.z.lst.se/eu/index.htm> , projektbank.
- [12] Sluttäckning av avfallsupplag – Krav, material, utförande och kontroll. Rapport 4474, 1995.

Bilagor

A Avloppsslam som linermaterial – Laboratorierapport

A.1 Bakgrund

Laboratorieförsök har utförts på rötat avloppsslam från Stockholm Vatten AB (Henriksdals reningsverk) och flygaska från Mälarenergi för att hitta en lämplig blandning mellan avloppsslam och flygaska som kan användas som tätskikt på avfallsdeponier.

Flygaskan har använts som tillsatsmedel dels för att minska vattenkvoten och dels för att medföra härdning och därmed öka blandningens hållfasthet.

Avloppsslammet har vanligtvis en TS-halt på ca 27–29 %. Under laboratorietillfället var TS-halten lägre, ca 24–25 %.

Flygaskan som användes vid laboratorieförsöket var torr, dvs. nära 100 % TS-halt (w = 0 %). I vanliga fall befuktas flygaskan, så att TS-halten är ca 91 % (w = 10 %) för att undvika damning vid förvaring och transport.

A.2 Materialbeskrivning

Prover med 28, 30, 33 och 40 TS % flygaska har tillverkats. Prover har tillverkats med både torr flygaska och befuktad flygaska. För att befukta flygaskan tillsattes vatten så att vattenkvoten blev ca 10 % (TS-halt = 91 %) därefter fick den stå ca 1 dygn och härda innan den tillsattes i avloppsslam och prover tillverkades.

Det är av intresse att utreda hur hållfastheten och permeabiliteten utvecklas med tiden efter tillverkning, därför har försök utförts på prover en dag efter tillverkning och 30 dagar efter tillverkning. De prover som härdade under 30 dagar förvarades vid en temperatur på 8–10°C med en belastning motsvarande 20 kPa, se vidare i avsnitt 3.1.3 *Konsolidering av proverna*. Prover som härdade en dag förvarades i kylskåp utan belastning.

För att undersöka den biologiska aktiviteten i slammet tillverkades prover med 0, 28 respektive 30 TS % flygaska. Proverna förvarades vid en temperatur på 15°C med en belastning motsvarande 20 kPa.

Ett prov tillverkades av slam som hade torkat och erhållit en vattenkvot på 204 % (TS-halt = 32,9 %) och med tillsats av 27 TS % flygaska.

I tabell 2.1 visas beteckningar på samtliga serier.

Tabell 2.1. Provserier som har tillverkats med avloppsslam från Henriksdals reningsverk och flygaska från Mälarenergi, Västerås.

Prov	Andel FA [%]	w på FA	Härddningstid	Förvarings temperatur [°C]	konsolidering	CRS	enax
28:1:A	28	0	1 dygn	10		Ja	Ja
28:1:B	28	0	1 dygn	10			Ja
30:1:A	30	0	1 dygn	10		Ja	Ja
30:1:B	30	0	1 dygn	10			Ja
33:1:A	33	0	1 dygn	10		Ja	Ja
33:1:B	33	0	1 dygn	10			Ja
40:1:A	40	0	1 dygn	10			Ja
40:1:B	40	0	1 dygn	10			Ja
28:30:A	28	0	30 dygn	10	Ja		Ja
28:30:B	28	0	30 dygn	10	Ja		Ja
30:30:A	30	0	30 dygn	10	Ja	Ja	Ja
30:30:B	30	0	30 dygn	10	Ja		Ja
33:30:A	33	0	30 dygn	10	Ja		Ja
33:30:B	33	0	30 dygn	10	Ja		Ja
40:30:A	40	0	30 dygn	10	Ja		Ja
40:30:B	40	0	30 dygn	10	Ja		Ja
30:1:A*	30	10	1 dygn	10			Ja
30:1:B*	30	10	1 dygn	10			Ja
33:1:A*	33	10	1 dygn	10			Ja
33:1:B*	33	10	1 dygn	10			Ja
40:1:A*	40	10	1 dygn	10		Ja	Ja
40:1:B*	40	10	1 dygn	10			Ja
30:30:A*	30	10	30 dygn	10	Ja	Ja	Ja
30:30:B*	30	10	30 dygn	10	Ja		Ja
33:30:A*	33	10	30 dygn	10	Ja		Ja
33:30:B*	33	10	30 dygn	10	Ja		Ja
40:30:A*	40	10	30 dygn	10	Ja		Ja
40:30:B*	40	10	30 dygn	10	Ja		Ja
15:0:30	0	10	30 dygn	15	Ja		
15:28:30	28	10	30 dygn	15	Ja		
15:30:30	30	10	30 dygn	15	Ja	Ja	
30:30**	30	10	30 dygn	10	Ja		Ja
30:30***	30	10	30 dygn	10	Ja		Ja
30:30:30	30	10	30 dygn	10	Ja		Ja

A.3 Metodbeskrivning

A.3.1 Tillverkning av proverna

En assistentmaskin användes för att blanda avloppsslam och flygaska till en homogen blandning, se figur 3.1.

Genom uppvägning och vetskap om flygaskans och avloppsslammets vattenkvoter kunde rätt mängd aska tillsättas till slammet för att uppnå 28, 30, 33 och 40 TS % aska av blandningen. Proverna blandades ca 3 minuter, tills en homogen blandning erhöles. Proverna tillverkades satsvis. En sats räckte till ett dubbelprov.



Figur 3.1. Assistentmaskinen som användes vid tillverkning av proverna (Lenströmer 2002).

A.3.2 Packning av proverna

Slamblandningarna packades i provtuber, med diametern 5 cm och höjden 17 alternativt 10 cm. Vaseline ströks ut på insidan av tuberna för att underlätta uttryckningen av slamproverna och minska friktionen. En stång med räfflad ändyta, motsvarande en belastning på 40 kPa, belastade proverna i 10 sekunder efter att ett lager på ca 2,5 cm slam lagts i provtuberna. Detta upprepades tills provtuben var fylld. Den räfflade ändytan, se figur 3.2, förhindrade att släta horisontala skikt uppkom i tuberna och en homogen packad slamblandning erhöles.



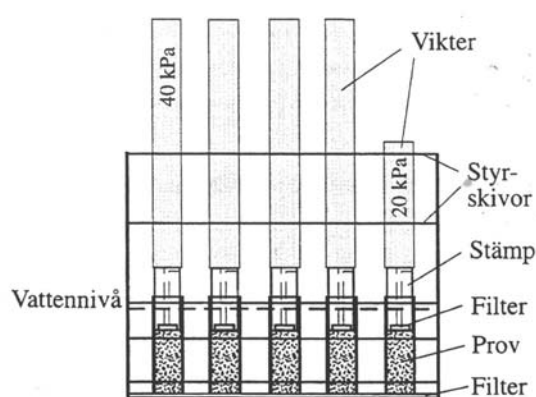
Figur 3.2. På bilderna visas stången med räfflad ändyta som användes vid packning av proverna (Lenströmer 2002).

A.3.3 Förvaring av proverna

Proverna förvarades väl förslutna med gummilock och eltejp.

A.3.3.1 Konsolidering av proverna

De prover som härdade under 30 dagar belastades med en vikt som motsvarade 20 kPa under härdningstiden. Proverna placerades i en provlåda, se figur 3.3. På lådans botten ligger ett filter och ovanpå slamproverna placerades en dräneringsstämp med filter. På stämpan placerades en konsolideringsvikt. Lådan fylldes med vatten några cm upp på slamproverna. Konsolideringsviktens nedsjunkning mättes med jämna mellanrum under härdningstiden.



Figur 3.3. Provlåda för konsolidering av slamprover (Pousette 2001).

A.3.4 Vattenkvot

Vattenkvoten, w , är förhållandet mellan vattnets massa, m_w , och materialets torra massa, m_s :

$$w = m_w / m_s \quad \text{ekv 3.1}$$

Vattenkvoten anges i procent.

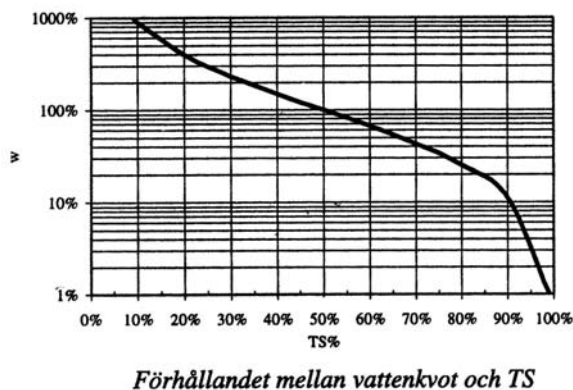
Proverna torkades i en ugn med temperaturen 105°C i ca 24 timmar. Vägning skedde både före och efter torkning. Totala massan, m , respektive materialets torra massa, m_s , erhöles före respektive efter torkning. m_w kunde då beräknas:

$$m_w = m - m_s \quad \text{ekv 3.2}$$

Inom processindustrin används TS-halt istället för vattenkvot som används inom geotekniken. Beräkningsformeln mellan vattenkvot och TS-halt är enligt följande:

$$TS = 1/(1+w) \quad \text{ekv 3.3}$$

Figur 3.4 nedan visar förhållandet mellan vattenkvot och TS.



Figur 3.4. Förhållandet mellan vattenkvot och TS (Scandiaconsult 2001).

Vattenkvoten (TS-halten) bestämdes på alla slamblandningar direkt efter blandning och på samtliga provkroppar efter enaxligt tryckförsök. Vattenkvoten bestämdes även på avloppsslammet när ingen aska var tillsatt samt på den befuktade flygaskan ca ett dygn efter befuktningen.

A.3.5 Skrymdensitet

Skrymdensitet, ρ , är förhållandet mellan materialets totala massa, m , och materialets totala volym, V :

$$\rho = m/V \quad \text{ekv 3.4}$$

Densiteten uttrycks i enheten ton/m³.

Skrymdensiteten bestämdes för varje provtub med slam som tillverkades. Vid bestämning av densiteten packades slammet i cylindriska provtuber. Volymen beräknades således enligt nedan:

$$V = \pi r^2 h \quad \text{ekv 3.5}$$

Där r är radien och h är höjden på provtuberna.

A.3.6 Permeabilitet

Permeabiliteten ger ett mått på ett materials genomsläpplighet för vatten och är en viktig parameter för ett material som ska användas som tätskikt. Grovkornigt material, som t.ex. grus och sand, har hög permeabilitet medan finkornigt material, som t.ex. lera, har låg permeabilitet (Vägverket 1999).

A.3.7 CRS

För att bestämma slammets permeabilitet utfördes CRS-försök. CRS kommer från engelska Constant Rate of Strain. Det innebär att ett prov deformeras med konstant hastighet. Under försöket dräneras provet endast från en sida. En porttrycksmätare är placerad på den odränerade sidan. De parametrar som registreras under försöket är påförd kraft, F , deformation, och porttryck, u . Utifrån dessa parametrar kan effektiv vertikal spänning, σ' och kompression, ε , beräknas. Då porttryck och deformationshastighet är kända kan även permeabilitet uppskattas (Sällfors 1999). Permeabiliteten beror dels på vattenmättnadsgraden samt kornstorleksfördelningen hos materialet. Ju högre vattenmättnadsgrad, desto större andel av porsystemet innehåller vatten och desto högre blir permeabiliteten.

CRS-försöken har utförts av MRM i Luleå enligt svensk standard SS 02 71 29 "Kompressionsegenskaper-ödometerförsök, CRS-försök".

A.3.8 Odränerad skjuvhållfasthet

Den odränerade skjuvhållfastheten är av intresse eftersom den beskriver materialets hållfasthet, dvs. dess förmåga att klara av belastning. Hur mycket materialet deformeras vid belastning beror på dess styvhet och stabilitet.

Hos grovkorniga material byggs hållfastheten upp genom friktion mellan de enskilda partiklarna. Friktionsvinkeln är ett mått på detta. Hållfastheten hos finkorniga material byggs upp av kohesion men även av friktion (Vägverket 1999).

För stabiliserade material, som askstabiliserat avloppsslam, är det intressant att följa hållfasthetstillväxten med tiden (Vägverket 1999).

Den odränerade skjuvhållfastheten kan bestämmas på olika sätt. I den här studien har enaxligt tryckförsök och konförsök använts.

A.3.8.1 Enaxligt tryckförsök

Vid enaxligt tryckförsök bestäms den odränerade skjuvhållfastheten, τ_{fu} . Försöken utfördes enligt svensk standard 02 71 28-”Geotekniska provtagningsmetoder-Skjuvhållfasthet-Enaxligt tryckförsök, UU”. Det går till så att ett cylindriskt prov, med dimensionerna, h är 10 cm och r är 2,5 cm, placeras i en tryckpress och utsätts för en enaxligt ökande tryckspänning genom att provet trycks ihop med konstant deformationshastighet tills det att brott uppstår eller till 15–20 % deformation, se figur 3.5. Under försökets gång registreras kraft och deformation. Med hjälp av den maximala kraften, P , och under antagandet att brott inträffar längs en glidyta med lutningen 45° kan skjuvhållfastheten beräknas enligt (Avd. för geoteknik 1996):

$$\tau_{fu} = P/(2A) \quad \text{ekv 3.7}$$

där A = provets tvärsnittsarea ($19,63 \text{ cm}^2$)



Figur 3.5. Enaxligt tryckförsök (Lenströmer 2002).

A.4 Resultat

A.4.1 Vattenkvot

Vattenkvoten på avloppsslammet låg på mellan 301–317 % (TS-halt = 4,0–24,9 %) vid laboratorietillfället. Avloppsslammet som användes i 30:30:30 torkade i rumstemperatur ca 1 dygn innan provet tillverkades. Avloppsslammets vattenkvot var 204 % (TS-halt = 32,9 %) efter torkning.

Vattenkvoten på den befuktade flygaskan ett dygn efter befuktningen var 3,40 % (TS-halt = 96,7 %). Vid befuktningen tillsattes vatten så att vattenkvoten blev 10 %. Det innebär att efter ett dygn har en del vatten avdunstat, men flygaskan har även bundit en del vatten som ej har torkat bort vid torkning i ugn vid 105°C.

Vattenkvoten för de blandningar med avloppsslam med 24–25 % TS-halt och 28 TS % flygaska låg på mellan 209–218 % (TS-halt = 32,4–31,5 %). Vattenkvoten på de prover med 30 TS % flygaska inblandat låg på 192–208 % (TS-halt = 34,3–32,4 %). Vattenkvoterna på de prover med 33 TS % flygaska inblandat var 187–215 % (TS-halt = 34,8–31,7 %). Vattenkvoterna på de prover med 40 TS % flygaska inblandat var 173–178 % (TS-halt = 36,7–36,0 %).

A.4.2 Skrymdensitet

Skrymdensiteten låg mellan 1,0–1,2 ton/m³ på slamblandningarna. Skrymdensiteten ökar något med ökad mängd flygaska inblandat.

A.4.3 Enaxligt tryckförsök

Inga maxpunkter har erhållits vid enaxligt tryckförsök, dvs. inga brott har uppkommit. Istället har skjuvspänningen vid 15 % deformation använts som brottvärde.

A.4.3.1 Den odränerade skjuvhållfastheten efter 1 dygns härdning

Den odränerade skjuvhållfastheten ligger mellan 5,5 och 7,4 kPa för de prover som härdat ett dygn innan enaxligt tryckförsök utfördes. Den odränerade skjuvhållfastheten skiljer sig inte nämnvärt mellan de prover med torr flygaska och de med befuktad flygaska. Det går dock att se en tendens att prover med torr flygaska har något högre odränerad skjuvhållfasthet. Det går inte heller att säga att den odränerade skjuvhållfastheten ökar med ökad mängd flygaska inblandat.

A.4.3.2 Den odränerade skjuvhållfastheten efter 30 dygns härdning

Den odränerade skjuvhållfastheten ligger mellan 7,85–19,49 kPa för de prover som härdat 30 dygn innan enaxligt tryckförsök utfördes. Det prov som uppvisade den högsta odränerade skjuvhållfastheten (19,49 kPa) är det prov vars slam har torkat ca 1 dygn och fått en vattenkvot på 204,0 % (TS-halt = 32,9 %) varefter 27 TS % flygaska har blandats in. Den slutliga blandningen hade en vattenkvot på ca 150 % (TS-halt = 40 %).

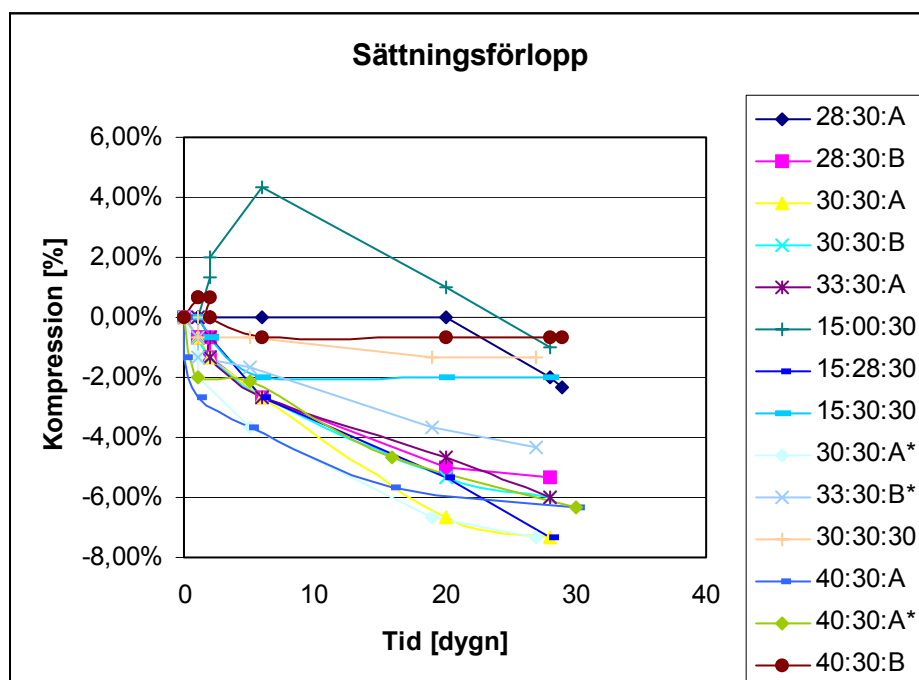
Proven 30:30** och 30:30*** har lika stor mängd befuktad flygaska (30 TS %). Det som skiljer dessa prov åt är att den flygaska som användes i 30:30** befuktades 2 dygn innan provet tillverkades, medan flygaskan som användes i 30:30*** befuktades 1 timme innan provet tillverkades. 30:30** uppvisade en skjuvhållfasthet på 9,14 kPa medan 30:30*** hade en skjuvhållfasthet på 9,68 kPa. Skillnaden i odränerad skjuvhållfasthet är försumbar.

A.4.4 Konsolidering av prover

De prover som härdade under 30 dagar utsattes för en belastning som motsvarade 20 kPa. Tre prover med 0, 28 och 30 TS % flygaska förvarades vid en temperatur på 15–16°C. Övriga prover förvarades i kylskåp (8–10°C). Kompressionen mättes under härdningstiden.

Efter 30 dygns konsolidering hade proverna komprimerats som mest ca 7 %. De flesta prover hade komprimerats mellan 4,5–7 %. En del prover har komprimerats väldigt lite, som t ex 40:30:B, 28:30:A. Anledningen kan vara att stämpan inte har kunnat röra sig fritt, dvs. den har inte kunnat pressa provet. Prov 30:30:30, dvs. vars slam har torkat innan tillverkningen av provet, uppvisar mindre sättningsbenägenhet än de flesta övriga prov.

Provet utan flygasketillsats som förvarades vid en temperatur på 15°C uppvisade svällningar. Det tyder på att biologiskaktivitet har pågått. De övriga prover som förvarades vid samma temperatur har inte svällt, utan istället komprimerats. Asktilsatsen höjer pH, vilket hämmar den biologiska aktiviteten.



Figur 4.1 . Sättningsförlopp för en del 30-dagarsprover.

A.5 Permeabilitet

CRS-försök utfördes på 7 prover för att undersöka permeabiliteten. Samtliga prover uppvisade mycket låga värden. Permeabiliteten låg mellan $0,7\text{--}2,0 \cdot 10^{-10}$ m/s. Det går inte att säga att permeabiliteten ökar med ökad mängd flygaska utifrån dessa resultat. Det finns inte heller någon skillnad mellan 1-dagars- och 30-dagarsproverna.

A.5.1 Jämförelse mellan olika avloppsslam och flygaskor

Resultaten i detta kapitel är, förutom denna rapport, hämtade från Cronquist (2002), Lenströmer (2002) och bilaga B-Avloppsslam som linermaterial Laboratieförsök: avloppsslam stabiliserat med flygaska från Vattenfall Värme Uppsala.

I följande avsnitt kommer en jämförelse mellan olika laboratieförsök där olika flygaskor och avloppsslam har använts. Laboratieförsök har utförts på:

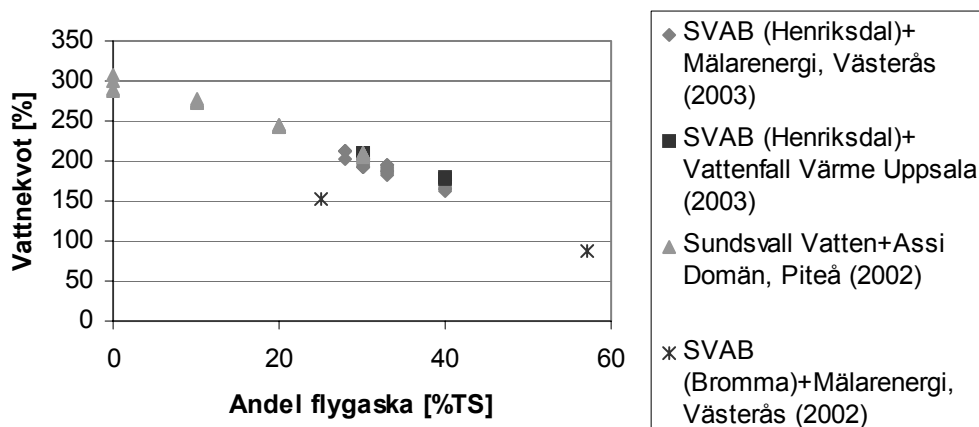
- Avloppsslam från Stockholm Vatten AB (Henriksdals reningsverk) och flygaska från Mälarenergi, Västerås (2003)
- Avloppsslam från Stockholm Vatten AB (Henriksdals reningsverk) och flygaska från Vattenfall Värme Uppsala (2003)
- Avloppsslam från Stockholm Vatten AB (Bromma reningsverk) och flygaska från Mälarenergi, Västerås (2002)
- Avloppsslam från Sundsvall Vatten AB och flygaska från Assi Domän, Piteå (2002)

Två laboratieförsök har utförts med flygaska från samma askleverantör, Mälarenergi i Västerås och med avloppsslam vid det första tillfället (2002) från Bromma reningsverk och vid det senare tillfället från Henriksdals reningsverk. Vattenkvoten på avloppsslammet från Bromma reningsverk var ca 203 % (TS-halt =33 %), medan vattenkvoten på avloppsslammet från Henriksdals reningsverk var 317 % (TS-halt =24 %) vid laborietillfällena. Vattenkvoten på avloppsslammet från Henriksdals reningsverk var även 317 % (TS-halt =24 %) vid laborietillfället då flygaska från Vattenfall Värme Uppsala användes. Avloppsslammet från Sundsvall Vatten hade också en vattenkvot på 317 % (TS-halt 24 %).

A.5.2 Vattenkvot

Vid jämförelse mellan vattenkvoten på de olika blandningarna, kan det sägas att vattenkvoten minskar linjärt med ökad andel flygaska. De blandningar med avloppsslam från Stockholm Vatten AB (Bromma reningsverk) och flygaska från Mälarenergi har lägre vattenkvot än de övriga blandningarna. Anledningen till detta är att vattenkvoten på avloppsslammet vid detta tillfälle är lägre än hos de övriga avloppsslammen. Se figur 5.1.

Vattenkvot vs andel flygaska

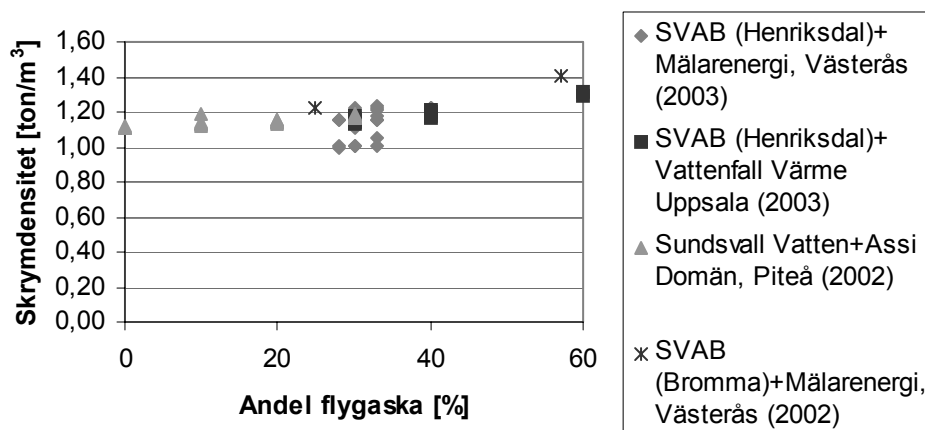


Figur 5.1 Vattenkvot vs andel flygaska.

A.5.2.1 Skrymdensitet

Blandningar med avloppsslam från Stockholm Vatten AB (Henriksdal) och flygaska från Mälarenergi har lägre skrymdensitet än de övriga blandningarna. I övrigt ökar skrymdensiteten något med ökad mängd flygaskatillsats.

Skrymdensitet vs andel flygaska



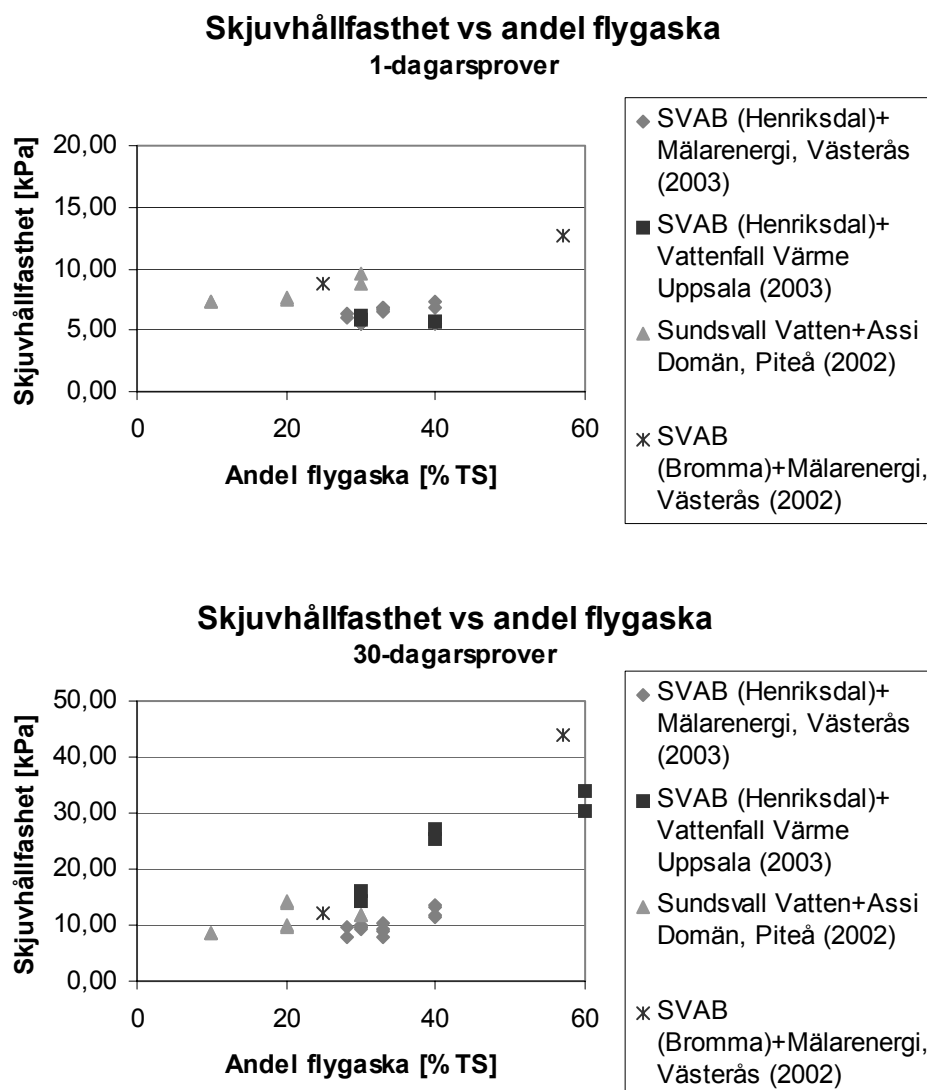
Figur 5.2 Skrymdensitet vs flygaska.

A.5.2.2 Skjuvhållfasthet

Vid jämförelse mellan skjuvhållfastheten på de olika blandningar kan generellt sägas att de blandningar med avloppsslam från Sundsvall Vatten AB och flygaska från Assi Domän, Piteå, samt blandningar med avloppsslam från Stockholm Vatten AB (Bromma reningsverk) och flygaska från Mälarenergi uppvisar högre skjuvhållfasthet än de övriga blandningar vid lika blandningsförhållanden för 1-dagarsproverna. Att avloppsslammet från Stockholm Vatten AB (Bromma reningsverk) med flygaska från

Mälarenergi har högre skjuvhållfasthet kan förklaras med att avloppsslammet har lägre vattenkvot än de övriga slammen. Svårare är det däremot att förklara varför blandningarna med avloppsslam från Sundsvall Vatten AB med flygaska från Assi Domän har högre skjuvhållfasthet.

Blandningarna med avloppsslam från Stockholm Vatten (Henriksdals reningsverk) och flygaska från Vattenfall Värme Uppsala har den största ökningen i skjuvhållfasthet från 1 till 30 dagars härdning.

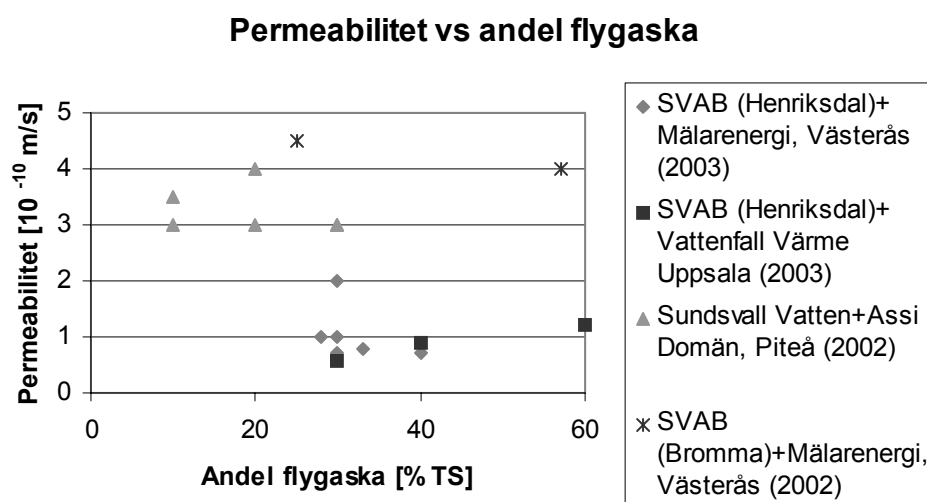


Figur 5.3 och 5.4 Skjuvhållfasthet vs andel flygaska för 1-dagarsprover respektive 30-dagarsprover.

A.5.2.3 Permeabilitet

Avloppsslammet från Stockholm Vatten AB (Henriksdals reningsverk) med flygaska från Mälarenergi och Vattenfall Värme Uppsala har de lägsta permeabilitetsvärdena, men samtliga blandningar klarar kravet för *deponier med icke farligt avfall* (klass 2) där

maximala genomsläppligheten får vara 50 l/m² och år vilket motsvarar ca 1x10⁻⁹ m/s på plana ytor.



Figur 5.5 Permeabilitet vs andel flygaska.

A.6 Referenser

Avdelningen för geoteknik (1996). *Laboratoriehandledning för grundkursen i geoteknik*. Luleå tekniska universitet, Institutionen för väg- och vattenbyggnad, Luleå.

Cronquist S (2002). *Alternativa material i Stockholms län – Askstabilisering av avloppsslam*. Examensarbete 2002. Kungliga tekniska högskolan, Institutionen för Mark- och vattenteknik, Stockholm.

Lenströmer S (2002). *Avloppsslam som tätskikt på avfallsdeponier*. Examensarbete 2002:284 CIV. Luleå tekniska universitet, avdelningen för geoteknik, Luleå.

Pousette K (2001). *Stabilisering av torv – Olika faktorerers inverkan på stabiliseringseffekten*. Licentiatuppsats 2001:06. Luleå tekniska universitet, avdelningen för geoteknik, Luleå.

Scandiaconsult Sverige AB (2001). *Slam i mark- och anläggningsbyggande- Avvattnat vattenverks- och avloppsslam*. Stockholm Vatten AB.

Vägverket (1999). *Användning av restprodukter i vägbyggnad*. Publikation 1999:161. Vägverkets tryckeri, Borlänge.

B Avloppsslam som linermaterial – Laboratorieförsök: avloppsslam stabiliserat med flygaska

B.1 Inledning

Laboratorieförsök har utförts, på blandningar med avloppsslam från Stockholm Vatten och flygaska från Vattenfall Värme Uppsala, för att undersöka möjligheten att använda blandningen som linermaterial på deponier. Blandningsförhållandena på proverna som har undersökts har varit 30/70, 40/60 och 60/40 (TS) för flygaska/avloppsslam. Blandningar med förhållandet 60/40 har endast utförts efter 30 dagars härdning. Notera att inblandningsförhållandet avser TS-halten och inte de ingående materialens våta vikt eller skrymvolym. Hädanefter benämns *Flygaska Stabiliserat Avloppsslam*, FSA. FSA30 innebär att blandningen består av 30 % (TS) flygaska osv.

Försöken utfördes med avloppsslam från Stockholm Vatten AB (Henriksdals reningsverk). Avloppsslammets TS-halt låg på ca 24 %.

Vattenkvot, skrymdensitet och skjuvhållfasthet undersöktes för gjorda blandningar. Skjuvhållfastheten bestämdes med enaxligt tryckförsök. Enaxligt tryckförsök utfördes en respektive 30 dagar efter tillverkning av proverna. Även CRS-försök utfördes på de prover som härdat 30 dagar. Dubbelprover har gjorts, dvs. två prover från varje blandning (ej för CRS).

B.2 Resultat från 1-dagarsproverna

Resultaten från 1-dagarsproverna redovisas i tabell 1.

Vattenkvoten på avloppsslammets som användes vid laboratorieförsöket var ca 312 % (TS-halt =24 %).

Vattenkvoten på FSA30 var ca 211 % (TS-halt =32 %) och FSA40 var mellan 177 och 179 % (TS-halt =36 %).

Skrymdensiteten på de tillverkade proverna varierade mellan 1,13 och 1,18 ton/m³. Skrymdensiteten var något högre hos FSA40 än hos FSA30. Observera att skrymdensiteten är bestämd på slamblandningar som är packade i provtuber.

Den odränerade skjuvhållfastheten för FSA30 var 6,2 respektive 5,8 kPa. Skjuvhållfastheten för FSA40 uppvisade en skjuvhållfasthet på 5,7 kPa. Hållfastheten skiljer sig inte nämnvärt mellan de olika blandningarna (FSA30 och FSA40) efter en dag. Inget brott har uppstått under försöken, istället har skjuvspänningen vid 15 % deformation använts som brottvärde.

Tabell 1. Sammanställning av resultaten från 1-dagars proverna. Det första talet i provbeteckningarna visar hur stor andel flygaska som är inblandat, det andra talet visar hur många dagar provet har härdat. E står för att enaxligt tryckförsök har utförts.

Prov	Vattenkvot [%]	TS-halt [%]	Skrymdensitet [ton/m ³]	τ_{fu} [kPa]
30:1:E:	211,10	32,1	1,14	6,21
30:1:E:	210,80	32,2	1,13	5,83
40:1:E:	176,9	36,1	1,17	5,68
40:1:E:	179,20	35,8	1,18	5,68

B.3 Resultat från 30-dagarsproverna

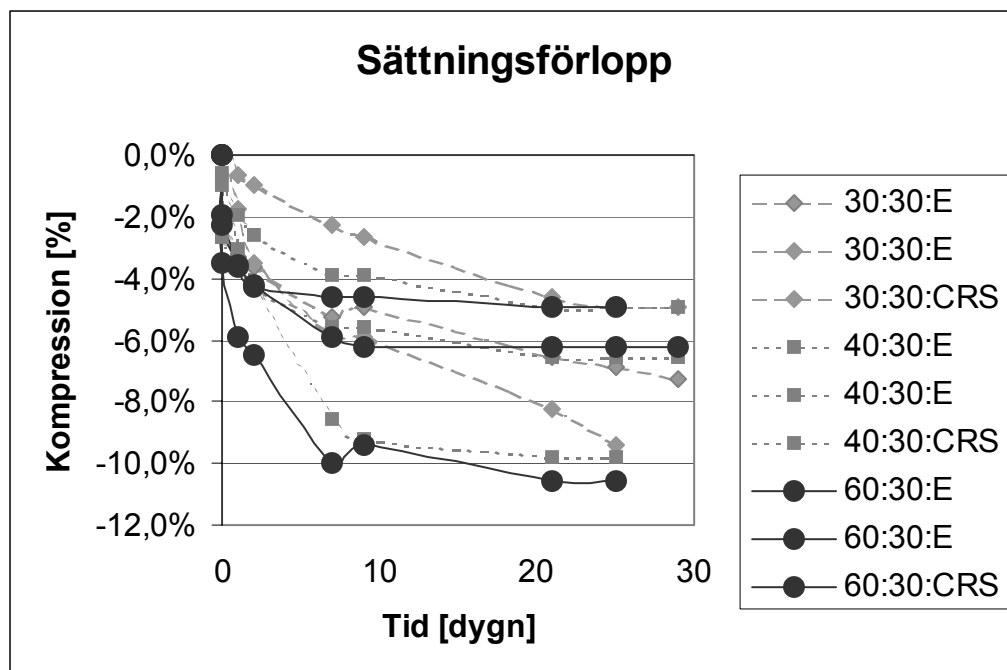
Resultaten redovisas i tabell 2.

Vattenkvot på FSA30 var ca 201 % (TS-halt =33 %), FSA40 var 175–178 % (TS-halt =36 %) och FSA60 var 115–116 % (TS-halt =46 %).

Skrymdensiteten på de tillverkade proverna varierade mellan 1,13 och 1,27 ton/m³. Skrymdensiteten ökar med ökad mängd flygaska inblandat. Observera att skrymdensiteten är bestämd på slamblandningar som är packade i provtuber.

Den odränerade skjuvhållfastheten för FSA 30 var 14 respektive 16 kPa. Skjuvhållfastheten för FSA40 var 25 och 27 kPa. För FSA60 var skjuvhållfastheten 30 respektive 34 kPa. Efter 30 dagars härdning finns en markant skillnad mellan blandningarnas (FSA30-FSA60) skjuvhållfasthet. Skjuvhållfastheten ökar med ökad mängd flygaska. I samtliga fall har brott uppstått vid det enaxliga tryckförsöket. Brotten uppstod mellan 14 och 8 % kompression. Ju mer flygaska desto mindre kompression krävdes för att brott skulle uppstå.

Under härdningstiden belastades proverna med en vikt motsvarande ca 1 m morän (20 kPa). Proverna förvarades i kylskåp (8°C). Pga. belastningen komprimerades proverna under härdningstiden, denna kompression avlästes kontinuerligt under härdningstiden. Proverna komprimerades mellan ca 5 och 10 %, se figur 1.



Figur 1. Sättningsförlopp på 30-dagarsproverna.

Med hjälp av CRS-försök har permeabiliteten på 30-dagarsproverna uppskattats. Permeabiliteten är mycket låg, mellan ca $6 \cdot 10^{-11}$ till ca $1 \cdot 10^{-10}$ m/s, se bilaga B.2. Permeabiliteten ökar med ökad mängd flygaska inblandat, men i det här fallet saknar det betydelse, då värdena är ca 10–50 gånger lägre än vad som krävs av ett tätskikt på "deponier för icke farligt avfall".

Tabell 2. Sammanställning av 30-dagarsförsöken. Det första talet i provbeteckningarna visar hur stor andel flygaska som är inblandat, det andra talet visar hur många dagar provet har härdat. E står för att enaxligt tryckförsök har utförts. CRS står för att CRS-försök har utförts.

Prov	Vattenkvot [%]	TS-halt [%]	Skrymdensitet [ton/m ³]	τ_{fu} [kPa]	Kompression vid brott [%]	Permeabilitet [10 ⁻¹⁰ m/s]
30:30:E	201,1	33,2	1,16	16,15	14,23	
30:30:E	200,7	33,3	1,13	14,31	12,78	
30:30:CRS						0,56
40:30:E	175,0	36,4	1,17	27,05	10,53	
40:30:E	177,8	36,0	1,18	25,39	7,85	
40:30:CRS						0,90
60:30:E	115,1	46,5	1,27	33,88	8,75	
60:30:E	116,4	46,2	1,27	30,46	8,85	
60:30:CRS						1,2

B.4 Sammanfattning

En sammanställning av resultaten kan ses i bilaga B.1.

Skjuvhållfastheten ökar markant från 1 dag till 30 dagars härdning, samtidigt som skjuvhållfastheten ökar med ökad mängd flygaska efter 30 dagars härdning. Vid jämförelse från tidigare laborieförsök där samma avloppsslam men en annan flygaska (Mälarenergi) användes är skjuvhållfastheten likvärdig efter en dag mellan de olika blandningarna, medan efter 30 dagars härdning uppvisar blandningar med flygaska från Vattenfall Värme Uppsala högre skjuvhållfasthet.

FSA40 och FSA60 efter 30 dagars härdning har en skjuvhållfasthet som är tillräckligt hög för att blandningen skall kunna användas som linermaterial på deponier. Avloppsslam med högre TS-halt (>30 %) kan ge tillräckligt hög skjuvhållfasthet redan från dag 1.

Permeabiliteten är mycket låg för samtliga blandningar, kring ca 10^{-10} m/s. För tätskikt på ”deponier för icke farligt avfall” får genomsläppligheten ej överstiga 50 l/m² och år, detta kan likställas med en permeabilitet på 10^{-9} m/s på plana ytor.



Box 47607 117 94 Stockholm

Tfn 08-506 002 00

Fax 08-506 002 10

E-post svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se