

Pilotförsök med flygkastabiliserat avloppsslam (FSA) som tätskikt.

Josef Mácsik, Christian Maurice, Agnes Mossakowska och Caroline Eklund

**Pilotförsök med flygaskastabiliserat avloppsslam
(FSA) som tätskikt.**

**Pilot study with fly ash stabilised sewage sludge as
hydraulic barrier layer**

Josef Mácsik, Christian Maurice, Agnes Mossakowska och Caroline
Eklund

Projektnummer Q4-237

VÄRMEFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM
Oktober 2005
ISSN 0282-3772

Abstrakt

Det finns restmaterial som har tekniska och miljömässiga egenskaper som gör dem lämpliga att använda vid sluttäckning av deponier. Genom att stabilisera rötat avloppsslam med flygaska har ett tätskiktsmaterial utvecklats. Avloppslammet är biologiskt nedbrytbart men genom tillsats av flygaska reduceras nedbrytningshastigheten.

Sammanfattning

Det finns ett stort antal äldre deponier som ska avslutas under den närmaste fem – tioårsperioden genom sluttäckning. Sluttäckningskonstruktioner som helhet och de valda tätskikten i synnerhet ska reducera lakvattenbildningen och därmed minska den potentiella utlakningen till omgivningen under en lång tidsrymd. Tidigare utredningar har visat att ett flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) har en stor potential att kunna användas som tätskikt vid sluttäckningar. Det föreliggande projektet syftar till att närmare utreda frågeställningar där FSA-materialet nyttjas i ett pilotförsök kring bl. a. följande punkter:

- Tillverkning och utläggning, dvs. verifiera lämpliga blandningar och de resurser som erfordras för att utföra arbetet med bibehållen god ekonomi inför framtida regelmässiga tillämpningar.
- Teknisk funktion och miljöegenskaper, dvs. verifiera täthet, hållfasthet, sättningsbenägenhet samt miljöegenskaper som lakbarhet.
- Beständighet, som är en nyckelfråga för deponiägaren och miljömyndigheter för att säkerställa långtidsstabiliteten hos tätskiktet utifrån ett flera hundra års perspektiv.

Vid pilotförsöket tillverkades ca 1 500 ton FSA som användes som tätskikt med 0,5 – 0,55 m mäktighet på en yta av drygt 2 400 m² på deponin Dragmossen i Älvkarleby kommun. Parallellt med pilotförsöket utfördes nedbrytningsförsök på laboratorium för att närmare utvärdera FSA-materialets beständighet.

Fältförsöken visar att FSA-material, tillverkat med de aktuella flygaskorna och avloppsslammet, kan användas som tätskikt i stor skala. Det ställdes dock höga kvalitetskrav på de ingående materialens vattenkvot/torrdensitet. Materialblandningens homogenitet, hållfasthet och täthet uppfyller därmed ställda kvalitetskrav. Fältförsöket visar vidare att det är möjligt att lagra flygaska och avloppsslam under en till två veckors tid för att kunna tillverka FSA kampanjvis. Vid blandning av flygaska och avloppsslam uppstår luktproblem, bl.a. på grund av ammoniakavgång, vilket ska beaktas vid fullskalig användning. Luktproblemen upphör efter det att dräneringsskiktet är installerat. Utlakning av metaller från FSA-skiktet är begränsad. Både laboratorie- och fältförsök indikerar att FSA har en beständighet som motsvarar flera hundra år. FSA bör därmed kunna nyttjas med god ekonomi som tätskikt i sluttäckningskonstruktioner på icke-farligt avfall.

Fältundersökningen bör följas upp för att verifiera de slutsatser som dragits, speciellt med avseende på materialets beständighet och täthet i ett ännu längre tidsperspektiv. För en praktisk och regelmässig användning av FSA i sluttäckningskonstruktioner är det lämpligt att ta fram en handbok då materialet inte kan direkt jämföras med de gängse. Handboken bör ta upp följande: kritiska moment vid dimensionering, tillverkning, utförande samt kontroll och uppföljning för att sprida vunna erfarenheter från detta och andra liknande projekt till aktörer i branschen.

Sökord: deponi, tätskikt, flygaska, avloppsslam, täthet, beständighet, hållfasthet, avfall, pilotförsök

Summary

A lot of landfills will be closed and finally covered during the next five to ten years. The design and construction of final closure caps, especially the landfill liner, are carried out to reduce the amount of water percolating through the landfill as to minimize the effect on the surrounding environment for a long time span. Earlier studies has indicated that sewage sludge stabilized with fly ash, resulting in a product called FSA, has a good potential to be used as landfill liner 000000 and 0. In this project a large field test with FSA was carried out at a landfill under closure. The objective of the project was to study the following in depth:

- Manufacturing and construction regarding mainly technical and economical aspects.
- Permeability, stability and settlement as well as leachability.
- Durability, a key aspect. Environmental authorities advice that a closure cap shall guarantee function for several hundreds of years.

The field tests were conducted at the landfill Dragmossen which is located south of Älvkarleby in Sweden. During the field test approximately 1 500 tonnes FSA was manufactured. The FSA liner was installed on an area of 2 400 m² with a thickness of 0,55 m. Parallel to the ongoing investigations at the landfill, laboratory studies were carried out to study the rate of biological decomposition of the liner.

The results show that the manufactured FSA can be used as landfill liner in a large scale. The homogeneous quality, strength and low permeability of FSA is even better than the set criteria. The demands on the contained materials, fly ash and sewage sludge, are high and have to fulfil certain quality requirements for example regarding the water and dry solid content. The field test also showed that it is feasible to store fly ash and sewage sludge during at least two weeks to enable manufacturing in a larger scale. Mixing fly ash and sewage sludge will result in an odour due to bad smell and exit of ammonium gases. The odour fades away quickly after the liner has been covered. The odour must, however, be handled carefully in a full scale production. Leaching of metals from the FSA liner was found to be negligible. Laboratory and field tests indicate both that the FSA liner will be durable for several hundred years. Furthermore the cost benefits of using an FSA liner are likely to be favourable.

Additional studies should be carried out in order to verify the conclusions presented in this report especially regarding durability and permeability aspects. Thereafter it is of concern to develop design- and construction guidelines for the FSA liner as the product is different to the traditional products in use today and the manufacturing and construction demands are high.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSOMRÅDET	1
1.3	MÅL OCH MÅLGRUPP	3
2	UTFÖRANDE AV PILOTFÖRSÖKET.....	5
2.1	ALLMÄNT	5
2.2	PLANERING	7
2.3	UTFÖRANDE	7
2.4	INSTRUMENTERING	15
2.5	KONTROLL AV ENTREPRENADARBETET	17
2.6	BESTÄMNING AV TS-HALT I FÄLT	18
2.7	LABORATORIEANALYSER	18
2.8	ANALYSER	19
3	RESULTAT/ERFARENHETER	20
3.1	ALLMÄNT	20
3.2	TEKNISK FUNKTION, MILJÖEGENSKAPER OCH UTFÖRANDE	20
3.3	BESTÄNDIGHET.....	30
3.4	EKONOMISK BEDÖMNING	35
4	RESULTATANALYS	36
4.1	KVALITET VS HOMOGENITET	36
4.2	BESTÄNDIGHET.....	37
4.3	PERMEABILITET	40
5	SLUTSATSER.....	43
6	REKOMMENDATIONER	47
7	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSARBETE.....	48
8	LITTERATURREFERENSER	49

Bilagor

BILAGA A – DAGBOK FRÅN PILOTFÖRSÖKET

BILAGA B – BESTÄNDIGHET – LABORATORIE- OCH FÄLTFÖRSÖK

BILAGA C – UPPFÖLJNING I FÄLT

BILAGA D – SLANGSÄTTNINGSMÄTNING

BILAGA E – FLYGASKORNAS INNEHÅLL AV METALLER

BILAGA F – SLAMTILLVERKNING OCH BEHANDLING PÅ STOCKHOLM VATTEN

1 Inledning

1.1 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 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.

Vid rening av avloppsvatten och förbränning av biobränsle produceras materialen avloppsslam respektive bioaska. Stora mängder av dessa produkter deponeras idag. Det finns intresse för att utveckla alternativa avsättningsmetoder för både avloppsslam [1], 0,0,0,0,0, 0 och bioaska 0 för att säkra den framtida avsättningen på ett miljöriktigt och ekonomiskt motiverat sätt.

Tidigare laboriearbeten visar att rötat avloppsslam har låg permeabilitet, låg hållfasthet och hög vattenkvot, samt beroende av dess konsistens är ett besvärligt material ur hanteringssynpunkt [1], [7]. Avloppsslam stabiliserat med flygaska ger ett material som har låg permeabilitet, och slammets låga hållfasthet förbättras, [1]. I värmeforskrapporten 837 [1] förbereddes ett pilotförsök genom att lämpliga blandningsförhållanden togs fram för att uppnå adekvat täthet, hållfasthet och beständighet. Tidigare arbeten visar också att kunskapsunderlaget avseende nedbrytning är begränsat [11].

1.2 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

Pilotförsöket utfördes i syfte att visa hur *flygkastabiliserat avloppsslam* (FSA) fungerar under fältmässiga förhållanden. Till fältförhållandena som studeras hör

- lagring och uppläggning av flygaskor och avloppsslam,
- blandning av flygaska och avloppsslam,
- transport och utläggning av tillverkat FSA-material,
- funktioner som täthet, sättningsbenägenhet och beständighet.

FoU-projektet finansierades med medel från följande finansiärer:

Värmeforsk

ÅFORS

VA-forsk

RVF

RTK

Älvkarleby kommun

Vattenfall AB, Värme Uppsala

Mälarenergi AB, Kraftvärmeverket i Västerås

Stockholm Vatten AB

Econova AB

Ramböll Sverige AB

1.2.1 Parallella projekt

Nedan ges det en kort sammanfattning av de parallella projekt med anknytning till avloppsslam och flygaska och som finansieras med medel från bla Värmeforsk, VA-forsk och RVF.

Nedbrytningshastigheten för tätskikt uppbyggda av slam och aska (Q4-230) [12]

Beständigheten för ett tätskikt av slam och aska beror på nedbrytningen av slammet. Det finns mycket begränsade resultat från tidigare studier kring hur snabbt (långsamt) det organiska materialet bryts ned vid höga pH, vilket beror på en relativt stor andel aska i blandningen. Det kvarstår alltså en viktig frågeställning som måste besvaras innan blandningar av aska och slam börjar användas storskaligt. Projektet Q4-230 har två målsättningar, dels att klargöra hur lång tid ett tätskikt uppbyggt av slam och aska kommer att vara stabilt och dels genomföra en mindre förstudie för att lägga grunden för storskaliga försök.

Resultaten från projektet ska kunna nyttjas av deponiägare som planerar sluttäckning, askproducenter, konsulter samt myndighetspersoner som arbetar med tillståndsärenden.

Askor och rötslam som tätskikt för gruvavfall (Q4-146) [13]

En av de viktigaste punktkällorna för metalläckage i Sverige är gruvavfall. En åtgärd som kan vidtas för att minska metalläckaget är täckning vilket reducerar lakvattenbildningen och därmed minskar utläckaget av surt och metallrikt lakvatten. Lämpliga täckmaterial är en bristvara och hämtning av morän och lera från naturen kan också orsaka olägenheter och skador på landskapet.

Studier visar att slam och aska är lämpliga täckmaterial för deponier. Vid täckning av gruvavfall med slam och aska skulle flera positiva effekter kunna uppnås, eftersom samtidigt som lakvattenbildningen minskar buffrar askans höga pH det sura lakvatten som bildas från gruvavfallet.

I Ervalla utanför Örebro har ett område med gruvsand täckts med aska och slam [14]. Detta område ger en unik möjlighet att i fält studera fördelar och/eller risker med att täcka gruvavfall med aska och slam. I denna rapport (Q4-146) redovisas en sammanfattning av etapp 1 av projektet. Fokus har i denna etapp legat på att karakterisera täckmaterialet samt att starta ett kontrollprogram för området.

Sammanfattningsvis kan sägas att det finns indikationer på att täckning av gruvavfall med aska och slam minskar utläckaget av vissa metaller och ökar utläckaget av några få metaller. De metaller som tycks minska är järn, nickel, kobolt och bly. De metaller som eventuellt ökar är arsenik, barium, krom och koppar.

Täckning av deponier med blandning av avloppsslam och aska – etapp 2 (Q4-225) [14]
Projekt Q4-225 har som syfte att bana väg för ett bättre resursutnyttjande av avloppsslam och bioaska. Genom laboratorieförsök och fältförsök kommer lämpliga blandningar avloppsslam och aska från biobränsleförbränning tas fram. Erfarenheter från det praktiska handhavandet i fält kommer dokumenteras och hydrauliska egenskaper och långsiktig beständighet kommer verifieras och kvantifieras. Slutligen kommer projektet att kunna rekommendera möjliga tekniker för återvinning av näringsämnen i samband med blandningsförfarandet.

Resultaten ska kunna utgöra underlag för rekommendationer för utformning av tätskiktsskonstruktioner och blandningsförfarande samt utläggning.

1.3 Mål och målgrupp

Avloppsslam är ett material som är lättillgängligt 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 tätskiktmaterial. Producenter av avloppsslam och flygaska, kommuner, miljömyndigheter, deponiägare, konsulter och entreprenörer är målgruppen som kommer att ha direkt nytta av det arbete som presenteras i denna studie. Målet med pilotförsöket var att kvarstående frågeställningar ska kunna besvaras. Dessa avser primärt materialets:

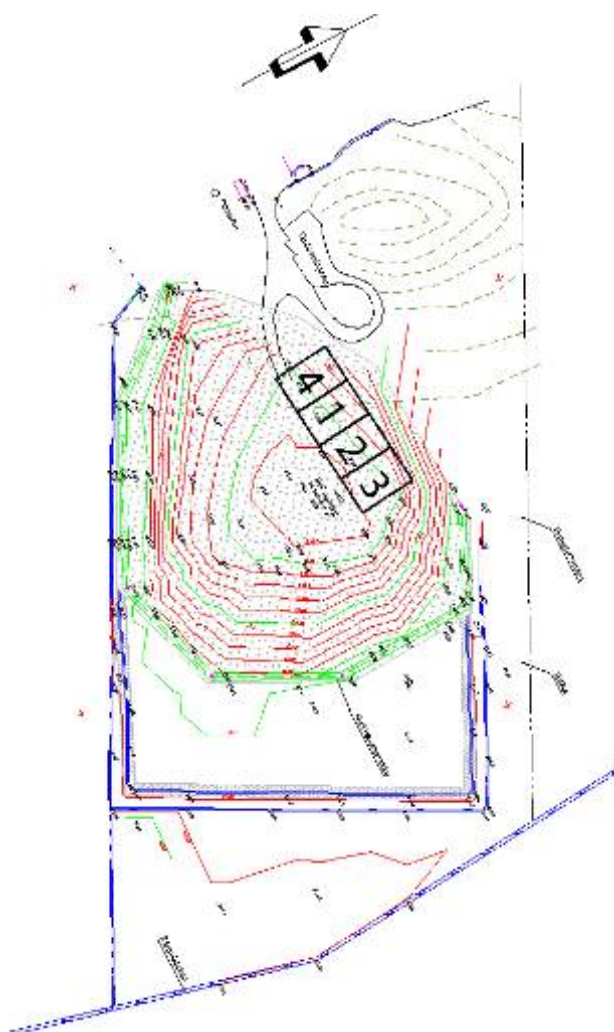
- **Beständighet**
Beständigheten är en nyckelfråga för deponiägaren och miljömyndigheter för att säkerställa långtidsstabiliteten hos materialet.
- **Teknisk funktion och miljöegenskaper**
Teknisk funktion som genomsläpplighet (permeabilitet), hållfasthet, sättningsbenägenhet, samt miljöegenskaper som lakbarhet, innehåll etc. är frågor som behandlas och utvärderas i denna rapport.
- **Tillverkning och utläggning**
Utförandet är centralt, dvs. verifiering av tekniken, den lämpliga blandningen och de resurser som erfordras för att utföra arbetet med bibehållen god ekonomi inför en framtida regelmässig tillämpning.

Förhoppningen är att projektet kommer att utgöra en god grund för att i fortsättningen kunna sammanställa resultat och erfarenheter i en handbok som är tillgänglig för alla intressenter.

2 Utförande av pilotförsöket

2.1 Allmänt

Fältarbetet utfördes på Dragmossens avfallsdeponi i Älvkarleby kommun, 3 km söder om Älvkarleby. Cirka 2400 m² av deponin har täckts med FSA som tätskikt. Tätskiktet lades ut mellan den 13 och 19 maj 2004 och under de påföljande veckorna installerades skyddsskikt på provytan. Parallellt fältundersökningen pågick en laboratorieundersökning för att utreda FSA-materialets biologiska beständighet mot nedbrytning. Laboratorieundersökningen utfördes av Upplagsgruppen, Institutionen för Samhällsbyggnad, Luleå tekniska universitet. Utformningen av provytor framgår av figur 2.1.



Figur 2.1 Dragmossens deponi med försöksyta och indelning i provytor 1 – 4.
Figure 2.1 Pilot test with cells 1 to 4 at the waste site Dragmossen.

Tätskiktet kontrollerades och följdes upp med avseende på tekniska och miljötekniska aspekter. Sättningar, permeabilitet (mätt i fält som genomsläpplighet av vatten), skjuvhållfasthet, biologisk aktivitet etc. följdes upp under ca 1 år. Pilotförsöket gav

viktiga drifttekniska erfarenheter gällande tillverkning, transport och utläggning av materialet. De arbeten som genomfördes ligger till grund för en uppdaterad kostnadsbedömning. Parallellt med pilotförsöket utfördes även kompletterande laboratorieundersökningar med avseende på biologisk nedbrytbarhet.

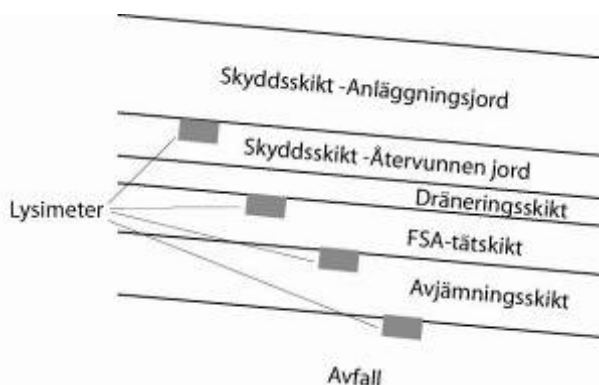
En detaljerad beskrivning avseende pilotförsöket finns sammanställt i Stockholm Vattens rapport nr 21 - 2003. Pilotförsöket genomfördes i följande etapper:

Planering

- Arbetsberedning inför utförandet (bygghandling, upphandling och samordning av aktiviteter, mm.)
- Anmälan till miljökontor

Utförande (se figur 2.2)

- Utsättning av försöksytan
- Utläggning av avjämningsskikt ovanpå avfallet
- Tillverkning av tätskiktsmaterialet FSA
- Utläggning av tätskikt, FSA-materialet
- Utläggning av överliggande tätskiktskonstruktion, dräneringsskikt och skyddsskikt
- Instrumentering (installation av mätutrustning)
- Kontroll, dokumentering och uppföljning under utförandet
- Undersökning i laboratorium på framtagna FSA-materials beständighet



Figur 2.2 Schematisk bild av tätskiktskonstruktionen med installerade lysimetrar i respektive skikt.

Figure 2.2 Schematic picture of the barrier construction and installed lysimeters.

Kontroll och uppföljning

- Kontroll och uppföljning efter utförandet, t ex med avseende på materialtekniska egenskaper och gasbildning i de olika skikten i tätskiktskonstruktionen. Detta arbete pågick i ca 1 år efter utläggning.
- Verifiering av ekonomi

2.2 Planering

Arbetsberedning inför utförandet så som bygghandling, upphandling och samordning av aktiviteter, mm. förbereddes av Econova i samarbete med Ramböll. Den maskinpark som användes i projektet var en hjullastare, en grävmaskin, två lastbilar, en hjullastare med rotorskopa, en tvångsblandare samt en traktor med vagn. För utläggning av avjämningskiktet och tillverkning av vallar avsattes två veckors arbete. Till blandning och utläggning av FSA-materialet avsattes två veckor för att kunna avbryta blandning och utläggning om luktstörning skulle drabba de närboende. För utläggning av de resterande skikten avsattes ytterligare två veckors arbete. Under de utsatta tiderna installerades även kontroll- och mätutrustning. Material som åtgick till försöket är avloppsslam som inkom till anläggningen fyra veckor innan blandningen av FSA-materialet fram till blandningsveckan och flygaska till FSA-materialet inkom samma vecka som blandningen beräknades starta. Dräneringsmaterialet inkom till deponin under en tvåveckors period innan utläggningen av materialet. Schaktmassor, 100 % återvunnen jord och fibermull fanns sedan tidigare lagrade på deponin och återvinningsanläggningen.

Innan försöket startades gjordes en anmälan för projektet till bygg- och miljökontoret i Älvkarleby av Econova. Projektplanen och Värmeforskrapport 837 [1] användes som bilaga till anmälan för att beskriva utförandet av försöket.

Undersökning i laboratorium på framtagna FSA-materials beständighet startades upp på Luleå tekniska universitets Biolab. Fokus låg på FSA-materialets beständighet och lakbarhet.

2.3 Utförande

2.3.1 Utläggning av avjämningskikt

Den aktuella deponiytan har avjämnats genom utläggning av ett ca 0,5 m tjockt avjämningskikt. Lutningen på avjämningskiktet är normgivande för den slutliga ytans lutning. I avjämningskiktet har det installerats 2 st lysimetrar på provyta 3 för att kontrollera avjämningskiktets effekt på tätskiktets totala täthet, dvs. genomsläpplighet. Lagrad flygaska från Mälarenergi Västerås användes som konstruktionsmaterial i avjämningskiktet. Flygaskan lades ut 5 m utanför cellernas utsatta yta. På provytans norra och västra sidor lades det ut en vall av fibermull tillverkad av Econova, figur 2.3. Vallens höjd låg i nivå med dränsiktets överyta. Syftet med vallen var att ha en mothållande kraft vid eventuell låg hållfasthet hos tätskiktsmaterialet.



Figur 2.3 Avjämningskikt över hela provytan, med vallen installerad på norra sidan av provytan.

Figure 2.3 Pre-cover layer for the test area, the bank is installed to the north side of the test area.

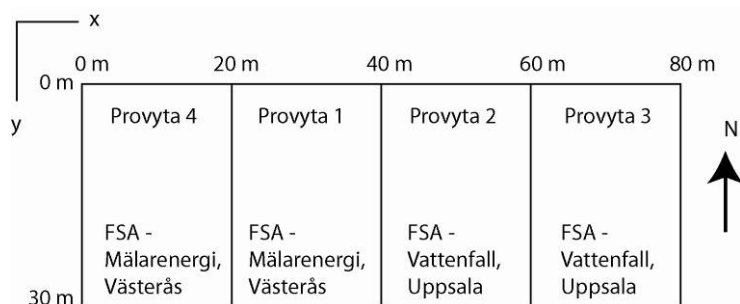
2.3.2 Utsättning av provytorna

Innan provytorna sattes ut lades ett lager med flygaska från Mälarenergi Västerås ut på den tänkta försöksytan. Flygaskan användes som avjämningskikt för att få en stabil arbetsyta och för att erhålla provytornas lutning, framgår av figur 2.5a. Försöket består av 4 provytor som är $20 \times 30 \text{ m}^2$ stora. Vid bestämning av provytornas lutning avvägdes varje provytas hörn för att få nivåskillnaden. Vid avvägningen som gjordes av dräneringsskiktet avvägdes även en punkt mellan varje hörn, figur 2.5b. Pilarna i figur 2.5 a & b representerar avrinningsriktningen, där pilens längd är proportionell mot lutningen.

Avvägningen utfördes dels efter att avjämningsmaterial lagts ut på försöksytan (innan tätskiktet installerats) dels efter att dräneringsskiktet lagts ut. Gävle kommun anlätades för inmätning av försöksytans hörn i GH 55-systemet.

Försöksytan indelades i fyra provytor enligt ritningen nedan, figur 2.4, med följande koordinater:

- Provyta 4 – $x = 0 - 20 \text{ m}$ och $y = 0 - 30 \text{ m}$.
- Provyta 1 – $x = 20 - 40 \text{ m}$ och $y = 0 - 30 \text{ m}$.
- Provyta 2 – $x = 40 - 60 \text{ m}$ och $y = 0 - 30 \text{ m}$.
- Provyta 3 – $x = 60 - 80 \text{ m}$ och $y = 0 - 30 \text{ m}$.



Figur 2.4 Försöksytans koordinater och ingående material.

Figure 2.4 The test sites coordinates and used FSA material.

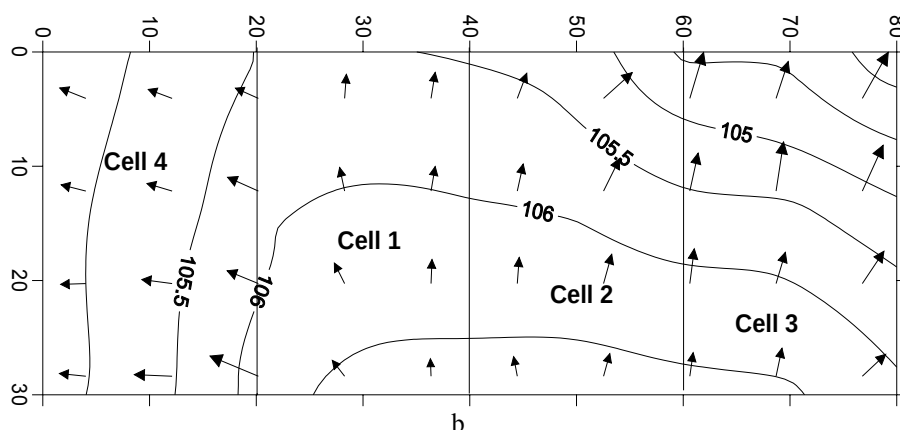
Avjämningsytans lutning

Lutningen för provyta 4 varierade mellan ca 1:12 till 1:30 västlig riktning.

Lutningen för provyta 1 varierade mellan ca 1:24 till 1:48 nordlig riktning

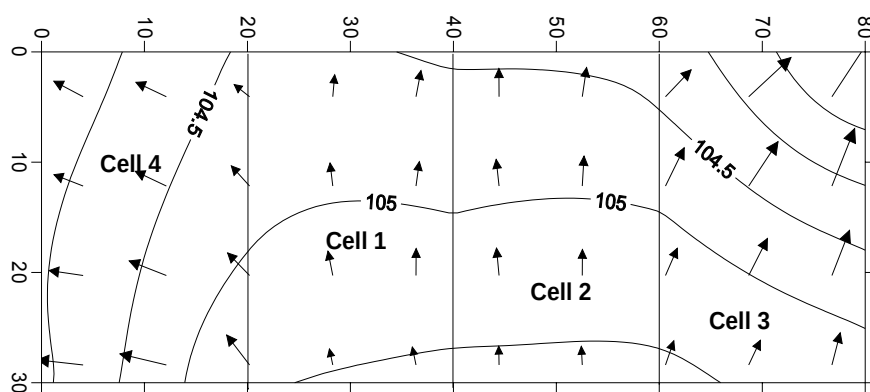
Lutningen för provyta 2 varierade mellan ca 1:20 till 1:28 nordlig riktning

Lutningen för provyta 3 varierade mellan ca 1:10 till 1:21 i nordöstlig riktning.



Figur 2.5a Höjdnivåer på avjämningslagrets yta med tillhörande riktning för ytaavrinning.

Figure 2.5a Elevation of the surface of the covering layer, with run off directions.



Figur 2.5b Höjdnivåer på dräneringslagrets yta med tillhörande riktning för ytaavrinning.

Figure 2.5b Elevation for the surface of the drainage layer with run off directions.

2.3.3 Utläggingsstrategi

Tätskiktsmaterialet av flygkastabiliserat avloppsslam (rötat) med 40-50 viktprocent inblandning av flygaska (FSA 40 – 50) är ett material som har låg initial hållfasthet. Detta medför att materialet inte klarar större laster, som exempelvis en grävmaskin. Utläggingsstrategin gick ut på att lägga ut FSA som tätskikt med tillhörande dräneringsskikt ovanpå och backa ut från området med grävmaskinen. När hela försöksytan var klar påbörjades utläggningen av skyddsskiktet i form av ett 0,5 meter tjockt skikt av schaktmassor (återvunnen jord). Utläggningen av schaktmassorna utfördes framför grävmaskinen. Efter utläggning av detta skikt lades skydds- och vegetationsskikt ut med en mäktighet på ca 0,8 – 1,3 m. Detta lager lades ut på motsvarande sätt som FSA, dvs. grävmaskinen backar ut från området. Efter färdigställandet av försöksytorna besåddes ytan med lämplig grässort.

2.3.4 Tillverkning av tätskikt

2.3.4.1 Ingående material

De ingående materialen i tätskiktet var rötat avloppsslam från Stockholm Vatten AB, Bromma samt två olika flygaskor. Den ena flygaskan levererades från Mälarenergi Västerås. Den andra flygaskan levererades från Vattenfall Värme Uppsala. Båda flygaskorna är från biobränslepannor, se nedan.

Mälarenergi AB	Kraftvärmeverket i Västerås	Spillprodukter från skogsavverkning i form av grenar och toppar	CFB	Torr flygaska
Vattenfall AB Värme Uppsala	Uppsala	Torv, trä	Pulver	Torr flygaska

Flygaskornas TS och vattenkvot redovisas i bilaga E och 0.

FSA materialens totalhalter redovisas i bilaga C.1. Avloppsslammet började lagras i strängar på plats (Dragmossens återvinningsanläggning) tre till fyra veckor före fältförsöket. Avloppsslammets TS-halt var ca 31 % med en variation mellan 28 – 37 % (vilket motsvarar vattenkvot mellan 170 – 265 %¹). Flygaskorna levererades under vecka 20.

Flygaskorna var färskas med tillsats av vatten i förhållandevis små mängder. Flygaskan från Mälarenergi hade en vattenkvot på ca 32 %, med variation mellan 11 – 38 %. Flygaskan började härda redan under transporten till Dragmossens återvinningsanläggning. Flygaskans granulometriska sammansättning var från siltfraktion till block, vänstra bilden i figur 2.6. Vattenfall Uppsalas flygaska hade en lägre och jämnare vattenkvot (w). Vattenkvoten låg på ca 20 % och materialets granulometriska sammansättning kan beskrivas som siltig till sandig med inslag av härdade partiklar i grusfraktion, högra bilden i figur 2.6.

¹ TS = 1/(1+w)



Figur 2.6 Flygaska från Mälarenergi Västerås (vänster) och flygaska från Vattenfall Värme Uppsala (höger).

Figure 2.6 Fly ash from Mälarenergi Västerås (left) and flyash from Vattenfall Värme Uppsala (right).

Under sommaren/hösten 2004 byggde Mälarenergi Västerås om sin utmatningsstation så att askan nu kan fås från bulktorrt till pumpbart tillstånd, samt att tillsatsmedel kan anordnas. Leveransen av flygaska till detta projekt skedde genom utlastning via ett gammalt paddelverk som nu är ersatt med en betongblandare.

2.3.4.2 Tillverkning av FSA

Under v 20 och 21 2004 tillverkades FSA-blandningarna. Cirka 1500 ton installerades som tätskikt på provytan som var ca 2400 m² stor. De planerade blandningsförhållandena var ca 40 % TS flygaska och 60 % TS rötat avloppsslam, förkortat FSA40. På grund av slammets kletiga konsistens var blandningsförfarandet problematiskt. Detta har åtgärdats med hjälp av höjning av innehållet av flygaska och genom förblandning av flygaska och avloppsslam med hjälp av en rotorskopa, figur 2.7.



Figur 2.7 Förblandning av flygaska och avloppsslam med rotorskopa..

Figure 2.7 Pre-mixing of fly ash and sewage sludge.



Figur 2.8 Utmatning av förblandat FSA (vänster bild) och färdig FSA blandning från skrubblandaren (höger bild)..

Figure 2.8 Feeding of pre-mixed FSA (left) and the produced FSA (right).

Det förblandade FSA-materialet blandades sedan med tvångsblandare, figur 2.8. Blandningstiden är avgörande för materialets konsistens. Blandningen måste anpassas så att konsistensen hos FSA inte blir kletig. För lång blandningstid medför att FSA fastnar i blandaren och orsakar driftstopp. För kort blandningstid medför att blandningen blir inhomogen, med många klumpar av avloppsslam täckta av ett lager av flygaska. Den blandningstid som valdes gav ett FSA-material som vid utläggning och packning på deponin bedömdes kunna vara ett tätt material med god skjuvhållfasthet. Efter trimning av förblandning, blandningstid samt in- och utlastning kunde ca 90 ton FSA-blandning tillverkas i timmen. Blandningarnas sammansättning var ca 45 % flygaska från Mälarenergi (FSA45) och ca 50 % flygaska från Vattenfall Uppsala (FSA50). FSA med flygaska från Mälarenergi Västerås hade en vattenkvot på ca 136 % (medianvärde), medan FSA med flygaska från Vattenfall Uppsala hade en vattenkvot på ca 111 % (medianvärde).

2.3.4.2.1 Utläggning av FSA

På grund av tillverkningstekniska problem, samt låg hållfasthet hos FSA-materialet, lades det ut enbart ett skikt av FSA. I det planerade tätskiktet ingick ett 0,5 m tjockt skikt FSA40 som tätskikt och ett upp till 0,5 m tjockt skikt av FSA60 som oxidationskyddskikt. Syftet med oxidationskyddskiktet var att genom pH- och saltbuffert förhindra oxidation och nedbrytning av ingående organiskt material i FSA. Baserat på laboratorieresultat kommer pH att vara hög ($\text{pH} > 10$) i FSA40 även efter L/S ca 900, dvs. efter att tätskiktet har perkolerats med 900 gånger mer vatten än massan torrsubstans i tätskiktet. Höga pH kommer att hämma nedbrytningsprocesserna. På provytorna (provyta) 4 och 1 samt ca 1/4-del av provyta 2 installerades FSA45 från Mälarenergi. Resterande provytor har tätskikt bestående av FSA50 som tillverkades med flygaska från Vattenfall Uppsala. Erfarenheter från tillverknings- och utläggningsarbetet redovisas i sin helhet i bilaga A.



a

b

Figur 2.9 Utlagt FSA och dräneringssikt. Bild a är provyta 4 med sand som dräneringssikt och bild b är provyta 1-3 med slaggrus som dräneringssikt.

Figure 2.9 Cell 4 with sand as drainage layer (a), cell 4 with bottom ash as drainage layer and cell 1-3 with bottom ash as drainage layer (b).

FSA-Mälarenergi

FSA-materialets vattenkvot varierade mellan 110 – 180 % i provyta 4, den första provytan som sluttäcktes, figur 2.9a. Provyta 1 hade en jämnare kvalitet vad gäller vattenkvot, 95 – 136 %. FSA-materialets densitet låg på ca 1,2 ton/m³ efter utläggning, figur 2.9b.

FSA-Vattenfall

FSA-materialets vattenkvot varierade mellan 108 och 160 % i provyta 2 och mellan 90 och 127 % i provyta 3. FSA-materialets densitet låg på ca 1,0 -1.15 ton/m³ efter utläggning.

2.3.5 Utläggning av överliggande tätskiktsskonstruktion

2.3.5.1 Dräneringssikt

Dräneringssikt installerades på tätskiktetsmaterial. På provyta 4 och provytan norr om provyta 4 var tätskiktet ca 0,07 m tjockt och materialet bestod av sand. På de övriga ytorna, provytorna 1 – 3, var dränsiktet slaggrus med en tjocklek på ca 0,2 m. Slaggruset kommer från Söderenergi och är från förbränning av plast, trä och papper. (figur 2.9b). Fraktionen bedömdes ligga på 0 – 100 mm, figur 2.10.



Figur 2.10 Dräneringsmaterial, bestående av slaggrus (Söder Energi)

Figure 2.10 Drainage material, bottom ash (Söder Energi)

2.3.5.2 Skyddsskikt

Under vecka 22 och 23 (2004) har skyddsskiktet installerats på deponin.

I provytorna 1-4 lades först ut ett 0,5 m tjockt skikt av schaktmassor, figur 2.11. Därefter installerades ytterligare schaktmassor från Älvkarleby kommun samt fibermull från Econova som skydds- och växtetableringsskikt på provyta 4. På provyta 1-3 installerades hygieniserat avloppsslam som skyddsskikt och fibermull från Econova som växtetableringsskikt. Försöksytan såddes i juni och därefter har ytan klippts 3-4 gånger under året. Skälet till att klippa ytan är att få en bättre avdunstning och ytavrinning.



Figur 2.11 Skyddsskikt bestående av återvunna schaktmassor (0,5 m) och återvunnen jord (1 - 1,5 m) har lagts ut över dräneringsskiktet, utläggningsarbete av skyddsskiktet (vänster) och färdig deponiyta (höger).

Figure 2.11 The drainage layer is covered with a surface layer of reused excavated soil (0,5 m) and topsoil (left). Final landfill area (right).

2.4 Instrumentering

2.4.1 Installation av lysimetrar

35 stycken lysimetrar för insamling av vatten installerades i deponin (figur 2.12) enligt följande:

- 2 stycken lysimetrar installerades under avjämningskiktet i syfte är att kontrollera avjämningskiktets täthetsfunktion
- 21 stycken lysimetrar installerades i avjämningskiktet i syfte är att kontrollera FSA-tätskiktets genomsläpplighet
- 6 stycken lysimetrar installerades i dräneringsskiktet i syfte är att kontrollera vattenflödet i dräneringsskiktet)
- 6 stycken lysimetrar installerades under skyddsskiktet i syftet är att kontrollera skyddsskiktets genomsläpplighet.



Figur 2.12 Lysimeterinstallation och utformning.

Figure 2.12 Lysimeter installation and construction.

Lysimetrarna var konstruerade enligt beskrivning som redovisas i Bilaga C3. I en plastbehållare installeras provtagningsslang. På slangen läggs det geotextil, grus (singel) och sand. Lysimetern installeras under det skikt vars täthet ska studeras. Lysimetern sänks ner i underliggande skikt och lysimetern samt slangutföringen skyddas med ditlagt sandmaterial, se figur 2.13. Skiktet som studeras läggs ut maskinellt över hela provytan. Lysimetrarnas funktion, förutom att kontrollera vattenvolymen som tränger igenom ovanförliggande skikt, är att kunna utföra analys på metaller, pH, konduktivitet etc. Lysimetrarnas placering redovisas i bilaga C.3.



Figur 2.13 Installation av lysimetrar i avjämningsskiktet, provyta 4.

Figure 2.13 Installation of lysimeter in the pre-covering layer, cell 4

Förutom vattenlysimetrar installerades även 17 stycken gaslysimetrar (figur 2.14). Gaslysimetrarnas funktion är att kontrollera gassammansättningen i tätskiktsprofilen. Ur dessa kommer gasprover att tas för analys av gassammansättning, som CO_2 , CH_4 , O_2 .

- En gaslysimeter installerades i avjämningsskiktet.
- Åtta gaslysimetrar installerades i tätskiktet.
- Tre gaslysimetrar installerades i dräneringsskiktet.
- Fem gaslysimetrar installerades i skyddsskiktet.



Figur 2.14 Installation av gaslysimeter i tätskiktet, provyta 4.

Figure 2.14 Installation of gas-lysimeter in the barrier layer, cell 4

2.4.2 Installation av slangar för slangställningsmätning

Slang för ställningsmätning installerades på provyta 1 på två nivåer, figur 2.15, på avjämningskiktet för mätning av ställningar av hela deponin och på tätskiktet för

mätning av kompression i FSA-skiktet som orsakas av dränerings- och skyddsskiktet. I Bilaga D redovisas hur slangställningsmätaren fungerar. Ytterligare en slang installerades på dräneringsskiktet på provyta 3 som sträcker sig över till provyta 2.



Figur 2.15 Installation av slang för slangställningsmätning, provyta 1.

Figure 2.15 Installation of tube, cell 1.

Slangarna gick inte att köra på och var dessutom styva. Detta gjorde att de inte kunde läggas ut i förväg. Vid utläggning av slang 1 och 2 förankrades ena änden av respektive slang i järnrör (ca 2 m långt) som sattes fast i vallen på norra sidan om provyta 1. När utläggningen av material nått fram till slangarna drogs de ut, den ena på avjämnningsskiktet (slang 1) och den andra på tätskiktet (slang 2) som lades ut samtidigt. De södra ändarna av slangarna förankrades i ett annat järnrör som satts fast på södra sidan av cellen. Dräneringsskiktet lades ut även ovanpå slang 2.

Vid utläggning av slang 3 på dräneringsskiktet förankrades den ena änden i ett järnrör nedsatt i vallen på östra sidan av provyta 3. Den andra änden drogs ut i västlig riktning in på provyta 2 och hölls fast medan schaktmassorna, som ingick i skyddsskiktet, lades ut så att slangen skulle förankras och ligga kvar. Slangställningsmätningen ersattes med avvägning av deponiytan på grund av problem med slangställningsmätaren.

2.5 Kontroll av entreprenadarbetet

Ingående material kontrollerades under tillverkningstiden med avseende på vattenkvot och densitet. Tillverkningen gick inte enligt planerna, dvs. det gick inte att styra blandningsförhållandet med kontinuerlig vägning av flygaska och avloppsslam. För att få rätt blandningsförhållande användes vågen på en hjullastare. Flygaska och avloppsslam förblandades i sådant volymförhållande som gav ca 45 % inblandning med Mälarenergis flygaska och ca 50 % med Vattenfall Uppsalas flygaska. Detaljerad beskrivning dag för dag ges i bilaga A.1.

2.6 Bestämning av TS-halt i fält

TS-halten bestämdes i fält för slammaterialet, askorna och det producerade FSA-materialet. För bestämning av TS-halt i fält införskaffades en ugn (modell bänkspis). Ugnen ställdes in på drygt 105°C. Temperaturen varierade troligtvis något i och med att ugnen inte var anpassad för den här användningen. Proverna avlästes dagen efter att de ställts in. Det visade sig att askproverna, som hade hög TS-halt, kunde avläsas redan fem timmar efter att de ställts in. TS-halten för slammaterialet, askorna och det producerade FSA-materialet redovisas i kapitel 3.

2.7 Laboratorieanalyser

Flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) undersöktes i syfte att bedöma materialets beständighet mot biologisk nedbrytning. Två olika flygaskor nyttjades vid försöken, aska 1 flygaska från Vattenfall Uppsala och aska 2 flygaska från Mälarenergi Västerås. Nedbrytningen undersöktes främst genom att mäta den biogas som bildas vid biologisk aktivitet. FSA-materialen undersöktes dessutom med hjälp av lakning, där lakvattnet och den fasta fasen undersöktes. Syftet med lakningsförsöken var att uppskatta hur mycket av de olika ämnena som finns i FSA som är rörliga, samt om det finns risk att organiskt material kan lakas ut från materialet. Den fasta fasen, efter lakning med stigande L/S-kvot, användes i gasbildningsförsöken för att undersöka nedbrytningen (dvs gasbildningen). Fördjupade undersökningar genomfördes med flygaska från Mälarenergi Västerås AB (aska 2). Lakningen används för att prediktera det som kommer att ske efter långa tidsperioder, då motsvarande mängd regnvatten skall ha passerat genom täckskitet.

De kemiska egenskaperna hos blandningen undersöktes med hjälp av lakteter där lakvattnet har karakteriserats med avseende på:

- Elektrisk konduktivitet (SIS 028123) – pH (SS 028122)
- DOC – Löst Organiskt Kol
- Metallinnehåll, metallanalys med ICP-AES
- Karbonatiseringspotential. Karbonatiseringsförsöken användes för att bedöma hur mycket koldioxid som kan bindas i materialet.

Nedbrytbarhet mättes med hjälp av:

- Ett BMP-försök (Biokemiskt Metan Potentialtest) som mäter FSA-materialens nedbrytbarhet under anaeroba förhållanden
- Ett respirationsförsök som mäter FSA-materialens nedbrytbarhet under aeroba förhållanden.

Effekten av andelen flygaska (i FSA-blandningen) på den biologiska aktiviteten undersöktes med hjälp av:

- Toxicitet, ett toxicitetstest utfördes baserat på den luminescenta bakterien *Vibrio fischeri*. Förekomsten av toxiska ämnen minskar ljusstyrkan hos bakterierna och används som mått för toxicitet.

- Metanoxidation, ett metanoxidationstest, där metanoxideringskapacitet används som ett mått på toxicitet.

2.8 Analyser

Prov på avloppsslam, FSA-blandningar, slaggrus, dräneringssand, sand som har används i lysimeterbehållarna och återvunnen jord skickades till laboratorium för metallanalys. Vattenprover från lysimetrarna analyserades på metaller. Samtliga analyser utfördes av Analytica AB, fasta prover enligt M2 och vattenprover enligt V3a –efter filtrering (Analyticas nomenklatur).

3 Resultat/erfarenheter

Provytor vs celler koordinater för provytor anges.

3.1 Allmänt

Målet med pilotförsöket var att behandla frågeställningar som primärt avser FSA-materialets:

- Tekniska funktion och miljöegenskaper
- Utförande - Tillverkning och utläggning
- Beständighet

Beständigheten är en nyckelfråga för deponiägaren och miljömyndigheter för att säkerställa långtidsstabiliteten hos materialet. Detta avsnitt behandlas sist i detta kapitel. *Teknisk funktion och miljöegenskaper* samt *utförande* behandlas i samma avsnitt eftersom dessa är starkt kopplade till varandra. Sämre kvalitet och tillverkningsproblem av FSA-materialet ger direkt effekt på materialets tekniska egenskaper.

3.2 Teknisk funktion, miljöegenskaper och utförande

3.2.1 Blandningens homogenitet

Flygaskornas och avloppsslammets vattenkvot och TS redovisas i tabell 3.1 tabell 3.2 och bilaga C4. Resultaten visar att flygaskan från Vattenfall Uppsala hade en jämnare kvalitet och lägre vattenkvot än flygaskan från Mälarenergi, Västerås. Mälarenergi hade problem med styrningen av vattentillsättning under tiden fältförsöket pågick. Den höga vattenkvoten medförde att Mälarenergis flygaska började härda ihop under transporten, se figur 2.6a. Detta medförde att flygaskan blev mer och mer grovkorning med tiden. Flygaskans torrdensitet var runt 0,68 ton/m³. Flygaskan från Vattenfall Uppsala hade en vattenkvot som var lägre och mer jämt fördelad i askan. Flygaskans torrdensitet var ca 0,91 ton/m³. Flygaskan påverkades inte av märkbar härdning under försökets gång. Avloppsslammets TS-halt låg i nivå med den vattenkvot som Stockholm Vatten AB utlovade inför försöken, dvs. ca 30 % vilket motsvarar en vattenkvot på ca 233 %.

Tabell 3.1 De ingående materialens vattenkvot.

Table 3.1 The water content.

	Flygaska, ME	Flygaska, VU	Slam, SVAB
	w (%)	w (%)	w (%)
Variation	11,1-38,4	6,3-47	169,5-257,8
Median	31,1	14,2	217,5
Medel	31,7	16,3	217,9

Tabell 3.2 De ingående materialens TS-halt.

Table 3.2 Dry solid contents.

	Flygaska, ME	Flygaska, VU	Slam, SVAB
	TS (%)	TS (%)	TS (%)
Variation	72,2-90	68-94,1	27,9-37,1
Median	77,1	87,6	31,5
Medel	78,3	86,4	31,6

Efter initiala problem med tvångsblandaren togs det fram FSA-material med något sämre kvalitet och homogenitet de första dagarna. Efter förbättringar blev det tillverkade FSA-materialets homogenitet allt bättre. Dessutom var flygaskan inte torr, detta förhållande gällde i laboratorieskala, vilket medförde att blandningen blev mindre homogen i fält- än i laboratoriemiljö. I fält blev FSA med flygaska från Mälarenergi den minst homogent utblandade. Detta medförde i sin tur att FSA-materialets konsistens var mindre kletig (klumpar av flygaska förekom i blandningen) och trots att mängden tillsatt flygaska var mindre än för Vattenfall Uppsalas flygaska blev det mindre produktionsproblem (igensättning i tvångsblandaren) med denna flygaska. Vattenfall Uppsalas flygaska gav en mer homogent utblandad blandning, dvs. en bättre blandning ur täthetssynpunkt. Trots att tillsatsmängden av flygaska har höjts till drygt 50 % och materialet hade lägre vattenkvot var detta material mer besvärligt (kletigt) än FSA (Mälarenergi).

I tabell 3.3 a & b redovisas resultat från mätningen av FSA-materialens vattenkvot och TS. FSA-materialet med flygaska från Mälarenergi (ME) hade en vattenkvot på ca 135 % (medianvärde), medan FSA med flygaska från Vattenfall Uppsala (VU) hade en vattenkvot på 112 % (medianvärde). I tabell 3.3 b redovisas hur FSA materialens innehåll av flygaska, uttryckt i % flygaska, påverkar det tillverkade FSA-materialets vattenkvot. Som det framgår av tabell 3.3b motsvarar en vattenkvot på 136 % för FSA flygaska från Mälarenergi Västerås (ME) ca 45 % tillsats av flygaska (% av TS vikt), förkortat FSA45. På motsvarande sätt har ett FSA50 material, tillverkat av 50 vikt-% TS flygaska från Vattenfall Uppsala (VU), en vattenkvot på 112 %.

Tabell 3.3a FSA-materialens TS och vattenkvot (w) efter tillverkning.

Table 3a Dry solid and water content for the produced FSA material.

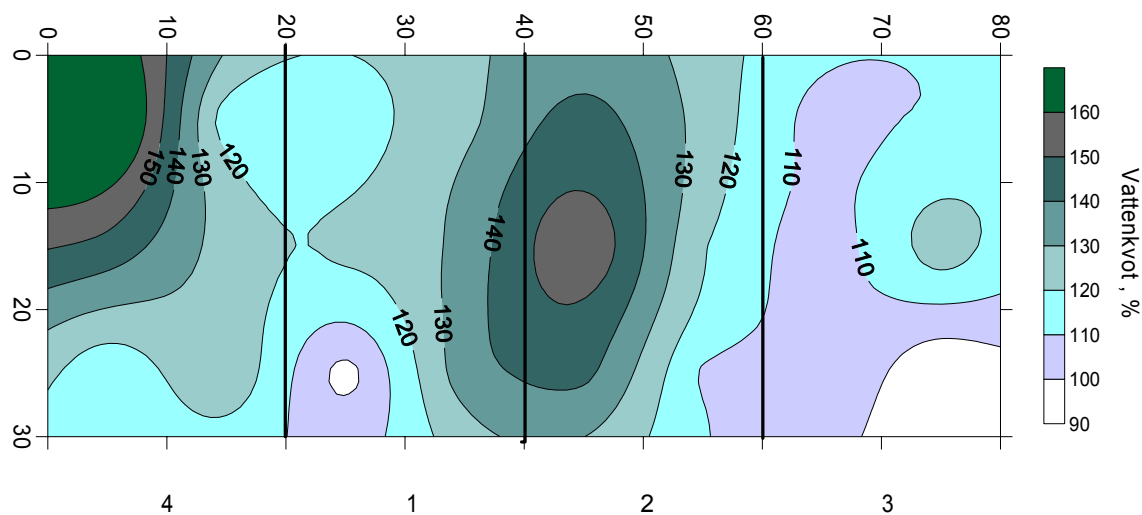
	FSA (ME)		FSA (VU)	
	TS (%)	w (%)	TS (%)	w (%)
Variation	39,9-45,4	120,1-150,4	35,3-51,8	93,1-183,1
Median	42,4	135,7	47,2	111,8
Medel	42,7	134,4	45,7	120,9

Tabell 3.3b Kalkylerade vattenkvotsvärden (w) hos FSA material vs andel tillsatt flygaska.

Table 3.3b Calculated water content (w) for the FSA material.

FSA (% flygaska)	FSA (ME) w	FSA (VU) w
30	162 %	157 %
35	152 %	146 %
40	143 %	136 %
45	134 %	126 %
50	124 %	116 %
55	115 %	106 %

I figur 3.1 redovisas vattenkvotsvärdena på utlagt FSA material. FSA-materialet som lades ut i Provyta 3 har mellanlagrats mellan 1 till 2 dygn innan materialet lades ut. Detta förklarar de lägre vattenkvotsvärdena i FSA-materialet inom detta område.



Figur 3.1 Tätskiktets vattenkvot, siffrorna är vattenkvoten i % för provytorna 1 - 4.

Figure 3.1 Water content (%) of the top cover barrier in cell 1 - 4.

3.2.2 Arbetsmiljö vid tillverkning

Ammoniaklukten/avgången var besvärande vid tillverkningen av FSA, speciellt efter regn då materialet var fuktigt på ytan. Ammoniaklukten är framförallt besvärande för de som arbetar med FSA-materialet och luktproblemet är störst under blandningsprocessen och under transporten. Upplagda massor har mindre exponeringsyta, vilket minskar luktaavgången. Efter utläggning av FSA-skiktet bör materialet täckas med dräneringsskikt för att helt eliminera luktproblemet. Damningen vid blandningsförfarandet av flygaska och avloppsslam var ett mindre problem. Visserligen dammar det vid förblandningen, med detta bedöms som ett mindre problem även vid kraftig vind. Damningen var mer besvärande vid torrt väder och då på de körytorna som bestod av härdad flygaska. Dessa aspekter kommer att studeras mer ingående i det pågående projektet [14].

3.2.3 FSA-skiktets densitet

FSA-materialets täthet kontrollerades direkt efter utläggning och packning med skopan. Laboratorieresultaten indikerade en skrymdensitet på ca 1,2 – 1,4 t/m³. Mätning av densitet med vattenvolymeter fungerade inte väl i FSA-materialet. Detta gäller speciellt efter regn. FSA blir för tät och luftfickor i materialet finns kvar. FSA-material med flygaska från Mälarenergi lades ut inom områdena provyta 4 och provyta 1, medan flygaska från Vattenfall nyttjades i provytorna 2 och 3. Försöksytans delades in i sex delområden per provyta, se figuren nedan. I respektive delyta (cell) bestämdes den utlagda FSA-materialets skrymdensitet, tabell 3.4a, tabell 3.4b och Figur 3.2.

I följande punkter utfördes kontrollmätning av FSA-materialets skrymdensitet, ρ .

Provyta 4		Provyta 1		Provyta 2		Provyta 3	
4:3	4:6	1:3	1:6	2:3	2:6	3:3	3:6
4:2	4:5	1:2	1:5	2:2	2:5	3:2	3:5
4:1	4:4	1:1	1:4	2:1	2:4	3:1	3:4

Tabell 3.4 a Provyta 4 och 1.

Table 3.4 a Test area 4 and 1.

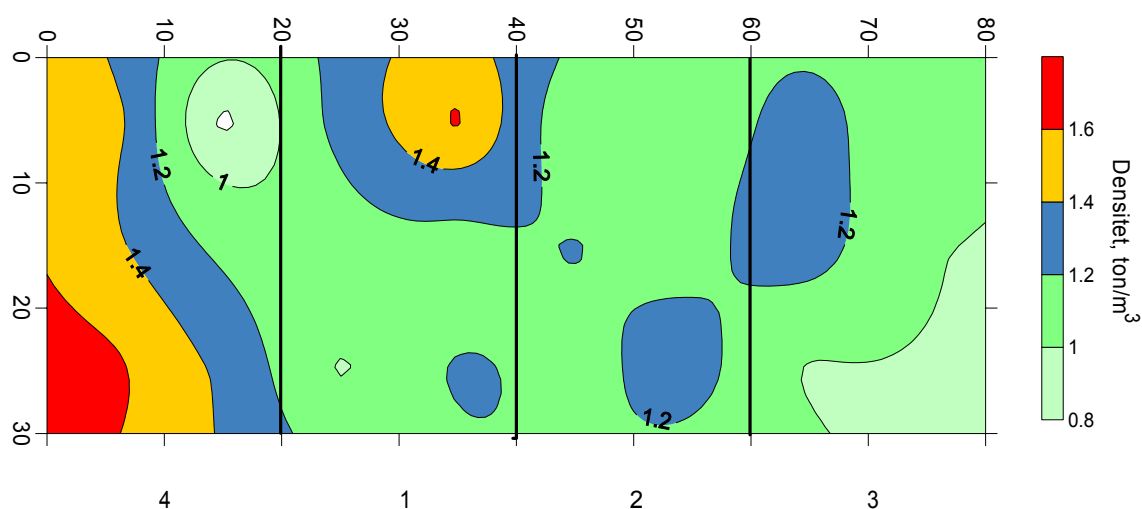
Provyta 4			Provyta 1		
Provpunkt	$\rho(\text{t/m}^3)$	w, %	Provpunkt	$\rho(\text{t/m}^3)$	w %
4:1	1,66	111	1:1	0,98	95
4:2	1,45	147	1:2	1,10	123
4:3	1,53	183	1:3	1,28	115
4:4	1,37	129	1:4	1,23	136
4:5	(området övertäckt vid provtagning)		1:5	1,11	133
4:6	0,749	114	1:6	1,64	127
Variation	0,7-1,7		Variation	0,98 - 1,3	
Median	1,45		Median	1,16	
Medel	1,35		Medel	1,20	

Tabell 3.4b Provyta 2 och 3.

Table 3.4b Test area 2 and 3.

Provyta 2			Provyta 3		
Provpunkt	$\rho(t/m^3)$	w %	Provpunkt	$\rho(t/m^3)$	w %
2:1	1,16	143	3:1	0,98	110
2:2	1,21	160	3:2	1,29	105
2:3	1,03	144	3:3	1,25	106
2:4	1,26	108	3:4	0,98	90
2:5	1,16	121	3:5	1,01	127
2:6	1,12	127	3:6	1,08	111
Variation	0,9-1,3		Variation	0,9-1,3	
Median	1,15		Median	1,00	
Medel	1,1		Medel	1,1	

Som det framgår i tabellen var FSA-materialets skrymdensitet inom området 4:6 ca 0,7 t/m³ jämfört med medianvärdet på 1,45 t/m³. Östra delen av provyta 4 har den högsta densiteten, vilket tyder på att inblandningen av flygaska var högre än den planerade. Problem med igensättning etc. medförde att doseringen av flygaska blev för hög. Den stora variationen i skrymdensitet tyder på inhomogent material. Inom området provyta 1 förbättrades blandningen och ett homogent material har lagts ut. I provyta 2 och 3 blev tätskiktet mer homogent. FSA(VU)-materialets skrymdensitet var något lägre och kvaliteten jämnare än FSA(ME)-materialets skrymdensitet och kvalitet, figur 3.2.

Figur 3.2 Tätskiktets densitet på försöksytan, enheten är t/m³.Figure 3.2 Density of the top cover barrier layer on the test area, unit t/m³.

3.2.4 Tätskiktets täthet

Vecka 24 (2004) var samtliga lysimetrar täckta med tätskiktsskonstruktion, inklusive lysimetrarna i dränerings och skyddsskikt. Nästa provtagningstillfälle var i månadsskiftet september/oktober. Provtagningen utfördes 109 dagar efter det att lysimetrarna tömdes. Econova följde upp nederbörden under året och den genomsnittliga nederbörden var 55 mm/månad, vilket motsvarar 650 mm/år (dvs. 650 liter/m², år). Tätskiktets täthet (genomsläpplighet) uttrycks som liter vatten som

perkolerar genom en kvadratmeter deponiyta under ett år (liter/m²), vilket motsvarar mm/år. Tabell 3.5 och tabell 3.6 nedan redovisar resultaten från respektive lysimeter och måttillfälle från försöksytan. Inom provyta 4 varierar FSA-materialets täthet mellan att vara under detektionsvärdet till värden som motsvarar ca 113 liter/m², år. Mätningarna indikerar att tätskiktets täthet ökar med tiden, tabellerna 3.5 och 3.6. Inom området provyta 1 var tätheten högre. Mängden vatten som perkolerade igenom tätskiktetskonstruktionen var < 14 liter/m², år vid den första mätningen. Vid måttillfället april 2005 minskade mängden vatten som perkolerade igenom tätskiktet, med undantag av lysimeter 3. Ingen av ytorna hade högre perkolation än 50 liter/m², år.

Tabell 3.5 Bedömning av tätskiktets täthet i provyta 4 och 1. Tätskiktet består av FSA med flygaska från Mälarenergi Västerås.

Table 3.5 Assessment of the permeability for the barrier layer in 4 and 1. The barrier layer consists of FSA and fly ash from Mälarenergi Västerås.

Provyta 4,			
Lysimeter	2004 okt. liter/m², år	2005 apr. liter/m², år	Analys
29	2	12	
30	113	26	
31	Ud	44	
35	58	14	

Provyta 1,			
Lysimeter	2004 okt. liter/m², år	2005 apr. liter/m², år	Analys
1	1,4	2	
2	Ud	Ud	
3	14	50	V3b
5	Ud	Ud	

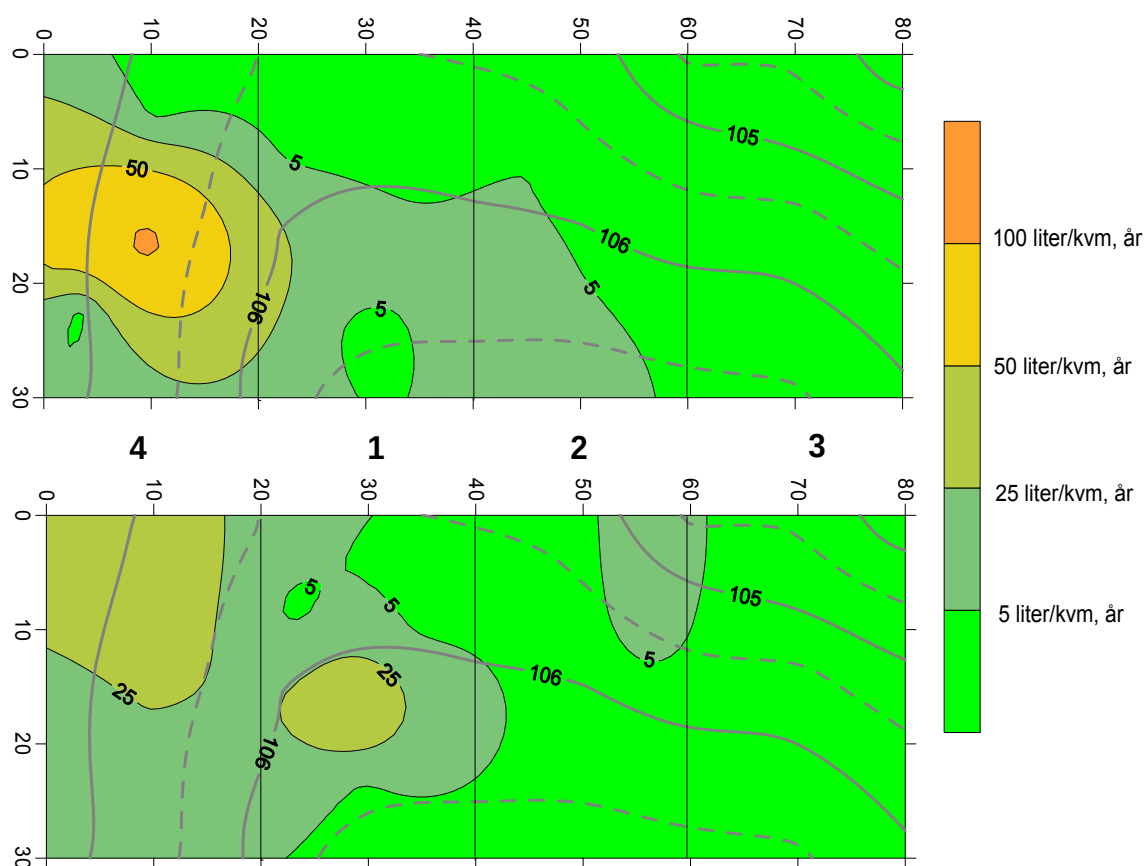
Tabell 3.6 Bedömning av tätskiktets täthet i provyta 2 och 3. Tätskiktet består av FSA med flygaska från Vattenfall Uppsala.

Table 3.6 Assessment of the permeability of the barrier layer in provyta 2 and 3. The barrier layer consists of fly ash from Vattenfall Uppsala.

Provyta 2			
Lysimetrynr	2004 okt. liter/m² och år	2005 apr. liter/m², år	Analys
7	18	3	
8	Ud	Ud	
9	5	1	
10	0,8	11	
11	1,1	2	
12	4	3	

Provyta 3			
Lysimetrynr	2004 okt. liter/m², år	2005 apr. liter/m², år	Analys
13	Ud	Ud	
14	1,4	Ud	
15	2,0	Ud	V3b
16	Ud	0,4	
17	1,4	Ud	
18	Ud	Ud	

Inom området provyta 2 och 3 ligger tätskiktets täthet mellan 0 liter/m², år och 18 liter/m², år respektive mellan 0 liter/m², år och 2 liter/m², år. Som det framgår av figur 3.3 nedan ligger täthet under 50 liter/m² för försöksytan med undantag av det östra området, delar av provyta 4. Sättningar som skedde i FSA-materialet från oktober 2004 till april 2005 bidrar till att tätskiktet komprimeras, vilket höjer tätskiktets täthet. Mätningarna vid mättillfället i april 2005 ger indikation om att materialets täthet utvecklas med tiden, se tabell 3.5.

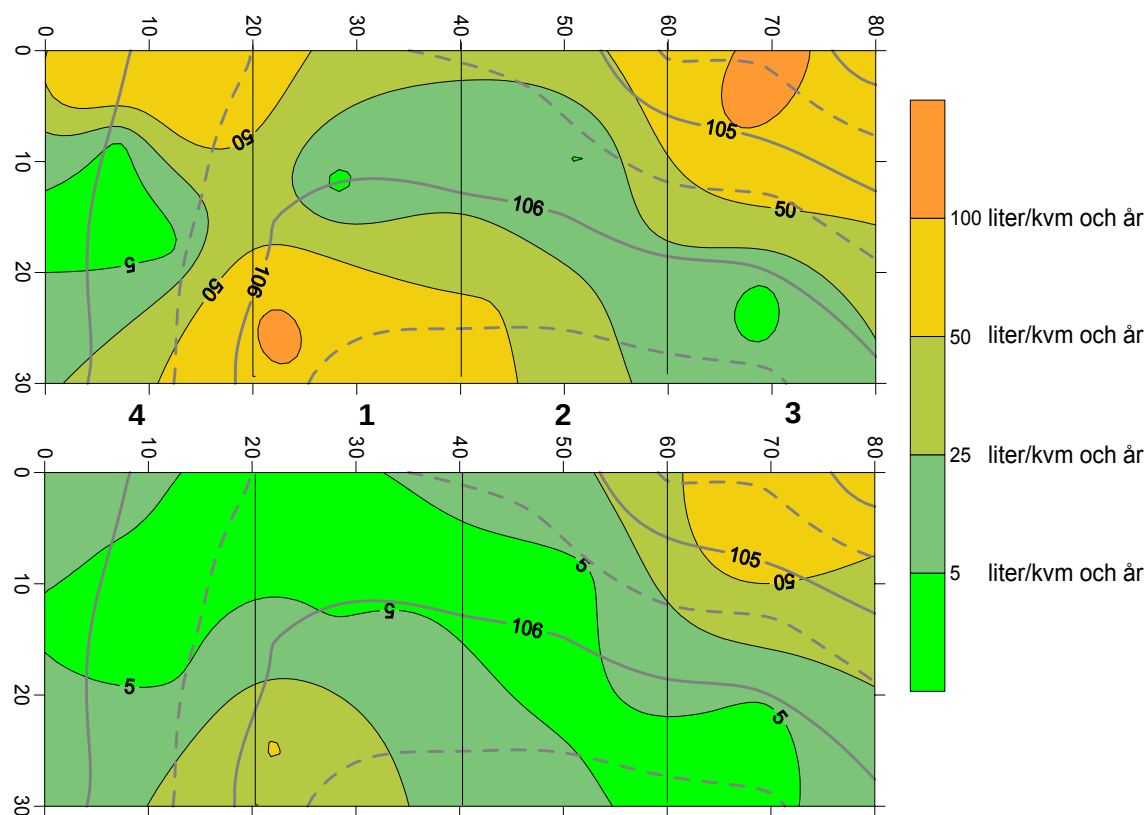


Figur 3.3 Bedömd täthet (liter/m², år) baserat på uppmätt vattenvolym i lysimetrarna under tätskiktet. Mätningarna utfördes oktober 2004 och april 2005.

Figure 3.3 Assessment of permeability (litre/m² and year) based on measured volume of water in the lysimeters under the barrier layer.

I figur 3.4, och tabell 3.7 samt tabell 3.8 redovisas mängden vatten som har perkolerat genom skydds- och dräneringsskiktet fram till oktober 2004 och april 2005. Mängden vatten som har samlats upp varierar mellan 0 och 112 liter per m², år, vid den första mätningen, tabell 3.5. Det är stor genomsläpplighet i skyddsskiktet i provyta 4 och 1, området med gul och orange markeringar, figur 3.4. Provyta 3 har den största lutningen på ca 1:10, vilket medför en ökad ytavrinning och därmed lägre infiltration. Som det framgår i figuren minskade mängden vatten som perkolerat genom skydds- och dräneringsskiktets under vinterhalvåret.

Lysimetrarna i skyddsskiktet var torra vid provtagningstillfället oktober 2004 och april 2005.



Figur 3.4 Bedömd täthet (liter/m², år) baserat på uppmätt vattenvolym i lysimetrarna i drän och skyddsskiktet. Mätningarna utfördes oktober 2004 och april 2005.

Figure 3.4 Assessments of permeability (litre/m² and year) based on measured volume of water in the lysimeters under the drainage and protection layers.

Tabell 3.7 Bedömning av dränsiktets genomsläpplighet baserat på lysimetermätningar efter 109 dagar.

Table 3.7 Assessment of the permeability of the drainage layer after 109 days.

Provyta	Lysimeter	2004 okt. liter/m ² , år	2005 apr. liter/m ² , år	Anmärkningar	Analys
-	27	2	ud	relativt klart, luktar lite gödsel	
4	28	98	21	brunt, luktar gödsel	
4	33	89	ud	brunt, luktar gödsel	
1	26	112	4	brunt, luktar kraftigt av gödsel	
2	20	54	1	relativt klart, luktar lite gödsel	V3b
3	24	ud	ud		

Tabell 3.8 Bedömning av skyddsskiktets genomsläpplighet baserat på lysimetermätningar efter 109 dagar.

Table 3.8 Assessment of the permeability of the protection layer after 109 days.

Provyta	Lysimeter	2004 okt. liter/m ² , år	2005 apr. liter/m ² , år	Anmärkningar	Analys
4	32	ud	ud		
4	34	ud	ud		
1	19	ud	0,2	luktar lite gödsel från luften	
2	21	3,6	ud	relativt klart	
2	22	112	5	brunt, luktar mkt gödsel	V3b
3	23	15,6	2	brunt	V3b

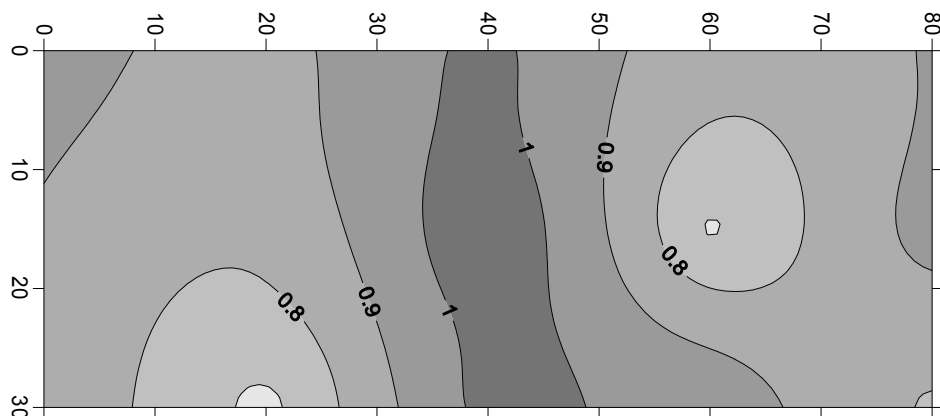
3.2.5 Mängd utlagt FSA-material

I tabell 3.9 redogörs den totala mängden FSA som har lagts ut över försöksytorna. Totalt har ca 1550 ton material lagts ut på en ca 2400 m² stor yta. Mängden FSA per hektar bedöms vara ca 6200 ton.

Tabell 3.9 Mängden FSA som har lagts ut i tätskiktet på 2000 m² stor deponiyta.

Table 3.9 Amount of FSA in the barrier layer on a landfill area of 2000 m².

	Provyta 1		Provyta 2		Provyta 3		Provyta 4		Totalt
	Vikt	Volym	Vikt	Volym	Vikt	Volym	Vikt	Volym	Vikt
	[ton]	[m ³]	[ton]	[m ³]	[ton]	[m ³]	[ton]	[m ³]	[ton]
Tätskikt (FSA40)									
TS Slam (ton)	85		84		107		95		
Våtvikt slam (ton)	258	232	263	237	333	300	287	258	
TS aska (ton)	64		78		107		69		
Våtvikt aska (ton)	87	87	97	97	133	133	93	93	
Oxidationskikt (FSA60)									
Utgår									
Totalt FSA	345		361		467		380		1552
Total mängd slam (våtvikt)	258		263	237	333		287		1142
Total mängd aska (våtvikt)	87		97	97	133		93		410



Figur 3.5 Den sammanlagda tjockleken på tätskikt och dräneringsskikt [m].

Figure 3.5 Total thickness of top cover barrier and drainage layers [m].

Inom provyta 1 var dräneringsskiktets tjocklek ca 0,1 – 0,15 m, medan inom de övriga områdena var dräneringsskiktet ca 0,2 – 0,3 m tjockt. Tät och dräneringsskiktets sammanlagda tjocklek varierade mellan 0,7 – 1 m, figur 3.5. Genomsnittligt bedöms FSA-skiktets tjocklek ligga runt 0,55 m. Detta ger ca 1300 m³ (dvs. 2400 m²*0,55 m) vilket ger en genomsnittlig skrymdensitet på ca 1,2 ton/m³, se figur 3.2.

3.2.6 Kontroll 2004 vs 2005

Tätskiktetskonstruktionens huvudsakliga funktion är att minska inläckage av nederbördsvatten i deponin. Kravet på en deponi med *icke-farligt avfall* är att mängden vatten som perkolerar igenom tätskiktet är < 50 liter/m², år. Vatten som transporteras bort från deponin igenom dräneringsskiktet lämnar deponin, medan den del av vattnet som tränger igenom tätskiktet hamnar i deponin. Bedömningen, baserat på lysimeterundersökningen visar att mängden vatten som perkolerar ner till dräneringsskiktet ligger på ca 110 - 150 liter/m², år under det första året. Den totala nederbörds mängden ligger enligt Econovas mätningar på ca 650 liter/m², år (650 mm/år). Tätskiktets genomsnittliga permeabilitet uttryckt i liter vatten som perkolerar igenom tätskiktet per kvadratmeter och år är mellan 5 och 50 liter/m², år.

Lysimetrarna som undersöktes med avseende på metaller, pH, elektrisk konduktivitet och DOC redovisas i tabell 3.10. Resultat från utförda mätningar redovisas i tabell 3.11 och i bilaga C.

Tabell 3.10 Lysimetrarnas läge i tätskiktsskonstruktionen.

Table 3.10 Position of lysimeters in the top cover construction.

Lysimeter	Provyta	Skikt	2004 sept/2005 apr. Liter/m ² och år	Analys 2004 och 2005
3	1	Tätskikt FSA (ME)	14/50	Metaller, pH ^s , konduktivitet ^s och COD ^s
7	2	Tätskikt FSA (ME)	18/3	Metaller ^s , pH ^s , konduktivitet ^s och COD ^s
15	3	Tätskikt FSA (VU)	2/0	Metaller, pH ^s , konduktivitet ^s och COD ^s
20	2	Dräneringsskikt	54/9	Metaller, pH ^s , konduktivitet ^s och COD ^s
22	2	Skyddsskikt	112/71	Metaller, pH ^s , konduktivitet ^s och COD ^s
23	3	Skyddsskikt	16/27	Metaller, pH ^s , konduktivitet ^s och COD ^s

^s enbart 2005Tabell 3.11. Lysimetrarnas placering, genomsläpplighet, pH, konduktivitet (κ) och DOC (innehåll av löst organiskt kol) vid mätningen i april 2005.Table 3.11 The lysimeters position, permeability, pH, electric conductivity (κ) and DOC (dissolved organic carbon).

Lysimeter	Provyta	Skikt	Genomsläpplighe t Liter/m ² och år	pH	κ mS/m	DOC mg/l
3	1	Tätskikt FSA (ME)	50	9,3	2460	6400
7	2	Tätskikt FSA (VU/ME)	2	9,0	2500	8800
20	2	Dräneringsskikt	54	8,8	543	400
22	2	Skyddsskikt	71	7,4	825	200
23	3	Skyddsskikt	27	7,9	898	240

[#] lysimeter installerad under respektive skikt.

3.3 Beständighet

3.3.1 Allmänt

FSA materialets beständighet undersöktes i laboratorium och i fält. Laboratorieförsöken utfördes i syfte att bedöma FSA-materialets beständighet mot biologisk nedbrytning. Arbetet utfördes vid LTU:s Biolab som presenteras i sin helhet i bilaga B. I fält installerades gaslysimetrar i syfte att följa upp gasbildningen *in situ* i de olika skikten som ingick i tätskiktsskonstruktionen. Även resultat från gasmätning i fält redovisas i bilaga B. Nedan redogörs en sammanfattning av erhållna resultat. Nedan redogörs en sammanfattning av erhållna resultat.

Anaerob nedbrytning: Biogas bildas i prov med enbart avloppsslam, dvs. avloppsslammet innehåller organiskt material som kan brytas ner. DOC är beräknat efter 24 timmars lakning och att kol antas komma från en cellulosa molekyl.

Aerob nedbrytning: Mätning av CO₂ kunde inte utföras eftersom lakvatten som genereras av FSA-materialet är basiskt och CO₂ löser sig i lakvattnet. Detta förhindrar

mätning av CO₂ i gasfasen. Däremot kunde O₂ förbrukning observeras i samband med mätningarna. Vid mätningen kunde det observeras att O₂ förbrukas. Vid lakning av enbart flygaska förbrukas inte O₂, dvs. avloppsslam behövs för att etablera den biologiska aktiviteten. Det bör noteras att etablering av den biologiska aktiviteten tar tid. I vanliga jordar startar metanoxidation efter ca 4-5 dagar. I FSA-materialen tog det 2 veckor innan den biologiska aktiviteten aktiverades. Detta förklaras av att miljön inte är den bästa för mikroorganismer.

3.3.2 Mätning av DOC i lakvattnet

Mätning av DOC-halten i lakvattnet visar att den är liten jämfört med materialets totala organiska innehåll, mellan 4 och 5 % efter L/S lika med 100, tabell 3.12. Lakningshastigheten av tätskiktet är dock begränsad tack vare materialets täthet. I tabell 3.12 redovisas DOC i lakvattnet från lakningsförsöken med FSA respektive enbart slam. Eftersom DOC härstammar från slammet är den omräknad per gram TS ursprungligt slam sista kolumnen. Observera att vid höjning av tillsatsmängd flygaska, från 40 % till 60 %, höjs även utlakning av DOC från ca 3,5 % till ca 4,5 %. Flygaskan bidrar till mer utlakning av slammets organiska kolinnehåll genom att organiska syror bildas i alkalisk miljö.

Tabell 3.12 DOC i lakvattnet vid olika L/S-kvot och inblandning av flygaska

Table 3.12 DOC in the leach-water at different L/S-ratio and different percentage of flyash.

Provbeteckning	DOC [mg/l]	IC [mg/l]	DOC Vikt % FSA	DOC Vikt % slam
Aska 1 40 % L/S 10	796	6	2,0	3,3
Aska 1 40 % L/S 100	89	9	2,2	3,7
Aska 1 60 % L/S 10	733	6	1,8	4,6
Aska 1 60 % L/S 100	74	2	1,8	4,6
Aska 2 40 % L/S 10	829	9	2,1	3,5
Aska 2 40 % L/S 100	92	3	2,3	3,8
Aska 2 60 % L/S 10	734	6	1,8	4,6
Aska 2 60 % L/S 100	73	3	1,8	4,1
Slam L/S 100	127	47	-	3,2

Slam L/S 10 gick ej att filtrera

Aska 1 – Flygaska VU

Aska 2 – Flygaska ME

IC oorganiskt kol, exempelvis karbonater.

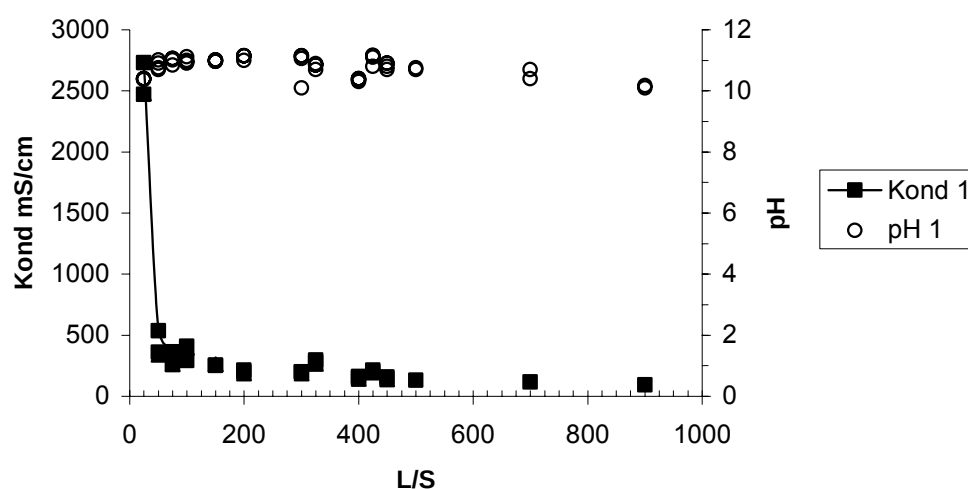
3.3.3 Gasbildningsförsöken

Undersökningen av gasbildningen visar att den biologiska aktiviteten i FSA-material hämmas av flygaskan. Vid aeroba förhållanden tar det tid att etablera metanoxidation eller respiration, dvs. den kommer igång efter en viss tids inkubation. Vid anaeroba förhållanden bildades ingen gas i FSA material med 60 % flygaska. I enstaka prover (vid inblandning av 40 % flygaska) kunde gasbildning noteras. De gaser som bildas under anaeroba förhållanden är bl.a. CH₄, CO₂ och H₂.

FSA-prov undersöktes vid anaeroba förhållanden vad gäller gasbildning efter lakning med L/S 10 och 100. Undersökningen visar att gasbildningen är likvärdig i dessa två

prover. Gasbildningen hämmas av flygaskan men det bildas lite gas i enstaka prover utan ett klart samband. Exempelvis har enstaka prover gett gas, medan tillhörande dubbelprov inte uppvisade någon gasbildning. De tester som genomfördes i provens eget lakvatten (dvs. lakvattnet är kvar i provet) visar låg/ingen gasbildning. Tolkningen av dessa resultat är att det finns ämnen i lakvattnet (lösta joner) som hämmar gasbildning. Efter sköljningen som sker efter de första lakningsetapperna blir miljön något mer gynnsam för gasbildning.

Noterbart är att pH-värdet är högt i dessa prover, dvs. att CO_2 löser sig i vattnet och gasbildningen "halveras" pga detta. Bara CH_4 mättes i dessa prover. I en tätskiktsskonstruktion antas det råda anaeroba förhållanden, tack vare hög vattenmättnad.



Figur 3.6 Mätning av pH och konduktivitet i lakvattenprover från försök i laboratorium.
Figure 3.6 Measurements of pH and conductivity in leach-water test

Som det framgår i figur 3.6 minskar lakvattnets elektriska konduktivitet med ökande L/S kvot, medan pH varierar mellan 10,1 och 10,4 oberoende L/S-kvot. pH ligger över 10 även efter L/S 900 medan konduktiviteten minskar drastiskt och stabiliseras vid 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ mellan L/S 50 och 900 (figur 3.6). Vid L/S < 50 är det en pH- och konduktivitetseffekt som hämmar biologisk aktivitet, medan vid höga L/S är det en effekt av högt pH-värde som hindrar gasbildning.

Det utfördes en serie jämförande undersökningar för att kontrollera om det är pH eller konduktivitet som styr den hämmande effekten på den biologiska nedbrytningen under anaeroba förhållanden. Försöken tyder på att både pH och de lösliga ämnena i flygaskan påverkar nedbrytningen negativt. Dessutom verkar dessa två faktorer samverka.

Vattentransporten genom täckskiktet bedöms vara låg. Vid låg vattenomsättning kommer pH och salthalten i porvattnet att vara höga vilket hämmar nedbrytningen i FSA-materialet.

Resultaten från de anaeroba nedbrytningsförsöken visar att en viss biologisk nedbrytning sker i de prover som innehåller 40 % aska. Biogasbildningen (CH_4 , CO_2 etc.) från FSA-blandningen är något lägre per gram slam än från enbart slam, men är i samma storleksordning. En fördröjning av nedbrytningsstarten upp till 2 månader kunde också observeras. Gasbildningen som observerades från blandningen med 60 % aska är försumbar och beror huvudsakligen på tryckutjämning. Undersökningen visar att lakning vid L/S 10 eller 100 ger jämförbara resultat, dvs. ingen mätbar gasbildning.

Tabell 3.13 Gasbildning i FSA40-materialen och nedbrytning av avloppsslam i anaerob miljö.

Table 3.13 Gas production in the FSA40-material and decomposing of sewage sludge in an anaerobic environment.

	Bildning av biogas# ml	Nedbrytning %-vikt TS slam
FSA 1 L/S=10	241	5,4
FSA 1 L/S=100	53	1,2
FSA 2 L/S=10	144	3,2
FSA 2 L/S=100	115	2,6
Slam L/S=100	294	3,9
Slam L/S=100	745	10

En del av CO_2 löser sig i vattnet.

I tabell 3.13 kan ses att i det råa slammet har mellan 4 och 10 % av det organiska materialet brutits ned till gas, vilket betyder att en stor andel av slammet är svårnedbrytbart. I tabell 3.13 redovisas de högsta nedbrytningshalterna. Som mest hade 5,4 % av slammet i FSA40 brutits ned. Förutom den biologiska nedbrytningen hade dessutom mellan 3,4 och 4,5 % DOC avgått genom lakvattnet (tabell 3.12).

För aeroba förhållanden visade respirationstesten att syreförbrukningen kan relateras till förekomsten av organiskt material i FSA-blandningen vilket indikerar en biologisk nedbrytning. I samtliga metanoxideringsförsök kunde en med tiden ökande syreförbrukning observeras. Jämfört med vanlig jord, var etableringstiden för metanoxidation lång med detta material, vilket tyder på en toxisk effekt hos FSA-materialet. Man kan även notera att H_2 bildas i flygaskan. När avloppsslam finns inblandat, sker ingen mätbar bildning av H_2 . Förmodligen förbrukas H_2 allt eftersom den bildas, vilket skulle kunna förklara förbrukningen O_2 i respirationsförsöken.

3.3.4 Analyser av metallhalten i lakvattnet

Metallanalyser på lakvattenprover visar inte några oväntade ”höga halter”. Analys av olika grundämnen i lakvatten efter lakning vid L/S 10 och 100 visar att kalcium är den dominerande jonen i lakvattnet. FSA-materialens (FSA med flygaska från Uppsala respektive Västerås) tungmetallhalter är jämförbara. Karbonatiseringsförsöken visar att FSA-material kan binda upp till 30 ml CO_2 per gram TS.

3.3.5 Fältundersökning

Resultaten från fältprovtagningen visar att koldioxidhalten i tät- och dräneringsskiktet är låg. I dessa skikt är miljön basisk vilket medför att koldioxiden löser sig i porvattnet och inte förekommer i gasform. I skyddsskiktet, vilket inte innehåller aska, förekommer både metan och koldioxid. I tätskiktet domineras gasen av kvävgas som fångades i samband med byggnationen. Syre har förbrukats och en del metan har bildats. Förekomst av eventuellt höga syrehalter beror på luftintrång eller felaktig provtagning. Kvävgashalten minskade jämfört med den första provtagningen medan metanhalten ökade, vilket tyder på viss biologisk aktivitet. Att gassammansättning variation i tiden är liten tyder på en låg gasomsättning och en låg gasbildning. Metanhalten minskade något vid mätningen i april 2005. Det kan bero på att nedbrytningen har avstannat under vintern och eller att den har avstannat generellt. Konkreta slutsatser kan ej dras baserat på bara en mätning i år.

I två av lysimetrarna undersöktes vattnets DOC-halt (april 2005), lysimeter 3 och lysimeter 7, båda FSA material med flygaska från Mälarenergi Västerås, bilaga C och tabell C.4. Lysimeter 3 uppsamlade motsvarande ca 50 liter per m², år och lysimeter 7 ca 3 liter per m², år. DOC halterna redovisas i tabell 3.14. Tätskiktet som var i kontakt med detta vatten innehåller ca 310 kg TS FSA45, dvs. ca 171 kg TS slam per m². DOC i porvattnet redovisas i tabellen som vikt-% av TS avloppsslam. Eftersom det mesta av vattnet som samlades upp i lysimeter 7 var pressvatten (orsakad av kompression) har inte FSA materialet sköljts ut ordentligt på DOC. L/S-kvoten i detta fall ligger på ca 0,01. I lysimeter 3 uppsamlades ca 50 liter vatten från FSA skiktet. Halten DOC i lysimetervattnet var 6400 mg/liter. Vid L/S-kvot ca 0,16 lakades ca 0,19 % av slammets organiska kolinnehåll ut från tätskiktet. Fler mätningar under längre tid behövs för att kunna göra en mer noggrann utvärdering.

Tabell 3.14 DOC-halter i lysimetrarna 3 och 7 (april 2005).

Table 3.14 DOC contents in the lysimeters 3 and 7 (April 2005).

Lysimeter Nr.	DOC, mg/liter	Volym, liter/m ² , år	Halt, mg	Andel TS slam i tätskikt	DOC vikt% TS slam	L/S
3	6400	50	320000	171	0,19%	0,16
7	8800	3	26400	171	0,02%	0,01

3.4 Ekonomisk bedömning

Entreprenadkostnaderna för en storskalig konstruktion, större än ca 3 hektar, är sammanställd i tabell 3.15. De kostnader som ingår i avjämningsskiktet är transport av flygaska från Dragmossens återvinningsanläggning till Dragmossens deponi, ca 500 m, samt utläggning av skiktet med hjälp av en grävmaskin. Kostnaden för tätskiktet inkluderar förblandning av FSA med rotorskopa och blandning med tvångsblandare, transport av blandat FSA från återvinningsanläggningen till deponin samt utläggning av skiktet. Kostnaden för dräneringsskiktet inkluderar transport på ca 50 m samt utläggning av skiktet. Kostnaden för skydds- och vegetationsskiktet inkluderar transport av materialet från återvinningsanläggningen till deponin samt utläggning av skikten. Materialkostnad och transport för avjämningsskikt, tätskikt och dräneringsskikt är i tabellen satt till 0 kr. Transportkostnaden för skydds- och vegetationsskikt är i tabellen satt till 0 kr. Den totala kostnaden för konstruktionen är ca 225 kr/m². Transportavståndet till Dragmossens deponi från Stockholm, Uppsala och Västerås är ca 16 mil, 9 mil respektive 17 mil. Som jämförelse anges kostnader som uppkommer om traditionella material nyttjas i tätskiktskonstruktionen [15], tabell 3.16.

Tabell 3.15 Kostnadsbedömning för konstruktionen med återvunnet material.

Table 3.15 Cost based on a construction with recycled materials

Skikt	Material	Tjocklek (m)	Kostnad (kr/m ²)
Skydds- och vegetationsskikt	100 % återvunnen jord och fibermull	1,5	115
Dräneringsskikt	Slaggrus	0,2	10
Tätskikt	FSA	0,6	65
Avjämningskikt	Aska	0,5	35
Summa			225

Tabell 3.16 Kostnadsbedömning för konstruktionen med traditionella material].

Table 3.16 Construction with "traditional" materials in a barrier construction.

Skikt	Material	Tjocklek (m)	Kostnad (kr/m ²)
Växtetableringsskikt	Sådd	-	5
Skyddsskikt	Morän	1,5	150
Materialavskiljande lager	Geotextil, bruksklass 2-3	-	10
Dräneringsskikt	Bergkross	0,2	40
Materialavskiljande lager	Geotextil, bruksklass 2-3	-	10
Tätskikt	Lergeomembran (bentonitmatta)		75
Avjämningskikt	Bergkross	0,5	100
Summa			390

4 Resultatanalys

4.1 Kvalitet vs homogenitet

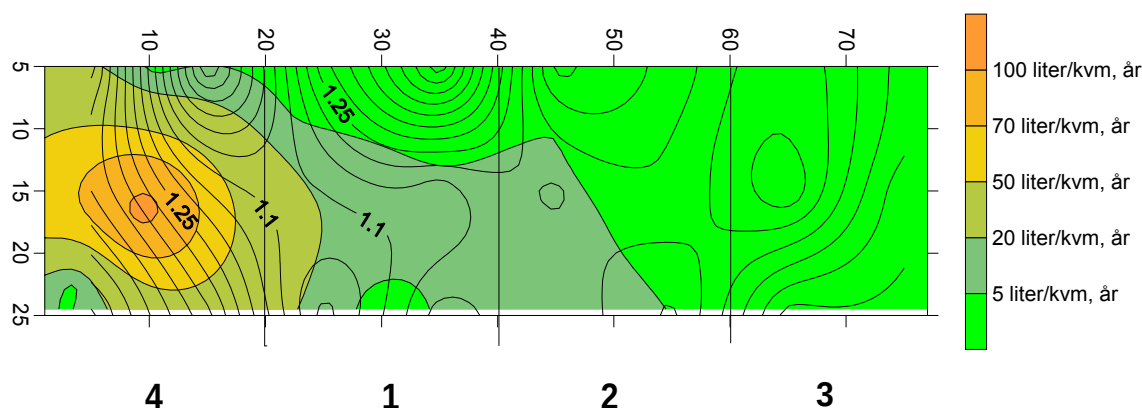
Vid försöken har två flygaskor, en från Mälarenergi Västerås (ME) och en från Vattenfall Uppsala (VU), använts. Mälarenergis flygaska har högre konduktivitet, innehåll av bl.a. Na, och K samt härdar snabbare än Vattenfalls flygaska, se bilaga E. Vid uttaget av ME flygaskan var vattentillsatsen ojämn med en variation mellan 11 och 38 %, vilket medförde att flygaskan började härda redan under transporten. Resultatet blev att flygaskan innehöll stor andel i kornstorlek motsvarande grusfraktion. Problemen med vattentillsatsen åtgärdades direkt efter pilotförsöket i Dragmossen. VU flygaskan hade en jämn vattenkvot på ca 20 % och granulometriskt kan beskrivas bestå av silt- och sandfraktion. Avloppsslammet från Bromma höll en jämn kvalitet vad gäller TS-halt (28 -33 %) igenom hela försöksperioden.

Blandningsverktygets effektivitet är avgörande FSA-materialets kvalitet och homogenitet. För att effektivt kunna blanda avloppsslam och flygaska förblandades materialen med en Allu-skopa innan tvångsblandaren homogeniserade FSA-materialet.

Flygaskans vattenkvot och därmed hårdningsgrad är en viktig faktor som påverkar FSA-materialets kvalitet. Genom att hårdad flygaska är mer grovkornig finns det risk för att blandning mellan slam och aska blir mindre homogen. FSA-material som tillverkades med ME flygaska innehöll 45 % TS tillsats av flygaska. FSA-materialet var hanterbart, men innehöll en del klumpar av flygaska. För att få ett hanterbart FSA-material med flygaska från VU höjdes tillsatsen av flygaska till 50 % TS. En tillsats av 50 % av TS VU flygaska behövdes för att få en konsistens på FSA-materialet som gick att hantera utan driftstörning. Trots större mängd VU flygaska upplevdes materialet som mer svårhanterbart vid tillverkning än motsvarande FSA-material med ME flygaska. ME flygaska var basen i FSA-material i provytorna 4, 1 och en del av provyta 2, medan VU flygaska var basen i provytorna 2 och 3.

Provyta 4 tillverkades först och vid tillverkning av FSA-materialet till denna yta var det stora inkörningsproblem/driftstörningar som medförde att blandningens homogenitet var sämre. Problemen var inte relaterade till de ingående materialen utan till blandningsverktyget. Vid utläggning packades FSA-materialet med skopan på samma sätt under hela försökets gång, vilket medför att densitetsskillnader beror till stor del på variation i andelen ingående material. Inom provyta 4 varierade FSA-materialets densitet mellan 0,75 och 1,66 t/m³. Andelen flygaska och avloppsslam varierade på grund av driftstopp vid blandningen. Flygaskans skrymdensitet är högre än slammets, vilket medför att ju större andel flygaska desto högre skrymdensitet får FSA-materialet. FSA-materialets täthet påverkas av de ingående materialens skrymdensitet, genom att mer flygaska ger ett mer poröst och permeabelt material. Inkörningsproblemen minskade ned tiden och från provyta 1 blev FSA-materialets homogenitet allt bättre. Figur 4.1 visar att provyta 4 hade den högsta skrymdensiteten och den högsta genomsläppligheten. I en lysimeter var FSA-materialets genomsläpplighet ca 113 liter/m², år vid det första mättillfället, oktober 2004. Figur 4.1

provytans täthet ligger under 5 liter/m², år för större delen av provyta 2 och provyta 3 vid mätningen i oktober 2004. Inom dessa provytor användes flygaska från VU i huvudsak. Provyta 1, med flygaska från ME en har täthet som ligger under 20 liter/m², år. Provyta 4 är den provyta där arbetet startades och FSA-materialets homogenitet och andelen flygaska i blandningen varierade. FSA-material komprimeras tack vare belastningen från dränerings- och skyddsskiktet. Kompression kommer att minska tätskiktets genomsläpplighet.



Figur 4.1 Täthet/densitet

Figure 4.1 Permeability/density

4.2 Beständighet

Gasbildningsförsöken visar att den biologiska nedbrytningen av organiskt material i blandningen flygaska och avloppsslam (FSA) hämmas av tillsatsen av flygaska. Högt pH-värde är förmodligen huvudorsaken till den nedbrytningshämmande effekten, men förekomsten av lösta joner (salter, metaller) vid lägre L/S-kvoter verkar också bidra till att hämma nedbrytningen. De lösliga jonerna lakas ut med tiden, vilket tidsbegränsar dess nedbrytningshämmande effekt.

Efter 1 års undersökningar av gasbildningen i laboriemiljö hade som högst ca 10 % (se tabell 3.13) av slammet brutits ned genom biologisk aktivitet i de flaskorna som innehöll enbart slam. Nedbrytningsförsöken utfördes under optimala förhållanden vid aeroba och vid anaeroba förhållanden med tillgång till vatten och vid jämn temperatur. Detta innebär att den andelen organiskt materialet som är nedbrytbart har brutits ned och att de resterande 90 % av slammet är svårnedbrytbart. Nedbrytningsförsök pågår vanligtvis under 3-4 månader och avtar logaritmiskt med tiden. Efter 4 månader har det mesta av gaspotentialen utvecklats. I detta fall hade 5 % av slammet brutits ned efter 6 månader och ytterligare 6 månader lede till att ytterligare 1 % bröts ned. Därför kan man göra bedömningen att nedbrytningstakten kommer att fortsätta att minska. nedbrytningstakten kommer att fortsätta att minska. Däremot säger dessa gasbildningsförsök inget om hur mycket av materialet som kommer att brytas ned till organiska syror som kan lakas ut.

FSA har en hämmande effekt på den biologiska nedbrytningen och vattengenomsättningen är låg vilket indikerar att FSA kommer att vara svårare att bryta

ned än slammet i försöken och att FSA kommer att kunna bibehålla sin låga permeabilitet även om en viss andel slam bryts ned. Nedbrytningen i fält kommer att ske långsammare än i laboratorieförsöken då vatten transporteras långsammare i FSA och kan därmed begränsa nedbrytningen. I fält kommer tätskiktet att vara utsatt för vattenbelastning från dräneringsskiktet, vilket försäkrar anaerobt tillstånd i tätskiktet. Under det första året rådde anaerobt tillstånd i tätskiktsmaterialet i fält.

Flygaskans höga konduktivitet och pH har en hämmande effekt på biologisk aktivitet i avloppsslammet i ett FSA-material jämfört med rent slam. En askhalt på 40 % fördröjer nedbrytningen men inhiberar den inte, medan en askhalt på 60 % inhiberar den biologiska nedbrytningen helt (nedbrytning till utlakningsbara syror ingick inte i gasförsöken). En kombination av höga salthalter och högt pH är huvudförklaringen till att den biologiska aktiviteten inhiberas. Fältförsöken visar att metanbildning förekommer i FSA-materialet. Vid provtagningstillfället i april 2005 minskade andelen metangas i gaslysimetrarna från tätskiktet. Orsaken till detta kan vara att nedbrytningen har avstannat eller att nedbrytningen har hämmats under vintertid. I tabellerna 4.1 och 4.2 redovisas vattnets metallhalter från laboratorieförsök med L/S 10 och 100, och för två olika blandningar, en med 40 % TS flygaska och en med 60 % TS flygaska. Dessutom redovisas det halter från lysimetrarna. Vid en jämförelse är det tydligt att halterna av K och Na är avsevärt högre i vattenproverna från fält än från laboratorieförsöken. Detta förhållande tyder på att en stor del av det vatten som lysimetrarna har samlat upp är vatten som pressades ut vid kompression av FSA-skiktet.

Tabell 4.1 Metallanalys på lakvatten från lakning av FSA40 och FSA60 med VU flygaska och från lysimeter från fält med FSA50.

Table 4.1 Metal contents of leachate water from FSA40 and FSA60 of L/S=10 and 100 and from lysimeter from field test. (FSA with fly ash from Vattenfall Uppsala).

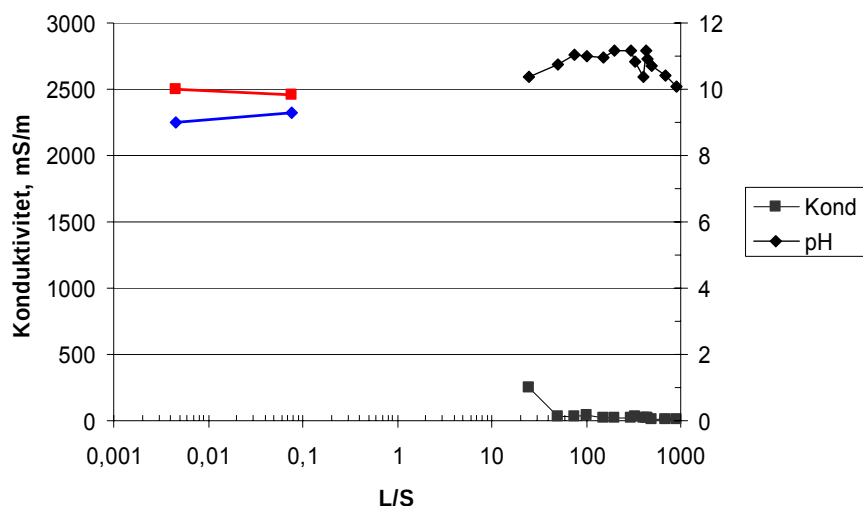
Vattenfall Uppsala		L/S =10 FSA40	L/S =100 FSA40	L/S =10 FSA60	L/S =100 FSA60	PY3 (VU)
Ca	mg/l	320	50	493	125	254
Mg	mg/l	35,7	10,4	0,42	0,061	0,147
K	mg/l	33	5	19	5	56,2
Na	mg/l	19	6	15	6	40,2
As	µg/l	50	11	50	9	ud
Ba	mg/l	0,041	4	0,073	0,019	0,142
Cd	µg/l	1	ud	1	ud	ud
Co	µg/l	28	4	23	3	61,7
Cr	µg/l	8	6	9	10	ud
Cu	µg/l	787	89	1520	283	1170
Fe	µg/l	770	197	283	136	0,0406
Mn	µg/l	13	3	7	2	ud
Ni	µg/l	233	33	158	ud	40,8
Pb	µg/l	ud	ud	ud	ud	ud
Zn	µg/l	ud	ud	ud	ud	28,8

Tabell 4.2 Metallanalys på lakvatten från lakning av FSA40 och FSA60 med ME flygaska och från lysimeter från fält med FSA45.

Table 4.2 Metal contents of leachate water from FSA40 and FSA60 of L/S=10 and 100 and from lysimeter from field test. (FSA with fly ash from Mälarenergi Västerås).

Mälarenergi		L/S =10	L/S =100	L/S =10	L/S =100		PY1	PY1	PY2
		FSA40	FSA40	FSA60	FSA60		ME	ME	ME
Ca	mg/l	609	173	521	166		1070	593	1290
Mg	mg/l	9,89	1,69	1,56	0,249		12,5	13,3	3,14
K	mg/l	420	60	666	59		1820	2010	1310
Na	mg/l	129	20	176	18		953	1030	1020
As	µg/l	64	8	39	7		177	112	121
Ba	mg/l	0,092	42	0,179	0,093		0,192	0,0637	0,171
Cd	µg/l	1	ud	1	ud		ud	1,17	1,28
Co	µg/l	28	4	26	3		39,1	33,2	52,8
Cr	µg/l	15	6	18	12		ud	0,694	<3
Cu	µg/l	1720	135	1830	297		258	51,4	56,8
Fe	µg/l	588	202	203	84		0,273	0,207	0,205
Mn	µg/l	30	8	27	4		44	12,8	90,1
Ni	µg/l	202	38	175	ud		225	204	452
Pb	µg/l	ud	ud	ud	ud		ud	4,71	28,9
Zn	µg/l	42	2	17	ud		62,7	55,2	106

I figur 4.2 redovisas pH och konduktivitet från lakning i laboratoriemiljö, L/S 25 – L/S 900 och från fältförsöken. De röda och blåa markeringarna är från fältförsöken (lysimetervattnet). FSA materialets initiala pH är ca 9 i lysimetervattnet. Vid lakning i laboratorium, med allt högre L/S-kvot, stiger pH till 11. Vid L/S > 400 börjar pH avta, och vid L/S 900 var pH ca 10. Konduktivitetens och pH värdena i fält indikerar att det vatten som samlades upp i lysimetern var vatten som pressades ut ur FSA-tätskiktet.



Figur 4.2 pH och konduktivitet vid olika L/S-kvoter.

Figure 4.2 pH and electric conductivity at different L/S ratio.

4.3 Permeabilitet

FSA-materialets täthet ligger i storleksordning 5 till 10 liter/m², år om kvalitén är rätt, se provyta 2 och 3. Materialets skrymdensitet är ca 1,2 ton/m³. Den utlagda mäktigheten av tätskiktet är ca 0,55 m. Detta ger att 1 m² stor yta väger:

$$1,2 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} * 0,55 \text{ m} = 660 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

FSA-materialets genomsnittliga vattenkvot, w, är ca 112 %. Detta ger att varje kvadratmeter tätskikt består av:

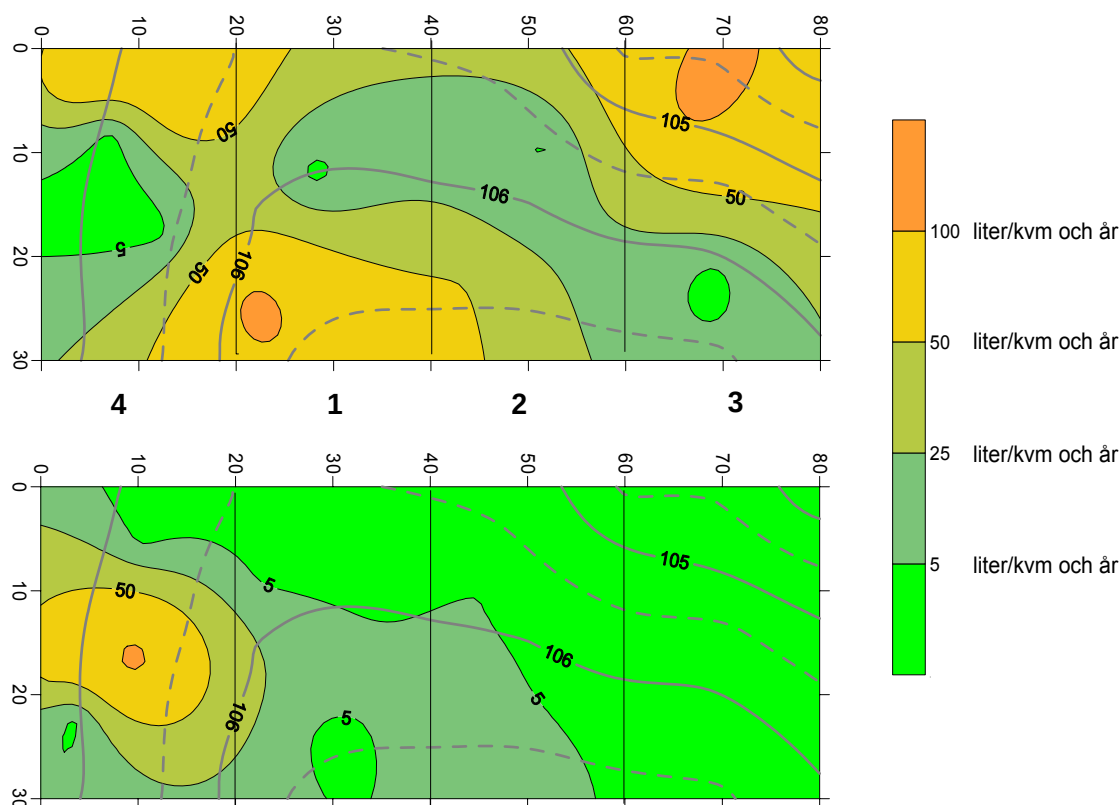
$$\frac{660}{(1+1,12)} \approx 310 \text{ kg TS}$$

Med en vattenmängd på 10 liter/m², år uppnås L/S 1 efter 31 år. L/S 10 tar ca 310 år. Laboratieförsöken indikerar att nedbrytningen är minimal även vid L/S > 25 och att högt pH råder vid ca L/S < 400. Detta ger att lakningen som FSA utsätts i en tätskiktsskonstruktion inte medför någon förhöjd risk för att nedbrytningen ska kunna starta på grund av hög L/S-kvot. Även med en vattenmängd på 50 liter/m², år tar det nästan 160 år att uppnå L/S 25.

I figur 4.3 redovisas skydds- och dräneringsskiktets genomsläpplighet (övre figur) vid det första mättillfället september/oktober 2004. Av figuren framgår att inom provyta 1 och 3 är inläckaget av vatten störst. Tätskiktets genomsläpplighet (nedre bild) uppvisar hög täthet med undantag av provyta 4. Det var denna provyta som har:

- sämsta FSA kvalitén,
- infiltrerat vatten från provyta 1 som rinner in mot denna provyta
- dräneringsskikt som är tunnare inom provyta 4 jämfört med provyta 1.

I figur 4.4 redovisas motsvarande resultat för mätningen i april 2005. Skydds- och tätskiktet släppte igenom mindre mängd vatten under vinter-vår perioden. Tätskiktet under perioden hösten 2004 till våren 2005 blev tätare inom provyta 4 än under sommarhalvåret. Hela deponiytan klarar riktvärdet 50 liter/m², år vid mätningen april 2004.



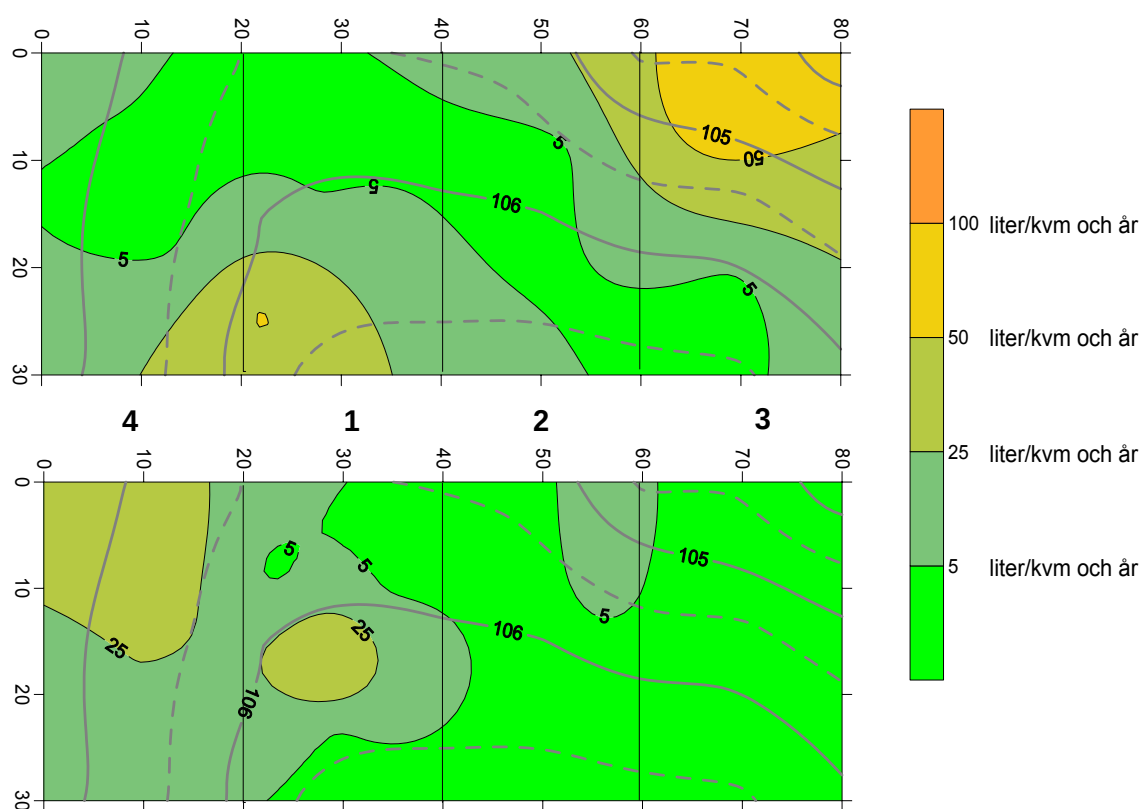
Figur 4.3 Skydds- och dräneringsskiktets genomsläpplighet och dräneringslagrets lutning (övre figur) och tätskiktets genomsläpplighet (nedre figur), hösten 2004.

Figure 4.3 Permeability of protection and drainage layers and the tilt of the drainage layer (upper picture) and the permeability of the barrier layer (autumn 2004).

Som det framgår i figur 4.3 är skyddsskiktets permeabilitet höga, 100 liter/m², år, i två punkter (orange färg i figur 4.3). Lutningen av provyta 4 sker västerut mot kortsidan på deponicellen. Det framgår även att inläckaget på provyta 4 genom skyddsskiktet är litet, < 50 liter/m², år. Trots detta visar figur 4.3 att tätskiktet på provyta 4 inte fungerar i enstaka punkter. Följande förutsättningar bidrar till den förhållandevis höga genomsläppligheten på provyta 4:

- Vatteninfiltrationen är stor i angränsande område inom provyta 1.
- Vatten från provyta 1 leds in till provyta 4 genom dräneringsskiktet.
- Dräneringsskiktet på provyta 1 är 0,1 m slaggrus medan på provyta 4 är dräneringsmaterialet sand och skiktets tjocklek ca 0,07 m.
- Lutningen inom provyta 4 området är mindre än på provyta 1.
- Tätskiktets, dvs. FSA-materialets kvalitet är mindre bra inom provyta 4 området. Densiteten på materialet är hög, vilket indikerar en högre inblandning av flygaska. Materialets permeabilitet påverkas negativt av för höga halter av flygaska.

Vid mätningen under våren 2005 höjdes tätskiktets täthet inom provyta 4. Denna höjning bedöms vara en kombination av tätskiktets kompression och att under vinterhalvåret var vattenbelastningen mindre.



Figur 4.4 Skydds- och dräneringsskiktens genomsläpplighet och dräneringslagrets lutning (övre figur) och tätskiktets genomsläpplighet (nedre figur), våren 2005.

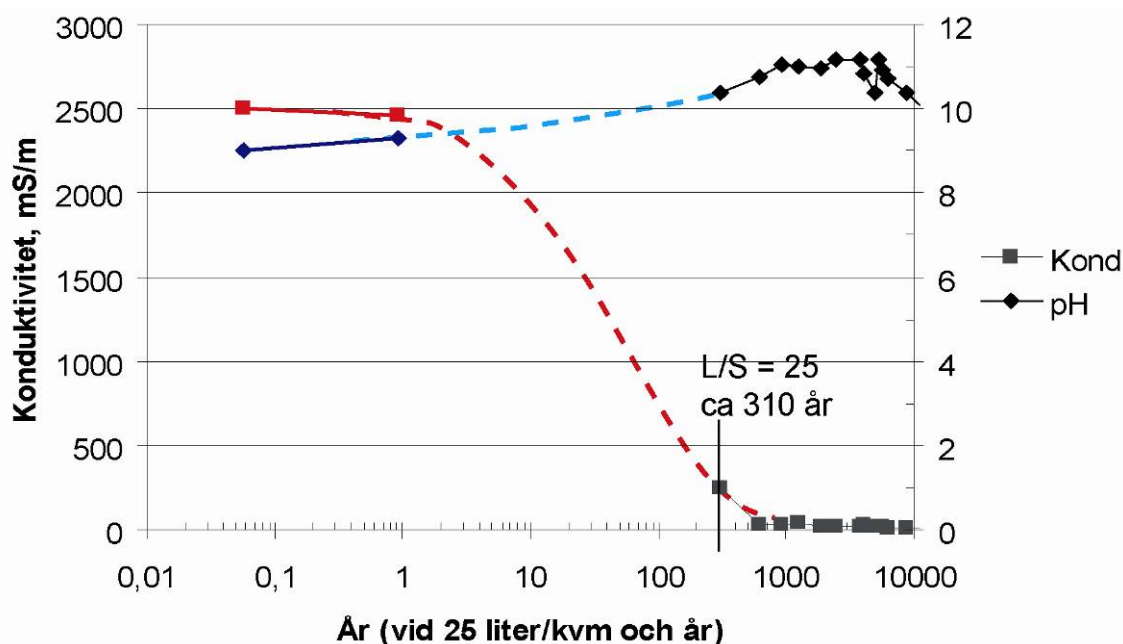
Figure 4.4 Permeability of protection and drainage layers and the tilt of the drainage layer (upper picture) and the permeability of the barrier layer (spring 2005)

5 Slutsatser

Beständighet

Genom att blanda färsk flygaska med rötat avloppsslam kan ett tätskiktsmaterial tas fram som har en täthet som är $< 10 \text{ liter/m}^2$, år. Laboratorieundersökningen indikerar att anaerob nedbrytning av organiskt material i FSA 40 uppgår maximalt till ca 6 % av det totala innehållet av organiskt material i avloppsslammet, vilket avgår som biogas. Utöver biogas bildas det även organiska syror som förekommer som DOC och som kan lakas ut ur materialet, ca 3,5 % av TS slamminnehållet. Vid 60 % tillsats av flygaska, dvs. FSA60, kan ingen biologisk nedbrytning detekteras under laboratorieförhållanden. Att nedbrytningen av organiskt material hämmas i FSA beror på en kombinerad effekt av högt pH-värde och hög konduktivitet. Däremot höjs halten DOC som kan lakas ut ur FSA-materialet, till ca 4,5 % TS av slamminnehållet (vid både L/S 10 och L/S 100).

Laboratorieundersökningen utfördes på uppslammat FSA-material vid rumstemperatur. I applikationen som tätskikt kommer FSA-materialet att ha en hög täthet och skiktets temperatur kommer att vara lägre jämfört med laboratoriemiljön, vilket antas försvåra nedbrytningen ytterligare. I FSA som tätskiktsmaterial antas anaeroba förhållanden råda. I figur 5.1 redovisas en schematisk bild av bedömd pH och konduktivitet efter L/S = 25 som motsvarar ca 310 år vid en permeabilitet som motsvarar 25 liter/m^2 , år.



Figur 5.1 Schematisk bild - pH och konduktivitet i porvatten i ett FSA45 tätskikt (med flygaska från Mälarenergi) vid en genomsläpplighet som motsvarar 25 liter/m^2 , år.

Figure 5.1 Schematic picture - pH and electric conductivity in the pore water of FSA45 (fly ash from Mälarenergi) at a permeability of 25 liter/m^2 and year.

Kvalitet

De ingående materialens kvalitet är en viktig faktor för att få en homogen FSA-blandning. Blandningens kvalitet är i sin tur avgörande för materialets täthet. Undersökningen utfördes med två flygaskor som hade olika vattenkvoter (eller TS-halter). Resultaten visar att flygaska som har vattenkvot $> 20 \%$ ger sämre FSA-kvalitet. Hög vattenkvot medför att härdningsprocesser kan påbörjas i flygaskan, vilket i sin tur medför att flygaskan klumpar ihop sig och bildar granulat. Genom att flygaskans kornstorleksfördelning förändras blir FSA-blandningen mindre homogen och flygaskan kan inte finfördelas lika effektivt. Avloppsslammet hade en jämn kvalitet under hela försöket och en TS-halt på ca 30 %.

Täthet

Försöksytans lutning, dräneringsskiktets effektivitet och skyddsskiktets effektivitet att dränera bort överflödigt vatten är andra viktiga faktorer som påverkar hela tätskiktets konstruktionens täthet. I det aktuella försöket resulterade följande faktorer i att genomsläppligheten blev förhöjd vid den första mätningen, november 2004:

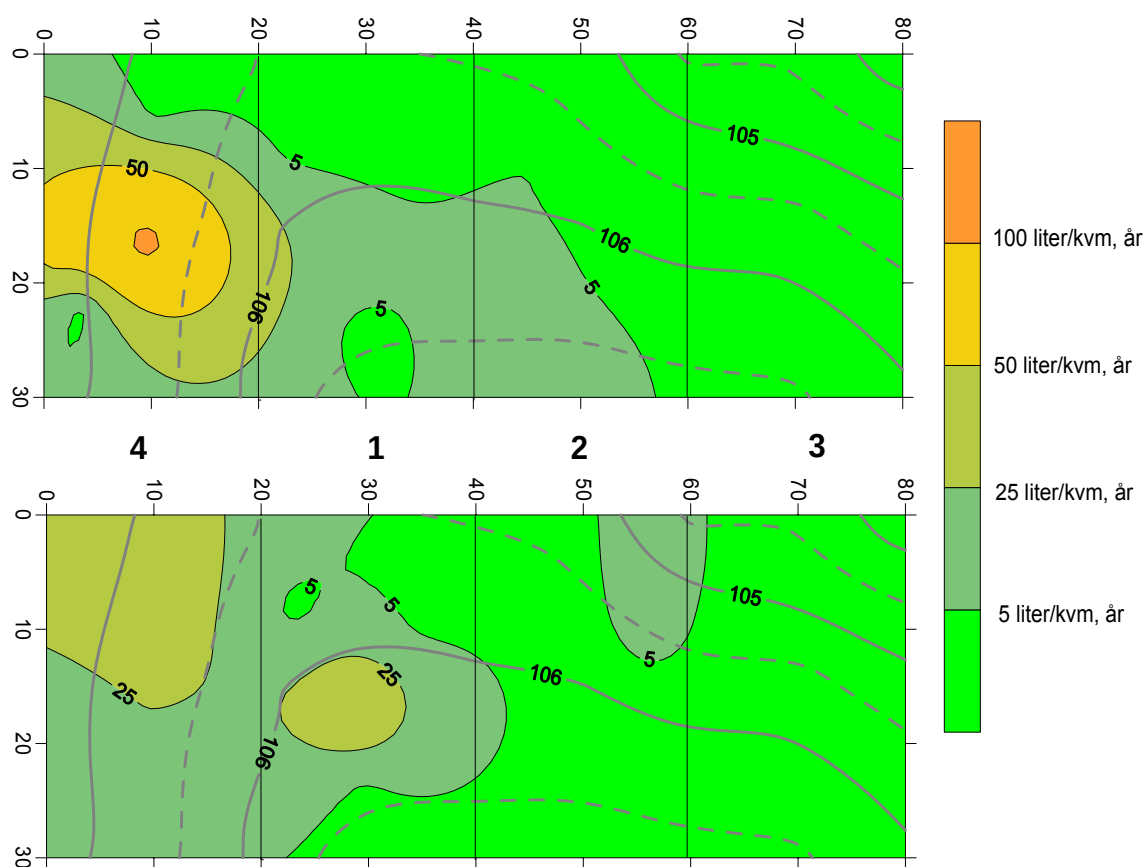
- Stor genomströmning av vatten igenom skyddsskiktet (ett lokalt område)
- Vattentransport från detta delområde med bra dräneringseffekt till ett annat delområde med sämre dräneringseffekt
- Sämre FSA kvalitet i det område som hade sämre dräneringsförutsättningar.
- Liten lutning på det aktuella delområdet.

Mätningen vid april 2005 visar att inom samma område är tätskiktets permeabilitet låg ($< 50 \text{ liter/m}^2, \text{ år}$). Laboratorieundersökningar visar och fältundersökningen indikerar att FSA-materialets täthet ökar genom att materialet komprimeras. Lasten från skyddsskiktet medför kompression av FSA-skiktet, vilket leder till en höjning av materialets täthet. Tätheten medför att mängden vatten som perkolerar materialet är liten, vilket i sin tur medför att det kan ta lång tid att uppnå höga L/S-kvoter. En långsam ursköljning av salter i FSA-materialet medför att den kombinerade "steriliserande" effekten av hög konduktivitet och högt pH varar under ett långt tidsperspektiv. Med skiktjocklek på 0,55 m på tätskiktetsmaterial är bedömningen att L/S 10 uppnås först efter flera hundra år, tabell 5.2. Laboratorieundersökningen av FSA-materialets beständighet visar att avloppsslam med inblandning av flygaska är ett material som är svårnedbrytbart. Även med en något sämre blandningskvalitet och högre genomsläpplighet är bedömningen att de nedbrytningsprocesser, som kan äventyra tätheten, är mycket långsamma och är begränsade vilket antyder att tätskiktet kommer att ha en god funktion under lång tidsperspektiv.

Tabell 5.1 Bedömd tid för att uppnå L/S-kvot 1, 10, 25 och 100 i ett material med en genomsläpplighet på 5, 20, 50 och 100 liter/m², år.

Table 5.1 Evaluated time span to achieve L/S 1, 10, 25 and 100 through a material with a permeability of 5, 20, 50 and 100 liter/m² and year.

FSA Skiktjocklek, m	FSA torrdensitet, kg/m ³	Genomsläpplighet, liter/m ² år	L/S 1 år	L/S 10 år	L/S 25 år	L/S 100 år
0,55	566	5	62	620	1557	6226
0,55	566	10	31	310	778	3113
0,55	566	50	6	62	156	623
0,55	566	100	3	31	78	311



Figur 5.2 Bedömd täthet (liter/m², år) baserat på uppmätt vattenvolym i lysimetrarna under tätskiktet. Mätningen utfördes oktober 2004 (övre bild) och april 2005 (nedre bild).

Figure 5.2 Permeability assessment (litre/m² and year) based on measured volume of water in the lysimeters under the barrier layer. The measurements were conducted in October 2004 and April 2005.

Blandningsutrustning och utläggning

Utrustningen som användes vid blandning av flygaska och avloppsslam var en tvångsblandare som blandade ett material som innan hade blandats i förhand med en blandningsskopa. Blandningstekniken är inte helt utvecklad ännu och det kommer att krävas en del justeringar innan storskalig produktion är möjlig.

FSA tätskiktets tjocklek bör av geotekniska (rasrisk) skäl inte överskrida 0,6 m. Vid större mäktigheter finns det risk för stabilitetsproblem på deponiytor med branta slänter. Skiktjocklek mindre än 0,4 m bör inte heller nyttjas med hänsyn till att det blir svårt att hålla jämn skiktjocklek.

Ekonomi

En traditionell tätskiktskonstruktion kostar ca 400 kr/m². Den i denna studie studerade konstruktionen med FSA som tätskikt kostar ca 225 kr/m² exklusive transport- och materialkostnader för de ingående materialen. Eftersom hela konstruktionen består av återvunnet material finns det utrymme för FSA att kunna konkurrera med traditionella material även ekonomiskt.

Sammanfattningsvis

Som helhet bedöms FSA-material klara beständigheten, tätheten och hållfastheten i en tätskiktsapplikation. Homogent blandat är FSA40 – 55 ett tätskiktsmaterial som går att hantera vid blandning och utläggning samt klarar kvalitetskravet 50 liter/m², år. Vid de aktuella försöken nyttjades FSA45 – FSA55.

Följande för- och nackdelar kan sammanfattas för användning av FSA som tätskikt.

Fördelar:

- Tillgång till flygaska och avloppsslam
- Enkelt att hantera vid utläggning
- Tät material (kompressionen medför att tätheten ökar med tiden)
- Tätskiktets mäktighet medför att det tål viss sättning utan att tätheten äventyras.
- Enkelt att reparera vid eventuell skada
- Beständigt material
- Ekonomi

Nackdelar

- Tillverkning (dyr vid små volymer)
- Luktproblem
- Ej prövad under längre tid
- Kräver att ingående material undersöks och kvalitetssäkras

Allmänt

I ett vidare perspektiv görs bedömningen att vid täckning av deponier kommer ojämna sättningar i deponin att påverka sluttäckningens resultat i större utsträckning än valet av tätskiktsmaterial. Oberoende materialval i tätskiktet, traditionella material som exempelvis bentonitmatta, eller alternativa material som exempelvis FSA, kommer sättningar i deponin att vara den styrande faktorn för vattengenomsläpplighet på lång sikt. Fördelen med alternativa material är att det blir enklare och billigare att laga eventuella sättningar med dessa material än med sk. traditionella material.

6 Rekommendationer

De i denna rapport presenterade resultaten visar på att FSA med god marginal kan uppfylla krav på tätskikt på deponier för *icke-farligt avfall*, dvs. på deponier där täthetskravet är $< 50 \text{ liter/m}^2$, år. Det är dock viktigt:

- att de ingående materialens, dvs. det rötade avloppsslammet och flygaskan kvalitetssäkras vad gäller vattenkvot/TS-halt och homogenitet.
- att blandningen blir homogen, dvs. flygaskan fördelas väl i avloppsslammet.
- att flygaskan är färsk, dvs. att flygaska med härdningskapacitet nyttjas.
- att andelen flygaska ligger mellan 45 – 55 % TS. Vid lägre halter blir FSA-material mer svårhanterligt att blanda och lägga ut.
- att högre halt av flygaska ger lägre täthet.
- att lägre halt av flygaska kan ge sämre beständighet.

Vid lagring av avloppsslam uppkommer dålig lukt och vid tillverkning av FSA, dvs. blandning av avloppsslam och flygaska uppkommer det luktproblem via avgång av ammoniak. Dessa faktorer kan styra möjligheten att nyttja FSA som tätskikt. Vind, vindriktning och nederbörd bör beaktas vid val av FSA som tätskikt. Avloppsslammet kan under lagring täckas med ett tunt lager av flygaska för att minska luktaavgång. En annan viktig faktor som styr när tätskiktstillverkning är möjlig är att färsk flygaska produceras från höst till vår. Sluttäkningsarbeten bör därför i första hand ske när det finns tillgång på färsk flygaska och luktproblemen är mindre tack vare lägre utomhustemperaturer.

För att nyttja FSA som tätskikt med flygaskor och rötat avloppsslam från andra leverantörer bör dessa material undersökas i laboratoriemiljö och dokumenteras innan fullskalig användning. Det bör ställas krav höga krav på de ingående materialens vattenkvot/TS-halt och på blandningskvaliteten på FSA-materialet, eftersom den är avgörande för tätskiktets täthet. Avloppsslammets TS bör ligga runt 30 % och flygaskornas vattenkvot bör ligga $\leq 40 \%$ ($\text{TS} \geq 71 \%$).

Idag finns det ett stort antal äldre deponier som ska avslutas. Som en del av avslutningen av deponier ingår utformning, utförande och kontroll av valda sluttäknings-konstruktioner. Konstruktionerna som helhet och de valda tätskikten synnerhet ska reducera lakvattenbildningen och därmed minska potentiell utlakning till omgivningen i en lång tidsrymd. Många av dessa deponier är sådana som saknar information om vilka avfall och i vilka mängder som har deponerats. Genom sluttäckning förändras de kemiska/fysikaliska förutsättningarna i deponin, vilket kan få oönskade effekter som sättningar, ändrad miljö i deponin etc. Det är därför viktigt att det är helheten som bedöms, dvs. deponin, avfallet, dess sluttäckning och där ingående material.

7 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Tätheten och beständigheten är frågeställningar som bör följas upp på Dragmossens deponi under flera år, i syfte att verifiera erhållna resultat och bygga upp en erfarenhetsbank. Uppföljning av tätskiktets täthet under det närmaste året ger bra indikation om hur tätheten utvecklas. Gasbildningen under det första året visar att det råden anaeroba förhållanden i tätskiktet och att nedbrytning av organiskt material pågår, men avtar med tiden. Det är av stort intresse att följa upp hur nedbrytningen utvecklas och vilket tillstånd tätskiktet befinner sig i, dvs. aerobt eller anaerobt tillstånd.

Tillverkningen av FSA-material är besvärlig i och med att FSA har en ”lerig” konsistens. Vid blandning av flygaska (ett torrt material) med avloppsslam (ett blött material) uppstår det problem med igensättning, klumpbildning etc., som medför att kvalitén på tillverkat FSA-material kan variera. Dålig FSA kvalitet medför högre genomsläpplighet. Dagens erfarenhet visar att det krävs en förblandning av avloppsslam och flygaska innan materialblandningen kan ”knådas” till en homogen massa. De ingående materialens vattenkvot (TS-halt) och vald blandningsteknik är avgörande för slutprodukten kvaliteten.

Färsk flygaska ger god beständighet men även äldre flygaskor kan nyttjas, förutsatt att dessa hårdar långsamt och inte har hög vattenkvot. Det är viktigt att nyttja flygaska med högt pH och hög konduktivitet (hög salthalt) eftersom det hämmar eventuell nedbrytning. Det kan visa sig att även FSA med deponifygaska (flygaska lagrad på deponi) har tillräcklig beständighet mot nedbrytning.

FSA med de undersökta flygaskorna och avloppsslammet ger ett tillfredsställande tätskiktsmaterial. Resultaten är till viss del generella, men det bör poängteras att för varje nytt material bör laboratorieundersökning utföras för att verifiera materialens lämplighet. För att få en tillverknings- och utläggningsmetodik som fungerar bör generella ”riktlinjer” utarbetas. För att kunna nyttja FSA som tätskikt bör en handbok tas fram som beskriver vilka kriterier som måste uppfyllas för att kunna tillverka tätskikt av en specifik flygaska och ett specifikt avloppsslam, hur entreprenaden bör utföras och vilka är kontrollbehoven etc.

8 Litteraturreferenser

- [1] Mácsik J. Rogbeck Y., Svedberg B., Uhlander O., och Mossakowska A. 2003. *Underlag för genomförande av pilotförsök med stabiliserat avloppsslam som tätskiktmaterial*. (Värmeforsk/RVF/VA-forsk rapportserier)
- [2] Mácsik J. Svedberg B., Lenströmer S., och Nilsson T. 2004. *FACE: Flygaska i geotekniska anläggningar – Etapp 1: Inventering/tillämplighet*.
- [3] Mácsik J. och Svedberg B., 2000. *Schematisk beskrivning av projektprocess*. SCC intern skrift.
- [4] Stockholm Vatten AB, 2001a. *Slam i mark och anläggningsbyggande, avvattat vattenverks- och avloppsslam*. Rapport 1, jan 2001
- [5] Stockholm Vatten AB, 2001b. *Slam i mark och anläggningsbyggande; utredning: Tätskikt i deponier*. Rapport 21, augusti 2001
- [6] Sundberg J., Nilsson U., 2001. *Användning av avloppsslam för tätning av deponier – Förstudie*. RVF-Utveckling, RVF Rapport 01:17
- [7] Cronquist S., 2002. *Alternativa material i Stockholms län – askstabilisering av avloppsslam*. TRITA-LWR Master Thesis 02-01. KTH, Stockholm
- [8] Lenströmer S., 2002. *Avloppsslam som tätskikt på avfallsdeponier*. Master Thesis, Luleå tekniska universitet, Civilingenjörsprogrammet, Samhällsbyggnadsteknik / 2002:284
- [9] RVF-utveckling, 2002 *Täckning av deponier med blandning av avloppsslam och aska – Erfarenheter, beständighet och andra egenskaper*, Rapport 02:18.
- [10] Lundgren T., 1995, *Sluttäckning av avfallsupplag – Krav, material utförande och kontroll*. Naturvårdsverket rapport 4474.
- [11] Wikman K., Berg M., Svensson M. och Ecke H., 2003 *Nedbrytningsmönster för cellulosa i närvaro av aska*. Värmeforskrapport 806.
- [12] Wikman K., Berg M., Svensson M. och Ecke H., 2005 (Pågå) *Nedbrytningshastigheten för tätskikt uppbyggda av slam och aska* (Värmeforskrapport Q4-230)
- [13] Bäckström M. och Johansson I., 2004 *Askor och rötslam som tätskikt för gruvavfall [14]* (Värmeforskrapport 855)
- [14] Carling M., Elke M., et al. 2005 (Pågå) *Täckning av deponier med blandning av avloppsslam och aska – etapp 2* (värmeforskrapport Q4-225)
- [15] Ulwan Å., och Engström H. 2005 (pågå) *Sluttäckning av avfallsdeponier ur ett nationellt perspektiv – Traditionella material eller restprodukter – Miljömässiga & ekonomiska konsekvenser av olika sluttäckningsalternativ*. Examensarbete Uppsala Universitet civilingenjörsprogrammet System i Teknik och Samhälle (STS).

Bilagor

Bilaga A – Dagbok från pilotförsöket 2004

A.1 Tillverkning och utläggning

Dragmossens återvinningsanläggning, Älvkarleby.

▪ Måndag 10 maj.

Skanska installerade sin blandare på plats intill avloppsslammet. Under den senaste veckan har ca 2000 ton avloppsslam lagts upp i fyra strängar. Slammets torrsubstanshalt (TS-halt) låg runt 30 – 33 %. Flygaska från Mälarenergi kördes ut till Dragmossens återvinningsanläggning under vecka 20, totalt ca 300 ton. Av dessa har ca 250 ton använts. Flygaskan från Vattenfall Uppsala började köras ut i slutet på vecka 20, totalt ca 250 ton varav ca 240 ton har nyttjats. Kontrollmätning av flygaskornas vattenkvot visar att flygaskan från Mälarenergi hade en ojämn vattenkvot, mellan 11 och 40 %. Flygaskan har hunnit härda i klumpar från sandfraktion till stenfraktion. Dessa klumpar kan inte räknas som aktiva komponenter i FSA-blandningen. Flygaskan från Vattenfall Uppsala hade en jämn kvalitet vad gäller vattenkvot. Materialets vattenkvot varierade mellan 17 och 18 %. Flygaskan hade en liten andel grövre partiklar än sand.

Blandningsmaskinen installerades, figur A.1, men produktionen gick inte att köra igång p g a en elgenerator som inte fungerade. Avjämningsskiktet rättades till under dagen och lysimetrar installerades i avjämningsskiktet i provyta 4.



Figur A.1 Blandningsanläggningen med matarfickor för avloppsslam, flygaska, transportband och blandare. I bakgrunden ligger kontrollhytten.

Figure A. Equipment for mixing the sewage sludge and fly ash.

▪ **Tisdag 11 maj.**

Blandningsmaskinen fungerade ej p g a andra problem. Lysimetrar installerades i avjämningskiktet i provyta 4. Provytorna vägdes av för att kontrollera provytornas lutning. Filmningen avbokades från onsdag, till torsdag eftermiddag.

▪ **Onsdag 12 maj.**

Blandningsmaskinen startades på eftermiddagen. Inmatning av avloppsslam satte igen matningsfickan. Avloppsslammets kletiga konsistens medförde ”oväntade” problem vid blandningen. Driftstopp uppstod vid ett flertal tillfällen. Aska och slam förblandades med hjullastare för att få en torrare konsistens hos avloppsslammet. Dagen avslutades med att en rotorskopa beställdes till dagen efter för att utföra en bättre förblandning.

Mer aska från Mälarenergi och Vattenfall Uppsala anlände under dagen. Utläggningen av det FSA-material som tillverkats startade i det område som finns mellan västra hörnet av provyta 4 och vallen (ca 20 m²).

▪ **Torsdag 13 maj.**

Dagen började med förblandning av flygaska från Mälarenergi och avloppsslam. I förblandningen ingick 1,5 skopor flygaska och fem skopor avloppsslam. En skopa flygaska vägde ca 5,2 ton och en skopa avloppsslam ca 5 ton. Med befintlig vattenkvot respektive TS-halt motsvarar detta ca 43 % flygaskatillsats. En del av flygaskan är dock inte aktiv i blandningen pga. bildning av cementerade aggregat.

Utläggningen av FSA-material fortsatte i området mellan västra hörnet av provyta 4 och vallen samt i provyta 4. Den del där tätskiktet lagts ut provtogs (TS-halt och densitet samt prov för fallkonförsök). Det visade sig att den gummiduk som skulle användas i provytornas ytterkanter för att samla in dräneringsvattnet var för bred för att kunna användas. Istället installerades lysimetrar i tätskiktet i provyta 4 för att samla upp vatten från dräneringsskiktet. Detta kommer även att göras i de övriga provytorna.

Ett studiebesök hölls under dagen.

▪ **Fredag 14 maj.**

Under veckan har ca 520 ton hunnit tillverkats. Den största delen av materialet tillverkades under fredagen. Hela dagen karakteriserades av driftstörningar orsakade av låg förblandnings- och matarkapacitet. En del av de åtgärder som vidtogs syftade till att öka produktionskapaciteten under nästkommande vecka. Under dagen har flertalet regnskurar minskat damningen på arbetsplatsen, men ammoniakavgången ökade markant.

Utläggningen av FSA-material fortsatte i provyta 4 och i norra delarna av provyta 1. Provytorna provtogs (TS-halt och densitet samt prov för fallkonförsök). Dräneringsskikt lades ut i provyta 4 (ca 0,1 m tjockt lager av sand). Lysimetrar (vatten och gas) installerades i avjämningskikt och tätskikt.

Slangen för sättningsmätning av avjämningsskiktet i provyta 1 installerades.

▪ **Måndag 17 maj.**

Arbetet startade med tillverkning av FSA med flygaska från Mälarenergi. Tillverkningskapaciteten låg på ca 90 ton i timmen. Arbetet utfördes av två hjullastare, en förblandare (rotorskopa) och Skanskas tvångsblandare. Efter bytet av flygaska, till Vattenfall Uppsalas, blev konsistensen hos FSA-blandningen ett problem igen. FSA-blandningen kletade igen både matarfickan och blandningsapparaten. Kapaciteten gick ner från ca 90 ton i timmen till ca 45 ton i timmen, med flertalet driftstopp p g a igensättning. Tillsatsen av flygaska höjdes då från 1,5 skopa till 2 skopor. Detta medförde att blandningens innehåll av flygaska höjdes från ca 40 % till ca 50 %. Produktionen ökade då till ca 98 ton i timmen igen. Under måndagen producerades ca 500 ton FSA. Enstaka regnskurar under dagen. Tät- och dräneringsskikt lades ut i provyta 1 och 2. Provytorna provtogs (TS-halt och densitet samt prov för fallkonförsök). Lysimetrar (vatten och gas) installerades i avjämningsskikt och tätskikt. Slangar för slangättningsmätning installerades i provyta 1 (på avjämnings- och tätskiktet).



Figur A.2 Upplagt FSA-material i väntan på utläggning
Figure A.2 FSA material before construction

▪ **Tisdag 18 maj.**

Under tisdagen producerades ytterligare ca 500 ton FSA. På grund av brist på dräneringsmaterial installerades inte FSA-blandningen direkt. Ungefär halva måndagens och tisdagens produktion lades ut på deponin i strängar med ca dubbla måktighet, Figure A.2. Allt eftersom dräneringsmaterial har anlänt installerades FSA med överlagrande dräneringsskikt.

▪ **Onsdag 19 maj – tisdag 25 maj**

FSA material installerades med tillhörande dräneringsskikt. Enstaka regnskurar. Den 19 maj besökte filmteamet platsen och dokumenterade utläggningen. Den 25 maj avvägdes Försöksytan (på dräneringsskiktets nivå).

▪ **2 – 10 juni**

Deponin är sluttäckt och gräs har såtts över deponiytan. Lysimetrarna tömdes på sitt vatteninnehåll. Lysimetrarna som är under tätskiktet hade enbart regnvatten från perioden medan dessa stod öppna.

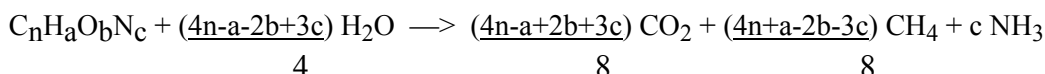
Bilaga B – Beständighet – Laboratorie- och fältförsök

B.1 METODBESKRIVNING OCH FÖRSÖKSPLAN

B.1.1. Nedbrytningsmätning

B.1.1.1 BMP-test

Syftet med utfört BMP-test: BMP-bestämning är ett enkelt sätt att bedöma avfalls nedbrytbarhet under anaeroba förhållanden och kan ses som en anaerob motsvarighet till BOD. Den första tillämpningen av BMP var på slam från avloppsrening, som inkuberades anaerobt i en bestämd kemisk miljö (Owen *et al.*, 1979). Huvudkomponenterna i nedbrytbart organiskt material är kol, väte, syre och kväve. Förenklat kan man då beräkna produktgassammansättningen ur:



Nedbrytbarheten av ett visst substrat kan definieras som den uppmätta gasbildningen dividerat med den enligt ovan beräknade. Den kan för t. ex. upplagt blandat hushållsavfall vara kring 50 %. Den metod som skall användas i detta försök har utvecklats för BMP-bedömning av hushållsavfall och finns beskriven i Chen *et al.*, (1995).

Experimentell procedur:

1. Motsvarande 5 g TS av materialet vägs in i en serumflaska.
2. Destillerat vatten tillsätts så att den totala fukthalten blir 75 g.
3. 25 ml metananogeniskt slam tillsätts serumflaskan.
4. Blandningens pH mäts.
5. Serumflaskan försluts med butylgummipropp och aluminiumring.
6. Inkubation sker vid 30 °C.
7. Gasproduktionen och gassammansättningen mäts regelbundet.

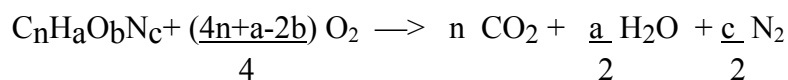
Referenser

- Chen, H. Ecke, H., Kylefors, K., Bergman, A. and Lagerkvist, A. (1995) "Biochemical methane potential (BMP) assays of solid waste samples", *Proceedings Sardinia'95 fifth international landfill symposium*, Cagliari, Italy, 2 - 6 October, 1995.
- Owen, W., Stuckey, F., D. C., Healy, J. B. Fr., Young, L. Y. and McCarty, P. L. (1979), "Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity", *Water Research*, vol. 13: 485-492.

B.1.1.2 Respirationstestet

Syftet med respirationstestet: Respirationsbestämning är ett enkelt sätt att bedöma avfalls nedbrytbarhet under aeroba förhållanden. Huvudkomponenterna i nedbrytbart

organiskt material är kol, väte, syre och kväve. Förenklat kan man då beräkna produktgassammansättningen ur:



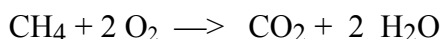
Experimentell procedur:

1. Motsvarande 5 g TS av materialet vägs in i en serumflaska.
2. Destillerat vatten tillsätts så att den totala fukthalten blir 75 g.
3. Blandningens pH mäts.
4. Serumflaskan försluts med butylgummipropp och aluminiumring.
5. Syrgas tillsätts (lämpligtvis 50 ml)
6. Inkubation sker vid 30°C.
7. Gasproduktionen och gassammansättningen mäts regelbundet.

B.1.2 Karakterisering av den biologiska effekten

Syftet med Toxicitetstester: Nedbrytning av det organiska materialet är en biologisk process. Arbetshypotesen är att det finns ämnen i materialet som hämmar den biologiska aktiviteten. Toxicitetstester användes för att kunna se om det är möjligt att bedöma nedbrytningspotentialen i materialet utan att genomföra själva nedbrytningsförsöket. Testet använder luminescenta bakterier *Vibrio fischeri*. Förekomsten av toxiska ämnen minskar ljusstyrkan hos bakterierna och används som ett mått för toxicitet.

Syftet med metanoxidationstestet: Metanoxidation är en biologisk reaktion som sker naturligt i marken där metan förekommer. Metan omvandlas till koldioxid och är jämförbar med respirationstestet, med skillnaden att nedbrytbart material tillförs förutom syrgas. I projektet används metanoxideringskapacitet som ett mått på toxicitet.



Experimentell procedur:

1. Motsvarande 5 g TS av materialet vägs in i en serumflaska.
2. Destillerat vatten tillsätts så att den totala fukthalten blir 75 g.
3. Blandningens pH mäts.
4. Serumflaskan försluts med butylgummipropp och aluminiumring.
5. Metan- och syrgas tillsätts (lämpligtvis 50 ml av vardera)*
6. Inkubation sker vid 30°C.
7. Gassammansättningen mäts regelbundet.

*En blandning av CO₂ (50%) och CH₄ (50%) motsvarande biogas sammansättning användes.

B 1.3 Karakterisering av kemiska egenskaper

Syftet med lakvattenkaraterisering: Lakningen medför att vissa ämnen tas bort från materialet. För att kunna identifiera ett samband med lakningen och en eventuell ökad nedbrytbarhet, har lakvattnet som genererats under lakningen analyserats för:

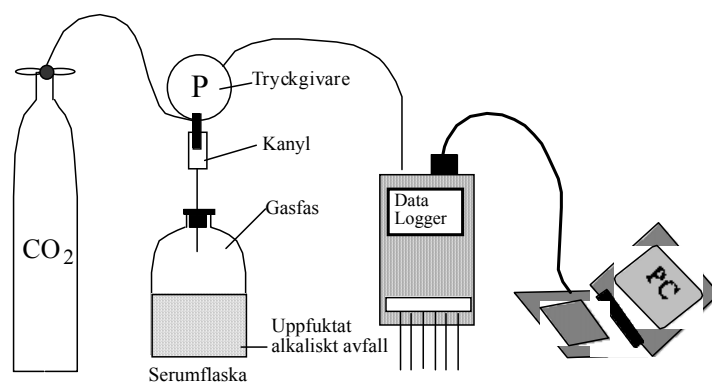
- Elektrisk konduktivitet (SIS 028123) – pH (SS 028122)
- TOC – Total Organiskt Kol (enligt SS-EN 1484)
- Metallanalys med ICP-AES, vid LTU

Syftet med karbonatiseringsförsöket: I en basisk lösning löser sig koldioxidmolekyler och bildar karbonater. Detta medför att antalet gasmolekyler som finns i ett slutet system minskar och trycket sjunker. Olika material har olika förmåga att bilda karbonater. Testet ger ett svar på hur mycket koldioxid som kan bindas i materialet.

Vid aerob och anaerob nedbrytning bildas koldioxid som används som indikator för nedbrytningen. Den bildade koldioxiden kommer att lösa sig och därmed kommer resultaten från de olika nedbrytningsförsöken att behöva korrigeras för koldioxidförlusten.

Experimentell procedur: Till testet används en uppställning enligt figur B.1.

1. Motsvarande 5 g TS av materialet vägs in i en serumflaska.
2. Destillerat vatten tillsätts så att blandningen blir en slurry.
3. Blandningens pH mäts.
4. Serumflaskan försluts med butylgummipropp och aluminiumring.
5. Koldioxid tillsätts och en sprutspets förs genom butylgummiproppen och ansluts till tryckgivaren.
6. Gastrycket registreras automatiskt.
7. Koldioxid tillsätts när den ursprungliga gasen har förbrukats.



Figur B.1 Försöksuppställning för utförande av karbonatiseringsförsöket.

Figure B.1 Equipment for carbonatesation test.

Syftet med lakningsförsöken: I ett lakningsförsök blandas en känd mängd material och vätska (vatten i vårt fall) med syftet att uppskatta hur mycket av de olika ämnen som finns i materialet är röligt. Lakningen används för att prediktera det som kommer att ske

under långa tidsperioder, då motsvarande mängd regnvatten skall ha passerat genom täckskitet. I det här fallet har vi varit intresserade mest av den fasta fasen efter lakningen och inte själva lakvattnet. Frågan som skulle besvaras var om nedbrytbarheten av FSA-materialet skulle öka när vissa ämnen lakades ut.

Experimentell procedur: Lakningen skedde vid olika L/S-kvoter under 24 timmar.

1. 10 g materialet vägs in (torr vikt)
2. Lämplig mängd vatten blandas i en flaska (motsvarande 100 eller 1000g)
3. Flaskan placeras i en roterande skakapparat (1 varv/min – 24 tim)
4. Innehållet filtreras

Då vi var intresserade av att testa det fasta materialet, utvecklades en filtreringsprocedur. Materialet innehåller finkorniga partiklar som sätter igen filtren. Tre olika typer av filtreringsmetoder testades:

- Pappersfilter testades först: Filtreringstid flera dygn.
- Ett 1 cm tjockt sandlager i kombination med pappersfilter: Filtreringstid ca 12 timmar.
- Centrifugering: Filtreringstid 10 minuter.

B.2 RESULTAT

B.2.1 Resultat av karakteriseringen av de kemiska egenskaperna

I redovisningen används följande beteckningar:

Aska 1:	Vattenfall Värme Uppsala AB
Aska 2:	Mälarenergi Västerås AB
FSA (1 eller 2):	Blandning 40 % aska (1 eller 2) och 60 % slam (Bromma reningsverk)
Aska (1 eller 2) 60 %:	Blandning 60 % aska (1 eller 2) och 40 % slam (Bromma reningsverk)
L/S:	Liquid/solid -kvot

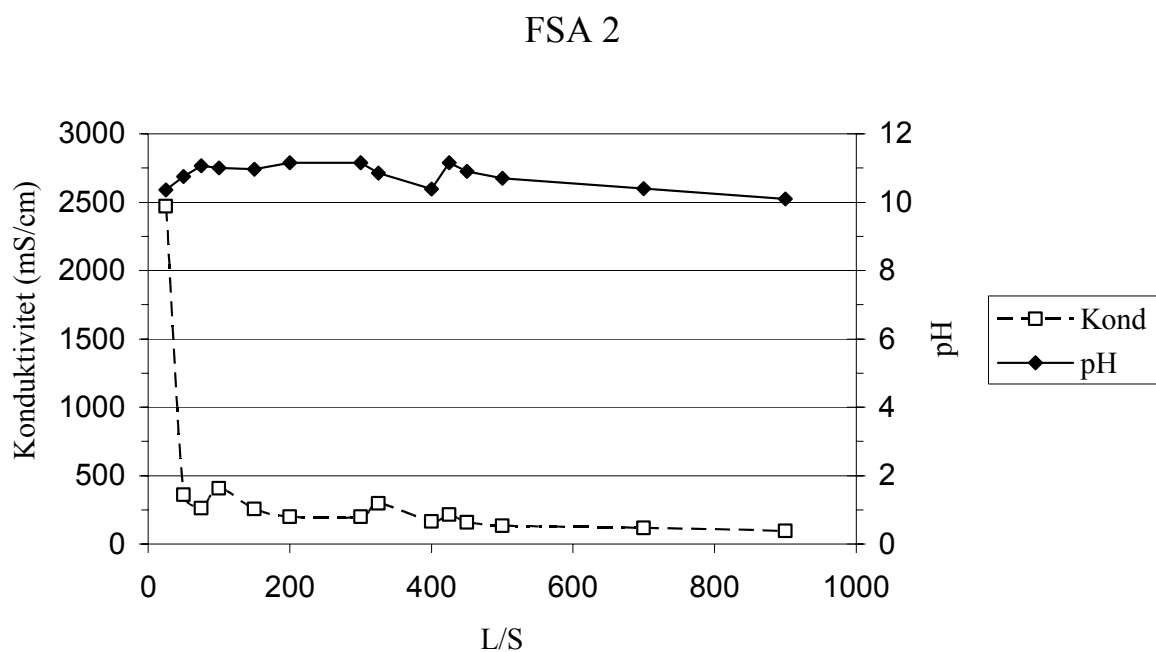
Exempel: **Aska 1 60 % L/S=10:** Blandning 60 % aska 1 och 40 % slam (Bromma reningsverk) lakat vid L/S 10

Fördjupade undersökningar genomfördes med flygaska från Mälarenergi Västerås AB (aska 2). Mätningar av elektrisk konduktivitet och pH i lakvattnet från lakförsöken vid L/S 2 och 10 visar att pH varierar mellan 10.1 och 10.4. Konduktiviteten minskar vid högre L/S kvot (se tabell) Resultaten av en stegvis lakning upp till L/S 900 visar att pH ligger över 10 även efter L/S 900 medan konduktiviteten minskar drastiskt mellan de två första stegen och stabiliseras vid 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ mellan L/S 25 och 900 (se figur B.2)).

Analys av olika grundämnen i lakvatten efter lakning vid L/S 10 och 100 visas i tabell B.1 för båda askblandningarna. Kalcium är den dominerande jonen i lakvattnet.

Totalt organiskt kol analyserades i lakvatten efter lakning vid L/S 10 och 100. Resultaten redovisas i tabell B.2. I blandningarna av aska och slam varierar andelen löst organiskt material mellan 1,5 och 2 %. Motsvarande analys med rent slam visar att upp till 12 % organiskt material är löst.

Karbonatiseringsförsöken visar att FSA-materialet kan binda upp till 30 ml CO_2 per gram TS. Lakning vid L/S 10 eller 100 påverkar inte nämnvärt CO_2 bindningen och båda askorna ger liknande resultat.



Figur B.2 Elektrisk konduktivitet och pH efter olika lakningssteg.

Figure B.2 Conductivity and pH of samples at different L/S

Tabell B.1 Metallanalysresultat av lakvatten efter lakning vid L/S 10 och 100. Analys vid L/S 100 gjordes i triplikat medan analys vid L/S 10 är ett blandprov pga att lakvattenvolymen inte räckte till alla analyser

Table B.1 Result from analysis of leach-water at L/S 10 and L/S 100.

<i>Element</i>	<i>Ca</i>	<i>K</i>	<i>Na</i>	<i>As</i>	<i>Ba</i>	<i>Cd</i>	<i>Co</i>	<i>Cr</i>
<i>Prov</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>µg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>
Aska 1 40% L/S=10	320	33	19	0,050	0,041	1,00	0,028	0,008
Aska 1 40% L/S=100	50	5	6	0,011	0,004	<0,22	0,004	0,005
Aska 1 40% L/S=100	50	5	6	0,007	0,004	<0,22	0,004	0,006
Aska 1 40% L/S=100	49	5	6	0,017	0,003	<0,22	0,005	0,006
Aska 1 60% L/S=10	493	19	15	0,050	0,073	1,00	0,023	0,009
Aska 1 60% L/S=100	127	5	6	0,007	0,019	<0,22	0,003	0,010
Aska 1 60% L/S=100	124	5	6	0,009	0,019	<0,22	0,003	0,010
Aska 1 60% L/S=100	125	5	6	0,011	0,019	<0,22	0,003	0,010
Aska 2 40% L/S=10	609	420	129	0,064	0,092	1,00	0,028	0,015
Aska 2 40% L/S=100	173	60	20	0,008	0,037	<0,22	0,004	0,005
Aska 2 40% L/S=100	250	76	25	0,015	0,042	<0,22	0,005	0,006
Aska 2 40% L/S=100	145	40	14	0,008	0,042	<0,22	0,004	0,006
Aska 2 60% L/S=10	521	666	176	0,039	0,179	1,00	0,026	0,018
Aska 2 60% L/S=100	185	65	19	0,008	0,090	<0,22	0,003	0,011
Aska 2 60% L/S=100	147	59	18	0,007	0,102	<0,22	0,004	0,014
Aska 2 60% L/S=100	166	59	18	0,005	0,093	<0,22	0,003	0,012
Slam L/S=100	7	5	4	0,051	0,004	<0,22	0,005	< 0,67µg/l
Slam L/S=100	7	5	4	0,063	0,003	1,00	0,006	< 0,67 µg/l
Slam L/S=100	7	5	4	0,074	0,003	1,00	0,006	0,001
<i>Enhet</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>µg/l</i>	<i>µg/l</i>	<i>µg/l</i>	<i>µg/l</i>	<i>µg/l</i>
Blank L/S=10	0,011	0,388	0,188	<23,8	<2,86	<0,22	<0,78	<0,67
Blank L/S=100	0,003	0,374	0,181	<23,8	<2,86	<0,22	<0,78	<0,67
Blank L/S=100	0,002	0,365	0,182	<23,8	<2,86	<0,22	<0,78	<0,67
Blank L/S=100	0,001	0,367	0,181	<23,8	<2,86	<0,22	<0,78	<0,67

Fortsättning

<i>Element</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Mg</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>
Prov	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l
Aska 1 40% L/S=10	0,787	0,770	35,7	0,013	0,233	<6,86	<0,29
Aska 1 40% L/S=100	0,078	0,199	8,89	0,003	0,025	<6,86	<0,29
Aska 1 40% L/S=100	0,089	0,197	10,6	0,003	0,033	<6,86	<0,29
Aska 1 40% L/S=100	0,089	0,193	10,4	0,003	0,034	<6,86	<0,29
Aska 1 60% L/S=10	1,52	0,283	0,420	0,007	0,158	<6,86	<0,29
Aska 1 60% L/S=100	0,280	0,140	0,060	0,002	<0,37µg/l	<6,86	<0,29
Aska 1 60% L/S=100	0,283	0,133	0,061	0,002	<0,37µg/l	<6,86	<0,29
Aska 1 60% L/S=100	0,287	0,136	0,062	0,002	<0,37µg/l	<6,86	<0,29
Aska 2 40% L/S=10	1,72	0,588	9,89	0,030	0,202	<6,86	42,0
Aska 2 40% L/S=100	0,132	0,202	1,59	0,008	0,035	<6,86	2,0
Aska 2 40% L/S=100	0,155	0,213	1,75	0,008	0,043	<6,86	<0,29
Aska 2 40% L/S=100	0,135	0,200	1,69	0,008	0,038	<6,86	<0,29
Aska 2 60% L/S=10	1,830	0,203	1,56	0,027	0,175	<6,86	17,0
Aska 2 60% L/S=100	0,288	0,072	0,181	0,003	<0,37µg/l	<6,86	<0,29
Aska 2 60% L/S=100	0,319	0,086	0,249	0,004	<0,37µg/l	<6,86	<0,29
Aska 2 60% L/S=100	0,297	0,084	0,252	0,004	<0,37µg/l	<6,86	<0,29
Slam L/S=100	0,094	1,20	0,918	0,008	<0,37µg/l	<6,86	15,0
Slam L/S=100	0,097	1,210	0,926	0,008	<0,37µg/l	<6,86	9,0
Slam L/S=100	0,097	1,26	1,00	0,008	0,002	<6,86	10,0
Enhet	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Blank L/S=10	<1,04	<2,36	<3,03	<1,00	<0,37	<6,86	<0,29
Blank L/S=100	<1,04	<2,36	<3,03	<1,00	<0,37	<6,86	<0,29
Blank L/S=100	<1,04	<2,36	<3,03	<1,00	<0,37	<6,86	<0,29
Blank L/S=100	<1,04	<2,36	<3,03	<1,00	<0,37	<6,86	<0,29

Tabell B.2 Total organiskt kol (TOC), pH konduktivitet, oorganiskt kol (IC) i lakvatten efter lakning vid L/S 10 och 100.

Table B.2 Total organic coal in the leaching water at L/S 10 and L/S 100.

Provbeteckning	TOC [mg/l]	Std av	IC [mg/l]	Std av	pH	Std av	Elek. Kond. μS/cm	Std av
Aska 1 40% L/S 10	796		6,1		10,4	0,03	2 330	170
Aska 1 40% L/S 100	89	0,7P ^{aP}	8,6	0,1	10,4	0,03	448	9
Aska 1 60% L/S 10	733		6,1		11,9	0,05	2 340	220
Aska 1 60% L/S 100	74	0,7P ^{aP}	2,2	0,1	11,7	0,08	1 009	135
Aska 2 40% L/S 10	829		8,7		10,1	0,19	4 300	210
Aska 2 40% L/S 100	92	1,5P ^{bP}	2,6	0,1	10,1	0,05	951	8
Aska 2 60% L/S 10	734		6,2		10,9	0,05	4490	40
Aska 2 60% L/S 100	73	0P ^{bP}	2,6	0,2	10,9	0,07	1205	58
Slam L/S 100P ^{cP}	127	4P ^{bP}	47	1,7	7,9	0,04	779	284

P^{aP}: n=2

P^{bP}: n=3

P^{cP}: Slam

L/S 10 gick
ej att filtrera

Biologisk aktivitet och nedbrytbarhetsmätningar

Resultaten från metanoxidationstesten redovisas i tabell B.3. I samtliga försök kunde en syreförbrukning observeras. En generell trend är att förbrukningen ökar med tiden. I det fjärde försöket (FSA2 L/S 100) kunde en metanförbrukning observeras parallellt med syreförbrukningen. Att metan och syre förbrukas samtidigt kan förklaras av en mikrobiell metanoxidation i provet. I de tre första försöken observerades inte någon metanförbrukning medan syrehalten sjönk. Därför bör det finnas en annan förklaring till syreförbrukningen. En hypotes är att vätgas och syre förbrukas tillsammans. Efter två eller tre tillsatser av metan och syre kunde metanoxidation observeras i samtliga prover. Jämfört med vanlig jord, var etableringstiden för metanoxidation lång med detta material, vilket tyder på en toxisk effekt av FSA-materialet.

Resultaten från respirationstesten redovisas i tabell B.4. Respirationstesten visar ingen koldioxidbildning trots att syre förbrukas. Detta beror på att koldioxid löser sig i den basiska slurryn. Tester med enbart aska visar att syrehalten är konstant. Detta innebär att syreförbrukningen beror på förekomsten av organiskt material i FSA-blandningen. Syreförbrukning är därmed en indikation på nedbrytning av det organiska materialet i FSA-blandningen.

Tryckutvecklingen i provflaska (FSA 2 L/S 10) visar att den första trycksänkningen (från 0 till 10 timmar) beror på lösning av koldioxid i slurryn. Metanoxidation kan observeras efter ca 18 timmar då lutningen på kurvan ändras och tryckfallet ökar i hastighet. Då förbrukas både syre och metan medan den koldioxid som bildas löser sig i slurryn.

Tabell B3 Resultat från metanoxideringsmätningar i FSA 2 efter lakning vid L/S 10 och 100. Syre och metanförbrukning i %-enheter per timmar.

Table B3 Result from measurements of methane oxidation in the FSA after leaching at L/S 10 and 100. Oxygen and methane consumption in % per hour.

Tid tim	FSA 2 L/S 10		FSA 2 L/S 10		FSA 2 L/S 100		FSA 2 L/S 100	
	O ₂	CH ₄	O ₂	CH ₄	O ₂	CH ₄	O ₂	CH ₄
	%-enhet	%-enhet	%-enhet	%-enhet	%-enhet	%-enhet	%-enhet	%-enhet
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
121	8,2	0,8	5,9	0,7	5,0	0,4	4,2	1,7
262	18,0	-0,1	16,6	0,7	10,1	0,6	15,7	5,4
288	19,0	0,5	18,7	1,1	12,3	-0,2	17,5	7,3
288	0,0	0,8	0,0	1,3	0,0	0,4	0,0	5,3
337	1,7	1,2	6,0	3,4	5,2	0,6	8,5	9,5
454	12,4	4,1	22,9	13,8	8,8	0,7	19,2	15,2
480	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
528	11,3	7,7	9,4	7,4	1,0	0,9	8,5	7,0
691	17,6	11,3	15,1	9,5	12,8	5,7	16,6	10,3

Tabell B4 Resultat från respirationsmätningar i FSA 2 efter lakning vid L/S 10 och 100. Syre förbrukning i %-enheter per timmar.

Table B4 Results from respiration measurements.

Tid	FSA 2 L/S 10	FSA 2 L/S 10	FSA 2 L/S 100	FSA 2 L/S 100	Tid	aska 2 L/S 10	aska 2 L/S 10
tim	O ₂	O ₂	O ₂	O ₂	tim	O ₂	O ₂
	%-enhet	%-enhet	%-enhet	%-enhet		%-enhet	%-enhet
0	0,8	0,9	0,8	0,8	0	17,7	15,8
143	2,7	2,0	6,4	1,5	74	18,1	16,2
216	2,2	2,9	8,6	2,5	236	17,8	16,8
335	2,8	2,7	12,5	7,5			
408	3,1	3,4	16,3	11,0			
570	4,5	11,7	19,7	16,1			

Resultaten från nedbrytningsförsöken redovisas i tabell B5. Gasproduktionen är omräknad till ml gas per gram slam i blandningen (och inte gram blandning). Med antagandet att det är slammet som bryts ned och att askan inte bidrar nämnvärt till den totala gasbildningen är det av intresse att veta hur mycket gas som har bildats per gram slam i materialet. Om man jämför gasbildning i olika blandningar kommer den totala gasbildningen att bero på den slammängd som är tillgänglig och eventuell inhibition.

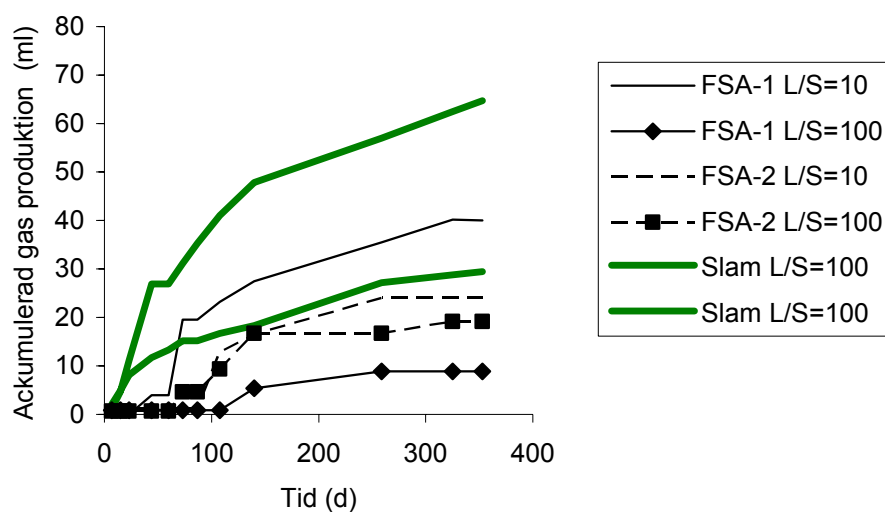
Resultaten från nedbrytningsförsöken efter lakning vid L/S 10 respektive 100 visas i figur B4. Resultaten visar att nedbrytningen sker i de prover som innehåller 40 % aska.

Jämfört med försöken genomförda med enbart slam, är gasbildningen från FSA-blandningen något lägre per gram slam men i jämförbar storleksordning. En fördröjning av nedbrytningsstarten kunde också observeras (upp till 2 månader). Gasbildningen var som högst 50 ml/g vilket motsvarar ca 6 % av den teoretiska gasmängden som skulle kunna bildas (ca 750 ml/g).

Gasbildningen som observerades från blandningen med 60 % aska är försumbar och beror huvudsakligen på tryckutjämning, figur B5. Undersökningen visar att lakningen vid L/S 10 eller 100 ger jämförbara resultat, dvs ingen gasutveckling på grund av ökad L/S-kvot. Resultaten från nedbrytningsförsöken vid L/S 2 och 10 utan lakning (utan att ta bort vatten) redovisas i figur B.6 och tabell B6. Oavsett L/S-kvoten eller andelen aska i blandningen visar resultaten att gasbildningen är försumbar. Som högst bildades 3 ml gas per gram slam vilket är en tiopotens lägre än vad slammet kan generera.

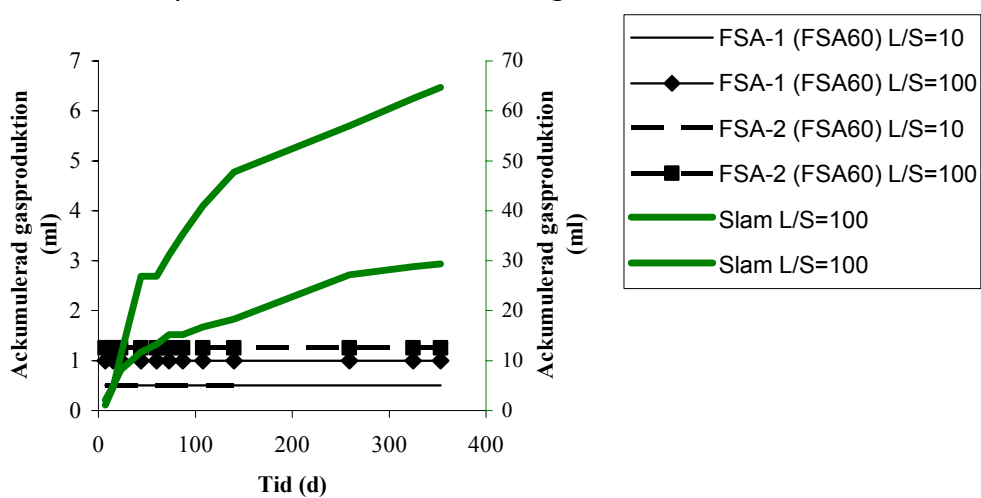
Gasbildningsförsöken vid högt pH och buffrat pH vid 7 visar att nedbrytningen är störst vid pH 7, tabell B7. Lakning vid höga L/S-kvoter och högt pH gynnade inte nedbrytningen jämfört med försöken vid pH 7 efter motsvarande lakning. Detta tyder på att både pH och de lösliga ämnena i flygaskan påverkar nedbrytningen negativt. Dessutom verkar dessa två faktorer samverka och hämma gasbildningen. Vattentransporten genom täckskitet beräknas vara låg. Vid låg vattenomsättning kommer pH och salthalten i porvattnet att vara höga vilket hämmar nedbrytningen i FSA.

Gasanalyserna visar att metanhalten är något högre än koldioxidhalten. Vid försöken med askblandningar förklaras detta med att koldioxiden löser sig i det basiska lakvattnet. Karbonatiseringsförsöken visar att de olika blandningarna kan lösa stora mängder koldioxid. Skillnaderna mellan aska 1 och 2 är små. Förekomst av vätgas observerades i proven som innehåller aska 2.

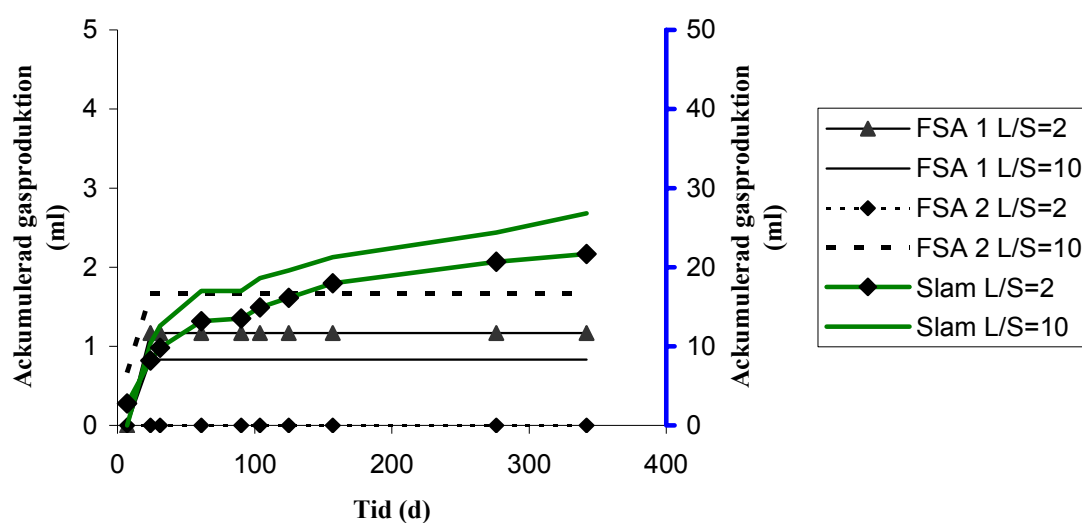


Figur B.4 Gasproduktion vid anaerobnedbrytning av FSA 1 och 2 (FSA40) efter lakning vid L/S 10 och 100 och det råa slammet (ml gas per gram slam i materialet).

Figure B.4 Gas production during anaerobic digestion of FSA 1 and 2 after leaching of L/S 10 and 100 and the sludge



Figur B.5 Gasproduktion vid anaerobnedbrytning av blandning FSA-1 och 2 (FSA60) efter lakning vid L/S 10 och 100 och det råa slammet (ml gas per gram slam i materialet).



Figur B.6 Gasproduktion vid anaerobnedbrytning av FSA 1 och 2 efter lakning vid L/S 2 och 10 och det råa slammet (ml gas per gram slam i materialet).

Figure B.6 Gas production during anaerobic digestion of FSA 1 and 2 after leaching of L/S 2 and L10 and the sludge.

Tabell B5 Gasbildning vid anaerob nedbrytning av FSA med 40 respektive 60 % aska och efter lakning vid L/S 10 och 100 (ml gas per gram slam i materialet).

Table B5 Gas production during anaerobe digestion of FSA with 40 respectively 60 % ash and after leaching of L/S 10 and 100.

Prov och förbehandling	H2 %	O2 %	N2 %	CH4 %	CO2 %	Ackumulerad gas ml
40% askbl. L/S=10_ aska 1						0
40% askbl. L/S=10_ aska 1						20
40% askbl. L/S=10_ aska 1		1,3	47,9	45,9	18,2	36
40% askbl. L/S=100_ aska 1						0
40% askbl. L/S=100_ aska 1						2
40% askbl. L/S=100_ aska 1						9
60% askbl. L/S=10_ aska 1						1
60% askbl. L/S=10_ aska 1						2
60% askbl. L/S=10_ aska 1						3
60% askbl. L/S=100_ aska 1						1
60% askbl. L/S=100_ aska 1						2
60% askbl. L/S=100_ aska 1						0
40% askbl. L/S=10_ aska 2	0,1	3,4	15,1	24,2	16,1	14
40% askbl. L/S=10_ aska 2	0,0	1,6	56,4	20,7	13,9	8
40% askbl. L/S=10_ aska 2		1,1	54,1	25,2	12,8	24
40% askbl. L/S=100_ aska 2		1,3	68,6	27,2	13,0	17
40% askbl. L/S=100_ aska 2						1
40% askbl. L/S=100_ aska 2		1,0	8,8	42,6	17,2	12
60% askbl. L/S=10_ aska 2						0
60% askbl. L/S=10_ aska 2						1
60% askbl. L/S=10_ aska 2						1
60% askbl. L/S=100_ aska 2						0
60% askbl. L/S=100_ aska 2						1
60% askbl. L/S=100_ aska 2						0
Slam L/S=10	Går ej att filtrera					
Slam L/S=10	Går ej att filtrera					
Slam L/S=10	Går ej att filtrera					
Slam L/S=100	0,1	0,9	21,1	50,4	15,9	754
Slam L/S=100		0,2	2,5	38,7	14,4	28
Slam L/S=100	0,6	0,5	13,3	57,4	16,6	59
Blank 1						0
Blank 2						8
Blank 3						0

Tabell B.6 Gasbildning vid anaerob nedbrytning av FSA med 40 respektive 60 % aska utan lakning vid L/S 10 och 100 (ml gas per gram slam i materialet).

Prov och förbehandling	H2	O2	N2	CH4	CO2	Ackumulerad gas
	%	%	%	%	%	ml
40% askbl. L/S=2_aska 1						1,2
40% askbl. L/S=2_aska 1						0,7
40% askbl. L/S=2_aska 1						0,7
40% askbl. L/S=10_aska 1						1,0
40% askbl. L/S=10_aska 1						0,8
40% askbl. L/S=10_aska 1						0,0
60% askbl. L/S=2_aska 1						0,0
60% askbl. L/S=2_aska 1						0,0
60% askbl. L/S=2_aska 1						0,5
60% askbl. L/S=10_aska 1						0,0
60% askbl. L/S=10_aska 1						0,0
60% askbl. L/S=10_aska 1						0,0
40% askbl. L/S=2_aska 2						0,0
40% askbl. L/S=2_aska 2						0,0
40% askbl. L/S=2_aska 2						0,0
40% askbl. L/S=10_aska 2						1,2
40% askbl. L/S=10_aska 2						0,0
40% askbl. L/S=10_aska 2						1,7
60% askbl. L/S=2_aska 2						2,8
60% askbl. L/S=2_aska 2						2,8
60% askbl. L/S=2_aska 2						2,8
60% askbl. L/S=10_aska 2						0,0
60% askbl. L/S=10_aska 2						0,0
60% askbl. L/S=10_aska 2						0,8
0% askbl. L/S=2	0,2	1,5	7,3	32,7	18,1	20,7
0% askbl. L/S=2	0,1	1,9	7,3	33,9	18,4	19,7
0% askbl. L/S=2		0,1	2,2	28,7	19,9	18,5
0% askbl. L/S=10		2,1	9,3	45,5	20,6	8,6
0% askbl. L/S=10		1,4	7,1	47,1	21,3	23,7
0% askbl. L/S=10		1,1	5,6	46,2	20,3	26,2
Blank 1						16,0
Blank 2						14,0
Blank 3						15,0

Tabell B7 Gasbildning vid anaerob nedbrytning av FSA efter lakning vid L/S 10, 100, 500 och 900 och efter pH-buffring vid 7 (ml gas per gram slam i materialet).

Prov	Förbehandling	H2 %	O2 %	N2 %	CH4 %	CO2 %	Ackumulerad gas ml
FSA 1	L/S 0 pH 7.02						12,5
FSA 1	L/S 0 pH 7.02	0,2	1,5	5,7	7,5	6,2	51,5
FSA 2	L/S 0 pH 7.02						9,0
FSA 2	L/S 0 pH 7.02						0,0
FSA 2	L/S 500						5,3
FSA 2	L/S 900	1,7	6,7	0,1	0,7	0,1	1,8
FSA 2	L/S 500						0,7
FSA 2	L/S 900						1,3
FSA 2	L/S 10 pH 6.8						13,7
FSA 2	L/S 10 pH 7.4						24,3
FSA 2	L/S 100 pH 7.5						29,3
FSA 2	L/S 100 pH 7.7						29,2

B.2.2 Fältundersökning

Resultaten från den första fältprovtagningen redovisas i Tabell B8. Koldioxidhalten i tät- och dräneringsskiktet är låg. I dessa skikt är miljön basisk vilket medför att koldioxiden löser sig i porvattnet och inte förekommer i gasform. I skyddsskiktet, vilket inte innehåller aska, förekommer både metan och koldioxid. I tätskiktet domineras gasen av kvävgas som fångades i samband med byggnationen. Syre har förbrukats och en del metan har bildats. Förekomsten av höga syrehalter beror på luftintrång eller felaktig provtagning. Resultaten från den andra fältprovtagningen redovisas i Tabell B9. Kvävgashalten minskade jämfört med den första provtagningen medan metanhalten ökade. För övrigt är resultaten jämförbara.

Tabell B.8 Resultat från fältprovtagningen i september 2004. Gashalten redovisas i %.
 Table B.8 Result from field measurements in September 2004. Gas content in %.

Prov		H ₂ %	O ₂ %	N ₂ %	CH ₄ %	CO ₂ %
101	tät					
102	tät	2	2	68	36	0
103	avjämning	0	2	53	53	0
104	tät	0	6	79	20	2
105	tät	0	4	81	19	2
106	drän					
107	tät	0	2	83	16	2
108	tät	0	18	101	4	-8
109	tät	0	2	87	14	0
110	drän	0	2	86	17	1
111	drän	10	2	47	46	1
112	tät					
113	Skyddsskikt, i "bärskiktet" (BV:s schaktmassor)	0	2	49	28	27
114	Skyddsskikt, i "bärskiktet" (BV:s schaktmassor)	0	1	5	56	45
115	Skyddsskikt, i skiktet med hygieniserat avloppsslam	0	4	78	1	21
116	Skyddsskikt, i skiktet med hygieniserat avloppsslam					
117	Skyddsskikt	0	3	87	2	13

Tabell B.9 Resultat från fältprovtagningen i oktober 2004. Gashalten redovisas i %.
Table B.9 Result from field measurements October 2004. Gas content in %.

Prov		H ₂ %	O ₂ %	N ₂ %	CH ₄ %	CO ₂ %
101	tät					
102	tät	0	2	62	42	3
103	avjämning	0	5	57	57	0
104	tät					
105	tät	2	10	69	19	1
106	drän	4	4	52	56	0
107	tät	2	7	80	27	0
108	tät	3	4	75	21	0
109	tät	1	5	89	13	0
110	drän	1	4	85	16	0
111	drän	8	3	55	44	2
112	tät					
113	Skyddsskikt, i "bärskiktet" (BV:s schaktmassor)	0	3	50	31	27
114	Skyddsskikt, i "bärskiktet" (BV:s schaktmassor)	0	3	12	58	39
115	Skyddsskikt, i skiktet med hygieniserat avloppsslam	0	12	77	5	4
116	Skyddsskikt, i skiktet med hygieniserat avloppsslam	0	4	53	27	23
117	Skyddsskikt					

B.3 Slutsatser

FSA-materialet har en toxisk effekt vilket innebär att förekomsten av aska minskar den biologiska aktiviteten i materialet jämfört med rent slam. En askhalt på 40 % fördröjer nedbrytningen men inhiberar inte den medan en askhalt på 60 % inhiberar gasbildningen helt. En kombination av höga salthalter och högt pH är huvudförklaringen till att den biologiska aktiviteten inhiberas. Fältförsöken visar att metanbildning förekommer i FSA-materialet.

Efter 1 år undersökningar under laboratorieförhållanden har som högst ca 10 % av slammet brutits ned under optimala förhållandena (utan tillsats av flygaska). Detta innebär att det mesta av organiska materialet är svårt nedbrytbart.

Bilaga C – Uppföljning i fält

C.1 Analys av fast material

Tabell C.1 Metallinnehåll i FSA-material från provyta 1 – 4.

Table C.1 Contents of metals in FSA-material from cell 1-4

ELEMEN T	SAMPLE	FSA(ME) provyta 4	FSA(ME) provyta 1	FSA(VU) provyta 2	FSA(VU) provyta 3
TS	%	47,5	45,6	43,2	50,4
As	mg/kg TS	19,8	20	16,8	17,1
Cd	mg/kg TS	3,02	3,22	1,93	1,5
Co	mg/kg TS	9,54	8,85	6,37	6,77
Cr	mg/kg TS	45,1	39,2	27,3	27,2
Cu	mg/kg TS	227	176	123	155
Hg	mg/kg TS	0,535	0,528	0,45	0,514
Ni	mg/kg TS	28,2	27,1	28,9	28,5
Pb	mg/kg TS	94,7	104	65,7	62,3
V	mg/kg TS	30,3	27,9	27,7	31,8
Zn	mg/kg TS	854	818	398	320

Tabell C.2 Metallinnehåll i övrigt material.

Table C.2 Contents of metals in remaining material

ELEMENT	SAMPLE	Schaktmassor	Växtetableringsskik t	Hygeniserat avloppsslam	Lysimeter- sand
TS	%	89,2	27,1	35,2	99,4
As	mg/kg TS	3,04	5,21	6,34	1,44
Cd	mg/kg TS	0,12	3,65	2,72	0,0586
Co	mg/kg TS	4,34	3,28	5,62	4,15
Cr	mg/kg TS	9,02	15,7	17,1	7,75
Cu	mg/kg TS	9,01	42,6	185	9,37
Hg	mg/kg TS	<0,04	0,243	0,457	0,0426
Ni	mg/kg TS	5,19	12,5	16,2	6,06
Pb	mg/kg TS	15,3	49,9	77,7	9,82
V	mg/kg TS	8,89	12,2	17,6	7,52
Zn	mg/kg TS	30,3	532	623	23,5

C.2 Analys av lysimetervatten

De första provtagningarna utfördes under augusti/september 2004 (gasprovtagning) och september/oktober 2004 (provtagning av gas och lysimetervatten). Under april 2005 utförs en ny provtagning av vatten- och gaslysimetrarna.

Tabell C.3 Metallanalys på vattenprover (september 2004) från lysimetrarna L3 (Provyta 1), L 15 (provyta 3), L20 (provyta 2), L22 (provyta 2) och L23 (provyta 3).

Table C3. Analysis of water sample (September 2004) (L3= cell 1, L15 = cell 3, L20 = cell 2, L22 = cell 2, L23 cell 3)

ELEMEN T	SAMPLE	L 3 ME	L 15 VU	L 20	L 22	L 23
Filtrerad		JA	JA	JA	JA	JA
Ca	mg/l	1070	254	444	20,9	236
Fe	mg/l	0,273	0,0406	0,0233	0,616	1,97
K	mg/l	1820	56,2	77	501	201
Mg	mg/l	12,5	0,147	0,924	87,5	39,2
Na	mg/l	953	40,2	577	329	236
S	mg/l	1560	248	364	11,6	12,9
Si	mg/l	8,62	15,2	6,23	7,03	15,8
Al	µg/l	<100	394	<100	<100	<100
As	µg/l	177	<100	<100	298	256
B	µg/l	785	88,8	70,9	492	250
Ba	µg/l	192	142	152	338	882
Cd	µg/l	<20	<20	<20	<20	<20
Co	µg/l	39,1	61,7	32,2	51,4	39,8
Cr	µg/l	<20	<20	<20	<20	<20
Cu	µg/l	258	1170	25,9	<10	16,2
Li	µg/l	71,4	<10	<10	<10	<10
Mn	µg/l	44	<10	<10	86,1	584
Mo	µg/l	1920	249	1930	<20	<20
Ni	µg/l	225	40,8	<40	85	75,6
P	µg/l	9500	1610	4480	1170	654
Pb	µg/l	<100	<100	<100	<100	<100
Sr	µg/l	3060	358	493	114	462
V	µg/l	<10	19,5	14,2	50,7	11,6
Zn	µg/l	62,7	28,8	18,1	16,4	20,5

Lysimetrarna 3 och 15 ligger under tätskiktet.

Lysimeter 20 ligger under dräneringsskiktet.

Lysimeter 21 och 23 ligger under skyddsskiktet.

Tabell C.4 Metallanalys på vattenprover (april-2005) från lysimetrarna L3 (Provyta 1), L 7 (provyta 2), L20 (provyta 2), L22 (provyta 2) och L23 (provyta 3).

Table C.4 Analysis of water sample (April 2005)) (L3= cell 1, L7 = cell 2, L20 = cell 2, L22 = cell 2, L23 cell 3)

ELEMENT	SAMPLE	L3 ME	L 7 ME	L 20	L22	L23
pH		9,3	9	8,8	7,4	7,9
Konduktivitet	mS/m	2460	2500	543	825	898
DOC (NPOC)	mg/l	6400	8800	400	200	240
Ca	mg/l	593	1290	294	455	23,2
Fe	mg/l	0,207	0,205	0,035	0,994	0,128
K	mg/l	2010	1310	90	604	421
Mg	mg/l	13,3	3,14	1,34	201	92
Na	mg/l	1030	1020	589	491	361
S	mg/l	1680	1640	356	437	93,5
Al	µg/l	44,5	32,6	52,2	6,42	11,9
As	µg/l	112	121	22,4	21	14,7
Ba	µg/l	63,7	171	69,8	201	31,2
Cd	µg/l	1,17	1,28	<0,05	0,0831	0,0982
Co	µg/l	33,2	52,8	0,604	10,6	25,7
Cr	µg/l	0,694	<3	<0,5	0,505	1
Cu	µg/l	51,4	56,8	9,35	2,16	4,21
Hg	µg/l	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Mn	µg/l	12,8	90,1	2,15	1220	5,66
Ni	µg/l	204	452	7,67	32,2	86,4
Pb	µg/l	4,71	28,9	1,64	0,489	4,01
Zn	µg/l	55,2	106	23	2,3	6,93

Lysimetrarna 3 och 7 ligger under tätskiktet.

Lysimeter 20 ligger under dräneringsskiktet.

Lysimeter 21 och 23 ligger under skyddsskiktet.

Tabell C.5 Metallanalys på vattenprover från lakningsförsöken med FSA som tillverkades med flygaska från **Vattenfall Uppsala**.

Table C.5 Analyses of water samples from leaching tests with FSA containing flyash from Vattenfall Uppsala

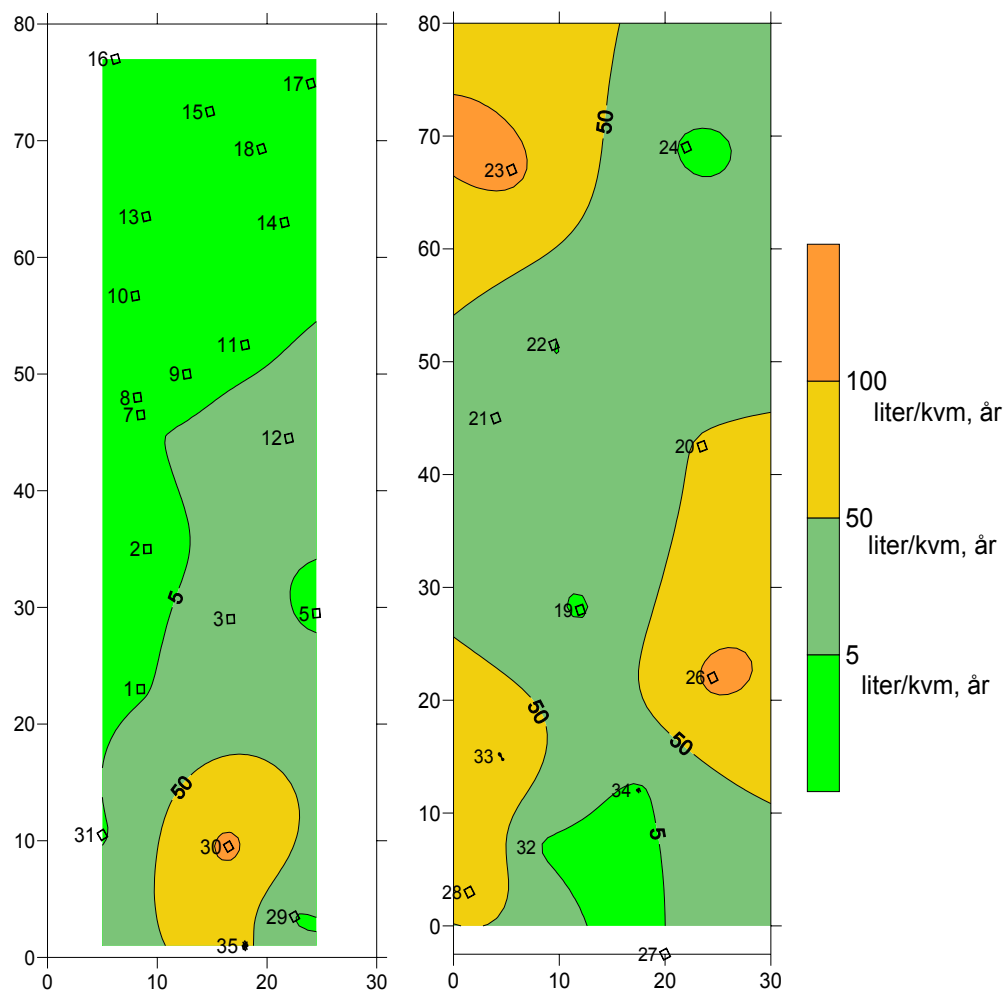
		L/S =10 FSA40	L/S =100 FSA40	L/S =10 FSA60	L/S =100 FSA60
Ca	mg/l	320	50	493	125
Mg	mg/l	35,7	10,4	0,42	0,061
K	mg/l	33	5	19	5
Na	mg/l	19	6	15	6
As	µg/l	50	11	50	9
Ba	mg/l	0,041	4	0,073	0,019
Cd	µg/l	1	ud	1	ud
Co	µg/l	28	4	23	3
Cr	µg/l	8	6	9	10
Cu	µg/l	787	89	1520	283
Fe	µg/l	770	197	283	136
Mn	µg/l	13	3	7	2
Ni	µg/l	233	33	158	ud
Pb	µg/l	ud	ud	ud	ud
Zn	µg/l	ud	ud	ud	ud

Tabell C.6 Metallanalys på vattenprover från lakningsförsöken med FSA som tillverkades med flygaska från **Mälarenergi**.

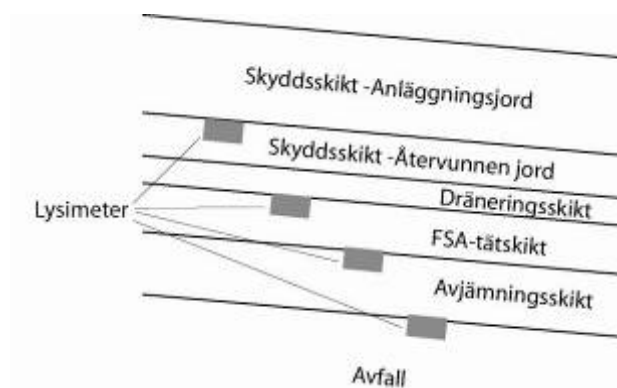
Table C.6 Analyses of water samples from leaching tests with FSA containing flyash from Mälarenergi.

		L/S =10 FSA40	L/S =100 FSA40	L/S =10 FSA60	L/S =100 FSA60
Ca	mg/l	609	173	521	166
Mg	mg/l	9,89	1,69	1,56	0,249
K	mg/l	420	60	666	59
Na	mg/l	129	20	176	18
As	µg/l	64	8	39	7
Ba	mg/l	0,092	42	0,179	0,093
Cd	µg/l	1	ud	1	ud
Co	µg/l	28	4	26	3
Cr	µg/l	15	6	18	12
Cu	µg/l	1720	135	1830	297
Fe	µg/l	588	202	203	84
Mn	µg/l	30	8	27	4
Ni	µg/l	202	38	175	ud
Pb	µg/l	ud	ud	ud	ud
Zn	µg/l	42	2	17	ud

C.3 Lysimeterrarnas placering



I figurerna ovan redovisas lysimeterrarnas placering under tätskiktet (den vänstra figuren) och under skydds respektive dräneringsskiktet (den högra figuren), med tillhörande bedömning av vattengenomsläpplighet (hösten 2004).



Lysimeterrarnas placering i tätskiktet.

C.4 TS-halt och vattenkvot

Tabell C.7 Flygaska från Mälarenergi.

Table C.7 Flyash from Mälarenergi.

Prov	Datum	m	m _s	TS (%)	vattenkvot (%)	Anmärkning
ME a:1	040510	28	24	86	72	härdat
ME a:2	040510	35,2	27,4	78	28	
ME a:3	040510	36,7	26,9	73	36	
ME a:4	040510	30,9	23,7	77	30	
ME b:1	040511	36,4	27,6	76	32	klumpar torrast av dessa tre, inga klumpar blöt i ytan, mindre men fler klumpar än i ME 5:2
ME b:2	040511	32,1	25,3	79	27	
ME c:1	040512	36,2	26,4	73	37	
ME c:2	040512	36,1	32,5	90	11	
ME c:3	040512	40,7	29,4	72	38	
ME c:4	040512	38,8	28,7	74	35	
ME c:5	040512	39,2	30,4	78	29	
ME c:6	040512	38,7	28,4	73	36	
ME e:1	040514	35	29,6	85	18	
ME e:2	040514	34,8	25,8	74	35	
ME e:3	040514	35,4	27,6	78	28	
ME f	040517	35,7	31,6	89	13	

Tabell C.8 Flygaska från Vattenfall Uppsala.

Table C.8 Flyash from Vattenfall Uppsala

Prov	Datum	m	m _s	TS (%)	vattenkvot (%)	Anmärkning
VU b:1	040511	23,5	20,1	86	17	
VU b:2	040511	63,2	54,3	86	16	
VU b:3	040511	46	31,3	68	47	ytligt, blöt
VU c:1	040512	38,9	34	87	14	
VU c:2	040512	40,1	35,2	88	14	
VU c:3	040512	37,2	32	86	16	
VU e:1	040514	35,8	29,7	83	21	ytligt, blöt
VU e:2	040514	37,1	30,7	83	21	ytligt, torrare än VU 5:1 samma som VU 5:2, men längre ned
VU e:3	040514	37,6	34,2	91	10	
VU e:4	040514	36,9	30,6	83	21	ytligt, bild tagen längre ned i askan än VU 5:4 (ca 1 dm), börjat klumpa. Bild på blöt front
VU e:5	040514	35,8	31,9	89	12	
VU f:1	040517	36,7	32,3	88	14	
VU f:2	040517	18,5	17,4	94	6	
VU f:3	040517	17	15,8	93	8	
VU f:4	040517	19,1	17	89	12	
VU g	040518	34,6	30,8	89	12	

Tabell C.9 Avloppsslam från Stockholm Vatten AB, Bromma.

Table C.9 Sludge from Stockholm Vatten AB, Bromma.

Prov	Datum	m	Datum	m _s	TS (%)	vattenkvot (%)
1a	040505	ARV-laboratoriet			33	200
1b	040505	ARV-laboratoriet			36	179
1c	040505	ARV-laboratoriet			37	170
1d	040505	ARV-laboratoriet			32	210
1e	040505	ARV-laboratoriet			33	202
2a	040505	ARV-laboratoriet			29	241
2b	040505	ARV-laboratoriet			32	214
2d	040505	ARV-laboratoriet			32	212
2e	040505	ARV-laboratoriet			32	217
2f	040505	ARV-laboratoriet			31	218
3a	040505	ARV-laboratoriet			33	208
3b	040505	ARV-laboratoriet			32	213
3c	040505	ARV-laboratoriet			28	252
3d	040505	ARV-laboratoriet			31	219
3e	040505	ARV-laboratoriet			31	226
4a	040505	ARV-laboratoriet			31	226
4b	040505	ARV-laboratoriet			31	226
4d	040505	ARV-laboratoriet			31	219
4e	040505	ARV-laboratoriet			31	218
4f	040505	ARV-laboratoriet			32	210
S c:1	040512	33,7	040513	11,1	33	204
S c:2	040512	41,9	040513	15,1	36	177
S d:1	040513	38,4	040514	12,1	32	217
S d:2	040513	38,2	040514	11,1	29	244
S d:3	040513	39	040514	10,9	28	258
S f:1	040517	31,7	040518	10,1	32	214
S f:2	040517	22,8	040518	6,5	29	251
S f:3	040517	31,9	040518	9,7	30	229
S g	040518	30,3	040519	8,8	29	244

Tabell C.10 FSA tillverkad med flygaska från Mälarenergi.

Table C.10 FSA with flyash from Mälarenergi.

Prov	Datum	m	m _s	TS (%)	vattenkvot (%)	Anmärkning
FSA(má) d:1	040513	37,7	15,9	42	137	
FSA(má) d:2	040513	35,3	14,1	40	150	
FSA(má) e:1	040514	35,2	15,7	45	124	ej optimal blandning
FSA(má) e:2	040514	34,7	15	43	131	ej optimal blandning
FSA(má) e:3	040514	33,4	13,8	41	142	ej optimal blandning
FSA(má) e:4	040514	36,3	15,4	42	136	optimal blandning
FSA(má) e:5	040514	35	15,9	45	120	optimal blandning

Tabell C.11 FSA tillverkad med flygaska från Vattenfall Uppsala.

Table C.11 FSA with flyash from Vattenfall Uppsala.

Prov	Datum	m	Datum	m _s	TS (%)	vattenkvot (%)
FSA(vu) f:1	040517	34,2	040518	15,3	45	124
FSA(vu) f:2	040517	34	040518	14,8	44	130
FSA(vu) f:3	040517	36,8	040518	13	35	183
FSA(vu) g:1	040518	33,2	040519	15,7	47	111
FSA(vu) g:2	040518	35,6	040519	16,9	47	111
FSA(vu) g:3	040518	33,6	040519	17,4	52	93
FSA(vu) g:4	040518	32,4	040519	15,3	47	112
FSA(vu) g:5	040518	35	040519	17,1	49	105
FSA(vu) g:6	040518	31,8	040519	14,6	46	118
FSA(vu) g:7	040518	33,1	040519	16	48	107
FSA(vu) h	040519	32,2	040524	13,6	42	137

Bilaga D – Slangsättningsmätning

För mätning av vertikallrörelser (sättningsmätning) installerades slang i olika skikt på provytorna. Principen för slangsettningsmätning fungerar på följande sätt. För mätning av sättningar under konstruktioner installeras en plastslang innan konstruktionen byggs. Vid mätning nyttjas en kabel som är fylld med vatten. I nedre änden på kabeln finns det en tryckgivare som registrerar tryck. I den övre änden leds vätskan till ett stigrör med atmosfärstryck. Vid mätningen förs spetsen med tryckgivaren i önskad längd in i den installerade slangen. Nivåskillnaden mellan den fria vätskeytan och tryckgivaren läses av. Efter kalibrering anges nivån. Eventuell sättning redovisas Genom att utföra mätning på samma ställe i den yttre slangen men vid olika tidpunkter. REF: Handboken Bygg – Geoteknik, Sigurd Avén (1984).

Bilaga E – Flygaskornas innehåll av metaller

Mälarenergi, Västerås har en CFB-panna där bränslet är spillprodukter från skogstillverkning i form av grenar och toppar. Mängden tillgängligt metaller för lakning redovisas inom parentes i tabell E.1.

Tabell E.1 Totalhalter av oorganiska ämnen i flygaska från Mälarenergi.

Table E.1 Total constituent analyses on fly ash from Mälarenergi AB.

Ämne	Enhet	Flygaska P5, 2003
As	mg/kg TS	8,7 (< 0,1)
Ba	mg/kg TS	1370
Be	mg/kg TS	3,47
Cd	mg/kg TS	5,8 (2)
Co	mg/kg TS	18,1 (3)
Cr	mg/kg TS	11,7 (0,075)
Pb	mg/kg TS	91,7 (< 5)
S	mg/kg TS	
Sc	mg/kg TS	
Sn	mg/kg TS	< 20
Sr	mg/kg TS	653
V	mg/kg TS	98,1
W	mg/kg TS	
Y	mg/kg TS	
Zn	mg/kg TS	618 (100)
Zr	mg/kg TS	
Cu	mg/kg TS	74
Hg	mg/kg TS	0,895 (0,002)
Ni	mg/kg TS	59,1 (14,5)

Vattenfall Värme Uppsala, pulver där bränslet är torv och trä.

Uppsala Energi AB använder normalt cirka 175 000 ton torv/spån (70 % / 30 %) som bränsle i Kraftvärmeverkets ångpanna (KVV) och en fastbränsleeldad hetvattenpanna (HVC) per år. Mängderna kan variera något beroende på väderleksförhållanden. Rökgaserna renas i elektrofilter och spärfilter varvid det avskiljs cirka 15 000 ton (TS) flygaska och 1 500 ton (TS) bottenslagg per år.

*Tabell E.2 Totalhalter av oorganiska ämnen i flygaska från Vattenfall Värme Uppsala.
Table E.2 Total constituent analyses on fly ash from Vattenfall Värme Uppsala.*

Analys	Halt	Flygaska 2000-02-17	Flygaska 2000-03-21	Flygaska 2000-03-25
LOI	%	10,3	10	9,8
As	mg/kg TS	19,9	18,8	6,83
Ba	mg/kg TS	573	778	691
Be	mg/kg TS	2,55	2,73	1,85
Cd	mg/kg TS	1,36	1,67	<0,121
Co	mg/kg TS	9,67	19,4	12,9
Cr	mg/kg TS	39,2	46,8	47,2
Cu	mg/kg TS	37	32,8	35,2
Hg	mg/kg TS	0,49	0,331	0,474
La	mg/kg TS	36,9	39,7	53,7
Mo	mg/kg TS	14,7	13,6	14,8
Nb	mg/kg TS	<0,609	<5,69	7,45
Ni	mg/kg TS	29,1	24,4	23,7
Pb	mg/kg TS	32,6	22,7	28,5
Sc	mg/kg TS	5,29	5,06	6,73
Sn	mg/kg TS	<24,4	<22,8	<22,2
Sr	mg/kg TS	290	323	301
V	mg/kg TS	52,5	44,7	49,6
W	mg/kg TS	<60,9	<56,9	<55,4
Y	mg/kg TS	42,4	55,5	47,8
Zn	mg/kg TS	140	293	121
Zr	mg/kg TS	46,5	59,8	50,3

Bilaga F – Slamtillverkning och behandling på Stockholm Vatten

Vid rening av avloppsvatten produceras slam som består av föroreningar som avskiljs ur avloppsvatten innan detta släps ut i recipienten. Mängden bildat slam är beroende av avloppsvattnets sammansättning och reningsförfarandet. På Stockholm Vattens reningsverk tillverkas två typer av slam: mekaniskt-kemiskt slam, vid förfällning med järn, och bioslam, vid biologisk rening enligt aktivslammetoden. Dessa slam stabiliseras anaerobt genom rötning. Det innebär att det organiska innehållet bryts ner under kontrollerade former. Efter stabilisering kvarvarande halt organisk substans skall föreligga i sådan form att en fortsatt nedbrytning går mycket långsamt. Nedbrytningen av det organiska materialet i slammet anges som slammets utrötningsgrad. Utrötningsgraden bör vara minst 0,5 för att rötslammet skall vara stabilt. Utrötningsgraden 0,5 innebär att slammets organiska innehåll minskat till hälften medan det oorganiska materialet kvarstår oförändrat. Slamstabilisering innebär också att man minskar slammets störande lukt. Efter rötningen avvattnas rötslam i centrifuger där tillsätts polymer för att få en effektivare avvattning, d v s ett torrare slam. På Stockholm Vattens reningsverk har centrifugerat slam TS (torrsustanshalt – summan av fasta och lösta ämnen) på ca 30 %. Detta slam används idag för återställning av markområden som använts inom gruvindustrin.

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

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET



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

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35