

Uppföljning

– Kontroll av tätskiktskonstruktionen
på Dragmossens deponi

Josef Mácsik

Christian Maurice

Agnes Mossakowska

Caroline Eklund

Åsa Erlandsson



Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SV-Utveckling) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet.

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

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvatten
Ekonomi och organisation
Utbildning och information

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

Anders Lago, ordförande	Södertälje
Olof Bergstedt	Göteborgs VA-verk
Roger Bergström	Svenskt Vatten AB
Daniel Hellström	Stockholm Vatten AB
Stefan Marklund	Luleå
Mikael Medelberg	Roslagsvatten AB
Anders Moritz	Linköping
Bo Rutberg	Sveriges Kommuner och Landsting
Peter Stahre	VA-verket Malmö
Göran Tägtström	Borlänge
Agneta Åkerberg	Falkenberg
Steinar Nybruket, adjungerad	NORVAR, Norge
Peter Balmér, sekreterare	Svenskt Vatten AB

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

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

Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Uppföljning – Kontroll av tätskiktskonstruktionen på Dragmossens deponi
Title of the report:	Follow up – Installed liner construction at Dragmossen waste site
Rapportens beteckning Nr i serien:	2007-09
Författare:	Mácsik J. Ecoloop, Maurice C, Luleå Tekniska Universitet, Mossakowska A. Stockholm Vatten, Eklund C. Econova, Erlandsson Å. Ecoloop
Projektnr:	26-107
Projektets namn:	Uppföljning - Flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA)
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling (f.d. VA-Forsk), Värmeforsk, RVF, Stockholm Vatten, Econova, Ecoloop
Rapportens omfattning Sidantal: Format:	49 A4
Sökord:	Rötat avloppsslam, flygaska, tätskikt, deponi, vägledning, pilotförsök, uppföljning, nedbrytning
Keywords:	Sewage sludge, flyash, liner, waste site, guide, pilot study, degradation
Sammandrag:	Undersökningen visar att en sluttäckningskonstruktion med FSA i tätskiktet klarar funktionskraven som ställs på deponier med icke-farligt avfall. Undersökningen visar också att tätheten ökar med tiden, vilket ger god prognos för att konstruktionen med FSA är en långsiktig lösning.
Abstract:	This investigation shows that closure of a landfill with FSS as liner fulfils the requirements for landfills with non-hazardous waste. Further the investigation shows that permeability decreases with time, which gives a good prognosis that a construction with FSS is a long term solution.
Målgrupper:	Konsulter, entreprenörer, deponi- och materialägare, miljömyndighet
Omslagsbild:	Tätskiktsprofilen med FSA och avjämningskikt (flygaska), Josef Mácsik
Rapporten beställs från:	Finns att hämta hem som pdf-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2007
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Förord

I olika utredningar har flygkastabiliserat avloppsslam (FSA) undersökts på uppdrag av bland annat Stockholm Vatten AB (SVAB). Föreliggande uppföljningsdokumentation utfördes i samarbete mellan SVAB, Ecoloop, Luleå tekniska universitet och Econova i syfte att undersöka FSA-materialets funktion som tätskikt i sluttäckning av deponi. I uppdraget utfördes provtagning av tätskiktsprofilen, av lysimetervatten och av bildning av biogas i tätskiktet i Dragmossen, Älvkarleby. I rapporten redovisas även resultat från delar av det kontrollarbete som utfördes på deponin i Lilla Nyby (Eskilstuna) med motsvarande FSA-lösning.

Arbetet genomfördes av en grupp med kompetens inom VA-teknik, miljögeoteknik, deponiteknik m.m., bestående av Agnes Mossakowska (Stockholm Vatten), Josef Mácsik (Ecoloop), Caroline Eklund och Johanna Fältström (Econova) och Christian Maurice (Luleå tekniska universitet, LTU). Laboratorieundersökning med avseende på FSA-materialets biologiska beständighet utfördes vid LTU:s Avfallstekniska laboratorium.

Projektet har finansierats av Svenskt Vatten (VA-forsk), Stockholm Vatten, Värmeforsk, Svenska Renhållningsverksföreningen (RVF), Ecoloop och Econova. Jörgen Björnfot, Eskilstuna Energi och Miljö AB har bidragit med resultat och erfarenheter från Lilla Nyby. Projektets referensgrupp och styrgrupp bestod av Claes Ribbing (Svenska Energiaskor), Thomas Hellström (VA-forsk), Lars Dalgren (Fortum Värme), Jörgen Dahlin (Stora Enso), Thomas Rihm (RVF) och Bengt Göran Hellström (SVAB).

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	7
Summary	8
1. Inledning	9
1.1 Bakgrund	9
1.2 Syfte	9
1.3 Metod/tillvägagångssätt	9
1.4 Underlag	10
1.5 Avgränsning	11
2. Fält- och laboratorieundersökningar	11
2.1 Allmänt	11
2.2 Borrprovtagning	12
2.3 Vattenlysimeter	12
2.4 Gaslysimeter	12
2.5 Nederbördsdata	13
2.6 Beständighet – Laboratorie- och fältundersökning	14
3. Resultatsammanställning	14
3.1 Tätskiktets geotekniska egenskaper	14
3.1.1 Dragmossen	15
3.1.2 Lilla Nyby, Eskilstuna	17
3.2 Tätskiktets täthet i fält (Dragmossen)	19
3.3 Utlakning	21
3.3.1 L/S-kvot	21
3.3.2 Halter i lysimetervatten	22
3.4 Gassammansättning och beständighet	25
3.4.1 Allmänt	25
3.4.2 Fältundersökning	25
3.4.3 Laboratorieundersökning	26
3.4.4 Beständighet	28
4. Diskussion	29
4.1 Allmänt	29
4.2 Uppföljning av mätta parametrar	29
4.2.1 FSA skiktets kvalitet	29
4.2.2 FSA-skiktets geotekniska egenskaper	30
4.2.3 Tätskiktets beständighet	31
4.2.4 Kvalitetens påverkan på täthet	32
5. Slutsatser	34
6. Rekommendationer	35

Referenser	37
Bilaga B: Gaslysimeter	
– gassammansättning (FÄLT).....	42
Bilaga C: Samband mellan TOC nedbrytbarhet i FSA	
efter 2,5 år (LAB).....	43
Bilaga D: Borrprovtagning	
– Tätskiktsprofilens vattenkvot/TS-halt.....	44
Bilaga E: Ödometerförsök	
– FSA skiktets permeabilitet (LAB).....	45

Sammanfattning

Under de senaste 5 åren har ett tätskiktmaterial, baserat på flygaska och avloppsslam, utvecklats på flera håll. Väl dokumenterade och undersökta pilotförsök, där FSA har använts finns på flertalet anläggningar bl.a.: Dragmossen (Älvkarleby), Lilla Nyby (Eskilstuna), Blåberget (Sundsvall), Gärstad (Linköping), Sofielund (Huddinge) och Tagene (Göteborg). Denna rapport beskriver i resultat från uppföljning och kontroll av tätskiktskonstruktionen på Dragmossens deponi och i mindre utsträckning uppföljning av deponin Lilla Nyby. Uppföljningen omfattade undersökning av permeabilitet, provtagning och analys av vatten- och gasprover samt laboratorieundersökning med avseende på beständighet mot nedbrytning hos flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA).

Undersökningen visar att blandningens homogenitet är en viktig faktor som styr tätskiktets täthet och därmed beständighet. Trenden är att FSA-skiktets täthet ökar med tiden och att efter 1 – 2 år klarar även mindre homogena blandningar täthetskravet på deponi med icke-farligt avfall. Det finns ett samband mellan kompressionen av FSA-skiktet och skiktets täthet. Med ökande kompression, dvs. ökning av densitet, ökar tätheten. Resultaten från fältmätningarna visar att utlakningen av metaller, DOC etc, styrs av mängden vatten som perkolerar igenom tätskiktet. Eftersom tätheten ökar minskar den utlakade mängden av dessa ämnen. Baserat på erfarenheter från undersökning av homogena blandningar i fält uppskattas att L/S (liquid/solid) kvot 10 uppnås efter flera hundra år. En viktig slutsats från laboratorieundersökningen är att ökad mängd flygaska i FSA minskar risken för eventuell nedbrytning. Vid 40 % flygaska i FSA sker det nedbrytning av organiskt material förutsatt att salterna sköljs ur. Vid 60 % flygaskatillsats sker det ingen biologisk nedbrytning. Baserat på dessa resultat bör därför andelen flygaska vara större än 40 % och blandningen vara homogen. Gasmätning i fält indikerar att metanbildningstakten är låg i tätskiktet om man bortser från en provpunkt som ligger i den delen av deponin där tätskiktet hade dålig kvalitet. Idag saknas det dock bevis för att en eventuell nedbrytning eller ursköljning av några procent av FSA-materialets organiska innehåll medför försämrade täthetsegenskaper.

Undersökningen visar att en sluttäckningskonstruktion med FSA i tätskiktet klarar funktionskraven som ställs på deponier med icke-farligt avfall. Deponiytorerna som är täckta med FSA är i dagsläget bara några år gamla. För framtida användning av FSA finns det tolkningsunderlag för att kunna göra en uppskattning av FSA-materialets funktion, långtidsbeständighet och permeabilitet. God kontroll av avloppsslammets, flygaskans och blandningens kvalitet samt att det utlagda FSA materialet komprimeras och skyddas mot uttorkning ger en låg årlig perkolation av vatten. Krav på kvalitetssäkring och repeterbarhet på FSA-materialet är viktig.

Summary

During the last five years a landfill liner based on fly ash stabilised sewage sludge (FSS) has been developed at several locations. Well documented and investigated pilot studies, where FSS was used as liner material, are at several locations: Dragmossen (Älvkarleby), Lilla Nyby (Eskilstuna), Blåberget (Sundsvall), Gärstad (Linköping), Sofielund (Huddinge) and Tagene (Göteborg). In this report results are presented from a field test follow up and control of the landfill constructions at Dragmossen. Some results are used from the control of Lilla Nyby. The follow up included control of permeability, sampling of the liner construction, sampling and analyses of gas and water samples. A laboratory investigation was also conducted on durability against biological degradation of fly ash stabilised sewage sludge (FSS).

The investigation shows that FSS liner permeability and durability are controlled by the homogeneity of the FSS mixture. The trend is that the FSS liners permeability decreases with time, and after 2 – 3 years although less homogenous FSS mixtures has watertight qualities to satisfy liner specifications for a landfill with non-hazardous waste. There is a good correlation between compression of the FSS liner and its permeability. With increasing compression, this leads to an increasing density, the liners permeability decreases. Results from field measurements show that leaching of metals, DOC etc. is governed by the amount of percolated water through the FSS liner. As permeability decreases, the amount of leached elements decreases. Based on experience from the investigation of homogeneous mixtures in field, it is estimated that an L/S ration of 10 will be obtained after up to several hundred years. An important conclusion of the laboratory investigation is that an increased proportion of fly ash in the FSS mixture lowers the risk of biological degradation. At 40 % fly ash (% of dry solid) as additive in an FSS mixture degradation of organic matter takes place if salts are washed out. At 60 % fly ash as additive in an FSS mixture biological degradation of organic matter is inhibited. These results show that an addition of more than 40 % fly ash (% of dry solid) should be used in FSS and that it should be mixed homogeneously. Gas measurements at field indicate that methane formation is low in the FSS liner, except from one sampling point which is located in a cell where FSS has a poor quality. There is no proof that degradation or leaching of a few percent of organic matter leads to higher permeability.

This investigation shows that closure of a landfill with FSS as liner fulfils the requirements for landfills with non-hazardous waste. Up to date landfill sites covered with FSS as liner material are only a few year old. For future use of FSS the interpretation base is sufficient to estimate the FSS liners function, durability and permeability. Quality control is essential in order to use FSS as liner.

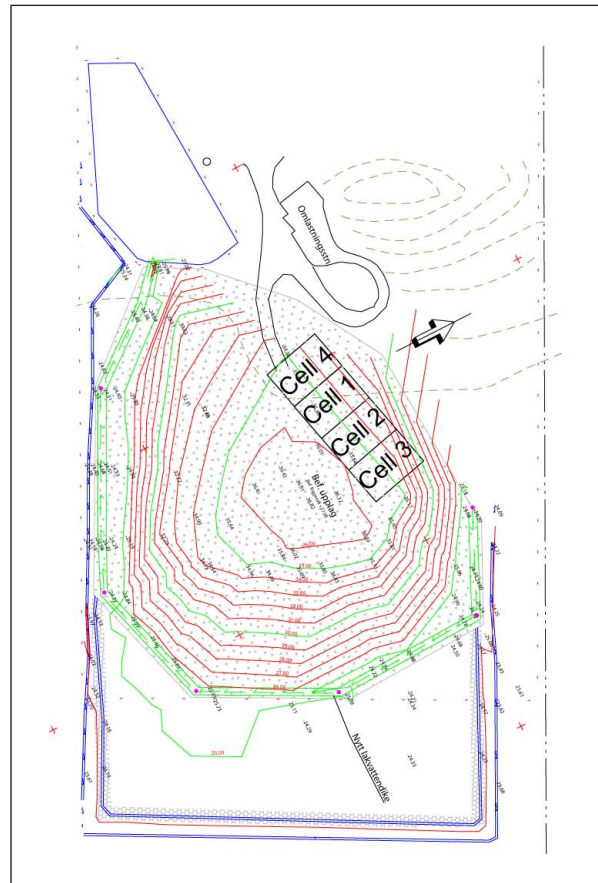
1. Inledning

1.1 Bakgrund

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, bland annat flertalet fältförsök, finansierade av bl.a. RVF, VA-Forsk, Värmeforsk och RTK, visade att flygskastabiliserat avloppsslam (FSA) har stor potential att kunna användas som tätskikt vid sluttäckningar (bl.a. Värmeforskrapporterna 837 och Q4-237). Ett av fältarbetena utfördes på Dragmossens avfallsdeponi i Älvkarleby kommun, 3 km söder om Älvkarleby. Cirka 2400 m² av deponin täcktes med FSA som tätskikt, figur 1-1. Tätskiktet lades ut maj 2004 och under de påföljande veckorna installerades skyddsskikt på provytan.

Tätskiktet kontrollerades och följdes upp med avseende på tekniska och miljötekniska aspekter. Permeabilitet (mätt i fält som genomsläpplighet av vatten), skjuvhållfasthet, biologisk aktivitet, gasbildningspotential etc. följdes upp mellan sommaren 2004 och våren 2005 och avrapporterades under 2006. Parallellt med fältundersökningen pågick även en laboratorieundersökning för att utreda FSA-materialets beständighet mot biologisk nedbrytning.

Pilotförsöket gav även viktiga drifttekniska erfarenheter gällande tillverkning, transport och utläggning av materialet. De arbeten som genomfördes ligger bland annat till grund för framtagning av Vägledning för tillverkning av FSA som tätskiktsmaterial.



Figur 1-1. Dragmossens deponi med försöksytan och indelning i Cell 1–4.

1.2 Syfte

Syftet med detta projekt var att följa upp Dragmossens deponi och utreda hur tätheten och nedbrytningen utvecklas med tiden efter våren 2005. Det övergripande syftet var att verifiera tidigare erhållna resultat och bygga upp en erfarenhetsbank inför kommande regelmässig användning av FSA som tätskikt.

1.3 Metod/tillvägagångssätt

Det nu aktuella projektet delas in i följande delmoment:

- Uppföljning av tätskiktets permeabilitet och beständighet mellan våren 2005 och december 2006

- Uppföljning av sättningar och hållfasthetsutveckling mellan våren 2005 och december 2006
- Sammanställning och analys av erhållna resultat mellan våren 2004 och december 2006
- Diskussion och slutsatser

1.4 Underlag

Den aktuella deponiytan har avjämnats genom utläggning av ett ca 0,5 m tjockt avjämningskikt. Lutningen på avjämningskiktet var normgivande för den slutliga ytans lutning, figur 1-2. Lagrad flygaska från Mälarenergi Västerås användes som konstruktionsmaterial i avjämningskiktet. Försöket bestod av 4 provytor (celler) som var 20 x 30 m stora. Ytans lutning redovisas nedan:

- Lutningen för Cell 4 (C4) varierade mellan ca 1:12 till 1:30 västlig riktning.
- Lutningen för Cell 1 (C1) varierade mellan ca 1:24 till 1:48 nordlig riktning
- Lutningen för Cell 2 (C2) varierade mellan ca 1:20 till 1:28 nordlig riktning
- Lutningen för Cell 3 (C3) varierade mellan ca 1:10 till 1:21 i nordöstlig riktning.

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 (Circulation fluidized bed)

VattenfallAB Värme Uppsala

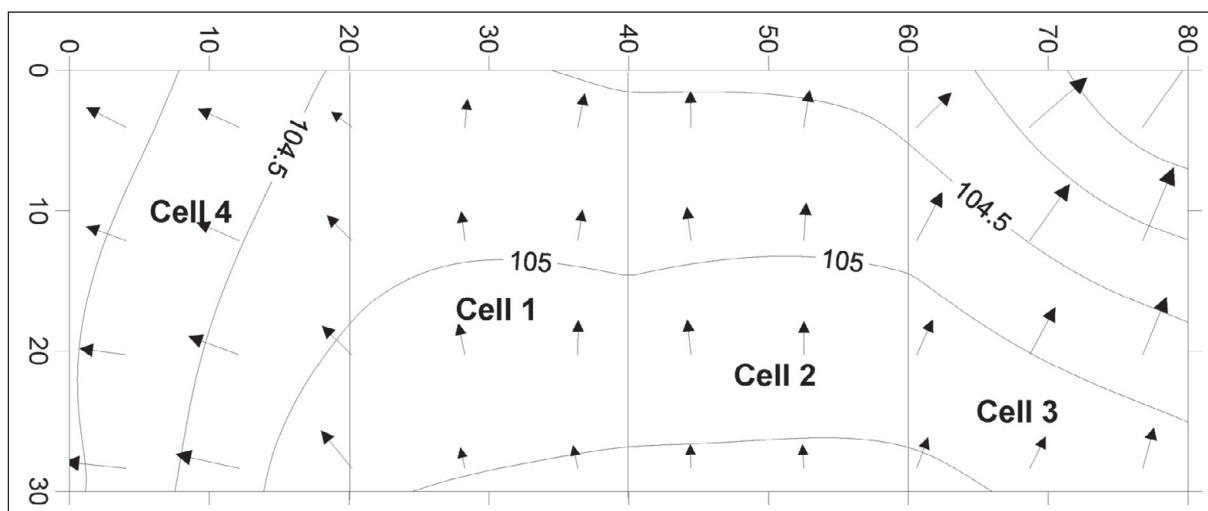
Uppsala

Torv, trä

Pulver

Flygaskorna var färska med tillsats av vatten i förhållandevis små mängder. Flygaskan från Mälarenergi hade en vattenkvot¹ på ca 32 %, med variation mellan 11–38 %. Vattenfall Uppsalas flygaska hade en lägre och jämnare vattenkvot (w). Vattenkvoten låg på ca 20 %. Förhållandet mellan vattenkvot och TS² redovisas i sidfotanteckningar nedan.

Det flygkastabiliserade avloppsslammets (FSA) 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 %



Figur 1-2. Höjdnivåer på dräneringslagrets yta och riktning för ytavrinning.

¹ Vattenkvot, $w = m_w/m_s$ ($w = (1/TS) - 1$ dvs. $TS = 1/(1 + w)$, där $m = m_s + m_w$)

² $TS = m_s/m$, där m är materialets våtvikt och m_s är torrs substansens vikt.

(medianvärde), medan FSA med flygaska från Vattenfall Uppsala hade en vattenkvot på ca 111 % (medianvärde).

På cellerna (provyta) 4 och 1 samt ca 1/4-del av cell 2 installerades FSA45 från Mälarenergi. Resterrande provytor (cell 2 och cell 3) bestod tätskiktet av FSA50 som tillverkades med flygaska från Vattenfall Uppsala.

Celler

Cell 4 (C4) 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. Inom Cell 4 varierade FSA-materialets densitet mellan 0,75 och 1,66 t/m³. Andelen flygaska och avloppsslam varierade på grund av driftstopp vid blandningen.

Tätheten kontrollerades med lysimetrar och definieras här som mängd vatten per kvadratmeter och år. På större delen av Cell 2 och 3 (C2 och C3) var tätheten under 5 liter/m² och år vid mätningen i oktober 2004. Cell 1 (C1) hade en täthet som var under 20 liter/m² och år. Cell 4 var den provyta där arbetet startades och FSA-materialets homogenitet och andelen flygaska i blandningen varierade mest. Vid oktobermätningen var tätskiktets täthet < 50 liter/m² och år.

Vatten- och gaslysimetrar

Försöksytans lutning, dräneringsskiktets och skyddsskiktets effektivitet att dränera bort överflödigt vatten är viktiga faktorer som påverkar hela tätskiktets konstruktionens täthet. För att kontrollera tätskiktets funktion finns det 35 stycken vattenlysimetrar installerade för insamling av vatten i deponins olika tätskikt. Lysimetrarnas funktion, förutom att kontrollera vattenvolymen som tränger igenom ovanför liggande skikt, var att kunna kontrollera innehåll av metaller, DOC etc., samt pH och konduktivitet.

Förutom vattenlysimetrar installerades även 14 stycken gaslysimetrar. Gaslysimetrarnas funktion var att kontrollera gassammansättningen i tätskiktets profil. Gasprover togs för analys av gassammansättning, som CO₂, CH₄, O₂ och N₂.

Parallella försök

Det pågår en parallell täckning med FSA på deponin Lilla Nyby. Resultat och erfarenheter från detta arbete introduceras i rapporten. Resultat från Lilla Nyby och Dragmossen jämförs med varandra och diskuteras.

1.5 Avgränsning

Arbetet omfattar laboratorie och fältundersökningar under ett års tid, drygt två år efter sluttäckning. Fältundersökningen med avseende på vatten- och gasprovtagning utfördes vid två tillfällen medan provtagning av tätskiktetsprofilen vid ett tillfälle.

2. Fält- och laboratorieundersökningar

2.1 Allmänt

Fältundersökningen omfattade provtagning av vatten från lysimetrar, provtagning av gas från lysimetrar och provtagning av tätskiktetsmaterial. Fältundersökningarna utfördes vid tre olika tillfällen under 2006. Laboriestudierna omfattade nedbrytnings-tester där gasbildningspotentialen efter lakning med olika L/S-kvoter undersöktes i syfte att utvärdera FSA-materialets beständighet. Laborieproverna startades upp våren 2004 och avvecklades hösten 2006, se Tabell 2-1 (nedan).

Tabell 2-1. Tidsschema för fältprovtagning som utfördes på Dragmossens deponi sedan 2004.

Metod	2004#												2005#												2006										
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				
Tillverkning	x£																																		
Sluttäckning		x																																	
Vatten		0				109						318							492							708							849		
Gas						x																				x							x		
Fast material	x																																		
Laboratorie - Gas		start																																avslutad	

[£] Kontroll av materialkvalitet (avloppsslam, flygaskor från Mälarenergi och Vattenfall Uppsala, samt FSA (M) och FSA (V).

Siffrorna 109, 318, 492, 708 och 849 anger FSA-skiktets ålder i dagar.

^{\$} Provtagning i tätskiktsprofilen med borrhandsvagn.

[#] Avrapporterad i Värmeforsks och VA-Forsks rapportserier, Miljöriktig användning av askor, rapport 942 respektive VA-Forsk, rapport Nr 2006-01.

2.2 Borrhandsprovtagning

De ursprungliga planerna var att ta upp ostörda prover från tätskiktet, med hjälp av borrhandsvagn. Provtagningsmetoden var kolv- och skruvprovtagning. Skruvprovtagning utfördes ner till FSA-skiktet. Därefter skulle kolvprovtagning utföras i FSA-skiktet. FSA, som består av ca 45–50 % flygaska kunde inte stansas ut. Materialet uppförde sig som friktionsmaterial. Härdad flygaska som förekommer i klumpar i FSA-skiktet skadade kolvens egg, vilket i sin tur medförde att proverna som stansades ut var störda. Försöket med att ta prover med kolv avbröts därför och provtagningen utfördes med skruvprovtagare, se figur 2-2 (nedan). Provtagning med borrhandsvagn utfördes 20 augusti 2006.

2.3 Vattenlysimeter

Vattenlysimetrar installerades i tätskiktskonstruktionen på olika nivåer, figur 2-1 (nedan). Den primära målsättningen med att installera lysimetrar var att kontrollera mängden vatten som perkolerar genom olika skikt och speciellt tätskiktet som består av FSA.

Vattenprovernans sammansättning analyserades för att undersöka vad och hur mycket de olika skikten lakar. Mätning av vattenmängd som perkolerar/infiltrerar per kvadratmeter (täthet), halter av Cl, sulfat, Na, K, DOC etc. ger indirekt information av FSA-materialets beständighet.

Vattenprovtagning utfördes totalt vid fem mätillfällen, se tabell 2-1. Under uppföljningsprojektet

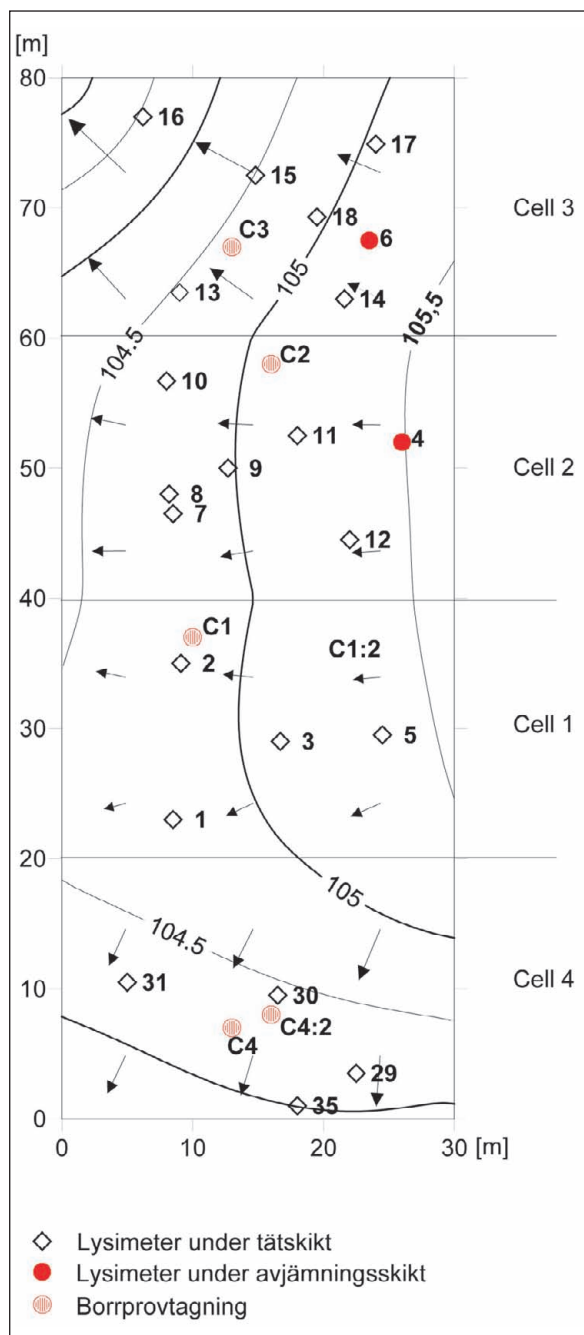
utfördes provtagning vid två tillfällen, maj 2006 och oktober 2006.

2.4 Gaslysimeter

Gasprover från lysimetrarna analyseras med avseende på biogas. Sammansättningen och hur den förändras med tiden ger indikation om nedbrytningsprocessen i tätskiktet. Gaslysimetrarnas placering, nummer och höjdnivå redovisas i figur 2-2. Gaslysimetrarna tömdes genom en slang (så kallad transportslang). Syftet med gasanalyserna var att detektera fördelningen av N, O₂, CH₄ i tätskiktsprofilen och att kunna påvisa hur dessa halter ändras med tiden. Gasprovtagning utfördes enligt följande provtagningsbeskrivning:

1. Uttag och tömning av 100 ml gas från transportslangen utfördes av uppsamlad gas genom uttag av gas med gasspruta. Transportslangens gassammansättning kan vara påverkad av inläckage av luft.
2. Uttag av ytterligare 40 ml gas med gasspruta och uppsamling i gastät flaska.

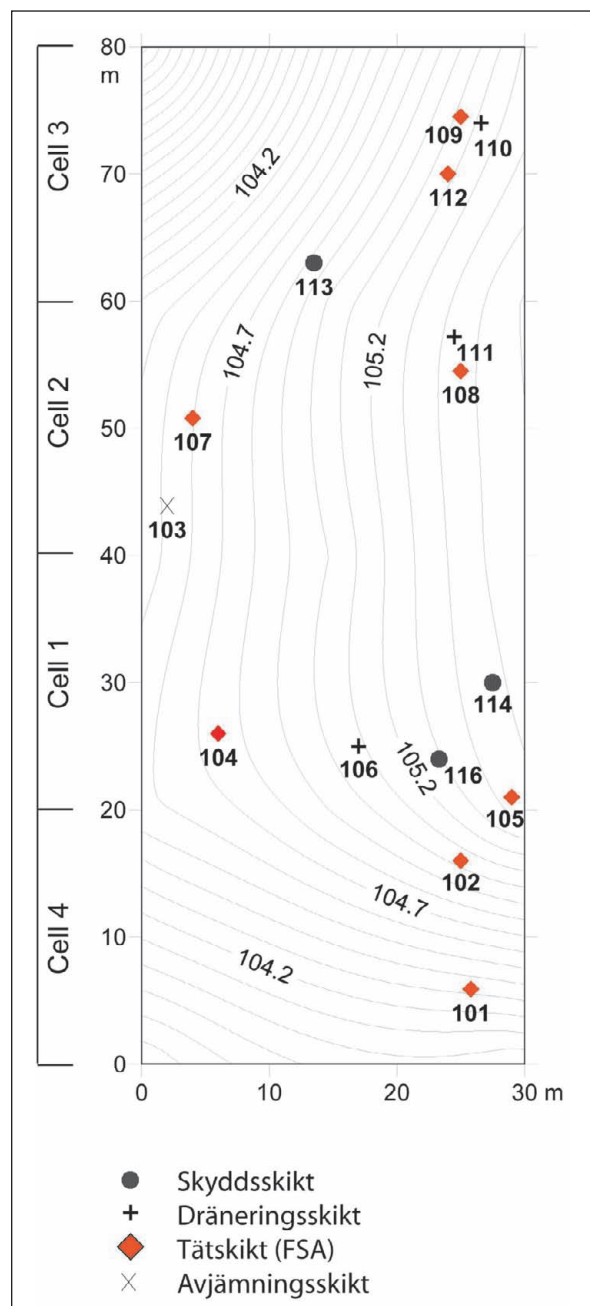
Gassprutorna som användes ursprungligen var av plast. Vid de första provtagningsstillfällena var resultaten av gasanalyserna svårtolkade. Orsaken var att ett visst undertryck fanns kvar i plasticsprutan i de fall det inte fanns tillräckligt med gas i lysimetern. Konsekvensen blev att provvolymen var mindre än planerat och att beräkningarna baserades på felaktiga mängder. Undertryck i sprutan ökar också risken att luft smiter in i provet i samband med hanteringen.



Figur 2-1. Lysimetrarnas placering underavjämnings- och tätskiktet samt placering av borrhavningspunkter. Vattenlysimetrarna är numrerade från 1-35.

Vid provtagningarna i oktober (2006) användes glasprutor i syfte att ha bättre kontroll på mängden gas och därmed verklig gassammansättning.

Gasprovtagning utfördes vid 3 mättillfällen, se tabell 2-1. Under detta projekt utfördes två analyser på gassammansättning.



Figur 2-2. Gaslysimetrarnas placering i avjämnings-skiktet, i tätskiktet, i dräneringsskiktet respektive i skyddsskiktet. Gaslysimetrarna är numrerade från 101-114.

2.5 Nederbördsdata

Under de första 109 dagarna efter den första tömningen av lysimetrarna var den ungefärliga nederbörds-mängden ca 200 liter/m² och år. Därefter var den årliga nederbörds-mängden från september till september ca 500 mm/år (500 liter/m² och år).

2.6 Beständighet – Laboratorie- och fältundersökning

FSA-materialets beständighet undersöktes i laboratorium vid Luleå tekniska universitets (LTU:s) Biolab. Försöket förlängdes och varade i totalt tre år. Undersökningens syfte var att visa gasbildningen, dvs. den biologiska aktiviteten, i avloppsslammet och i FSA-materialet.

Provflaskor med FSA och avloppsslam undersöktes i laboratorium med avseende på gasbildning, nedbrytning och TOC. Provernas inkubationstid var ca tre år. Bildning av metangas ger indikation på nedbrytning och halten TOC kvar efter försöket indikerar hur stor andel organiskt material som har brutits ned. I fält undersöktes gassammansättning och gasbildning in situ i de olika skikten som ingick i tätskiktstrukturen.

Laboratorieprover undersöktes vid anaeroba förhållanden vad gäller gasbildning efter lakning. Bildning av biogas undersöktes i prov med enbart avloppsslam, med FSA40 och FSA60. Proverna lakades först vid med vattenvolym som motsvarar L/S³ 10 och därefter med L/S 100. Efter filtrering ympades proverna med bakteriekultur vid L/S 10. Samtliga prov undersöktes sedan under en ackumulerad inkubationstid på 950 dygn. Under inkubationstiden registrerades gasproduktionen.

3. Resultatsammanställning

3.1 Tätskiktets geotekniska egenskaper

Fältprovtagningen på Dragmossens deponi utfördes augusti 2006, drygt två år efter att deponiytan avslutades. Provtagningen utfördes med skruv- och kolvprovtagare. Östörda prover togs inte upp i planerad omfattning eftersom kolvprovtagarens egg förstördes av klumpar av härdad flygaska. Proverna som togs blev därmed störda. Provernas skrymdensitet, vattenkvot och ”östörda” provers permeabilitet från cell 4 undersöktes. Resultat från en parallell provtagning och undersökning, som utfördes på Lilla Nyby, Eskilstuna kommun, redovisas i syfte att redovisa densitetens och kompressionens betydelse för permeabiliteten. Sluttäckningen på lilla Nyby utfördes på liknande sätt som på Dragmossens deponi. I Eskilstuna utfördes provtagningen ca 6 månader efter installation av tätskiktet. Fram till augusti 2006 avslutades en yta på 1 ha.

Tabell 3-1. Tätskiktets profil och provtagningsdjup redovisas för respektive provtagningspunkt på deponins olika celler.

Nivå och skikt	Prov			
	Cell 4	Cell 1	Cell 2	Cell 3
0–1 m, anläggningsjord	C4	C1, C1:2	C2	C3
1–1,5 m, morän	C4	C1, C1:2	C2	C3
1,5–1,7 m, dräneringsskikt	C4	C1, C1:2	C2	C3
1,7–ca 2 m, tätskikt (FSA)	C4:2 ^k	C1 ^k , C1:2	C2	C3
ca 2–2,5 m flygaska (Mälarenergi)	C4,C4:2	C1:2	x	C3
> ca 2,5 m avfall	x	x	x	x

^k – Kolvprovtagning.

x – Ingen provtagning.

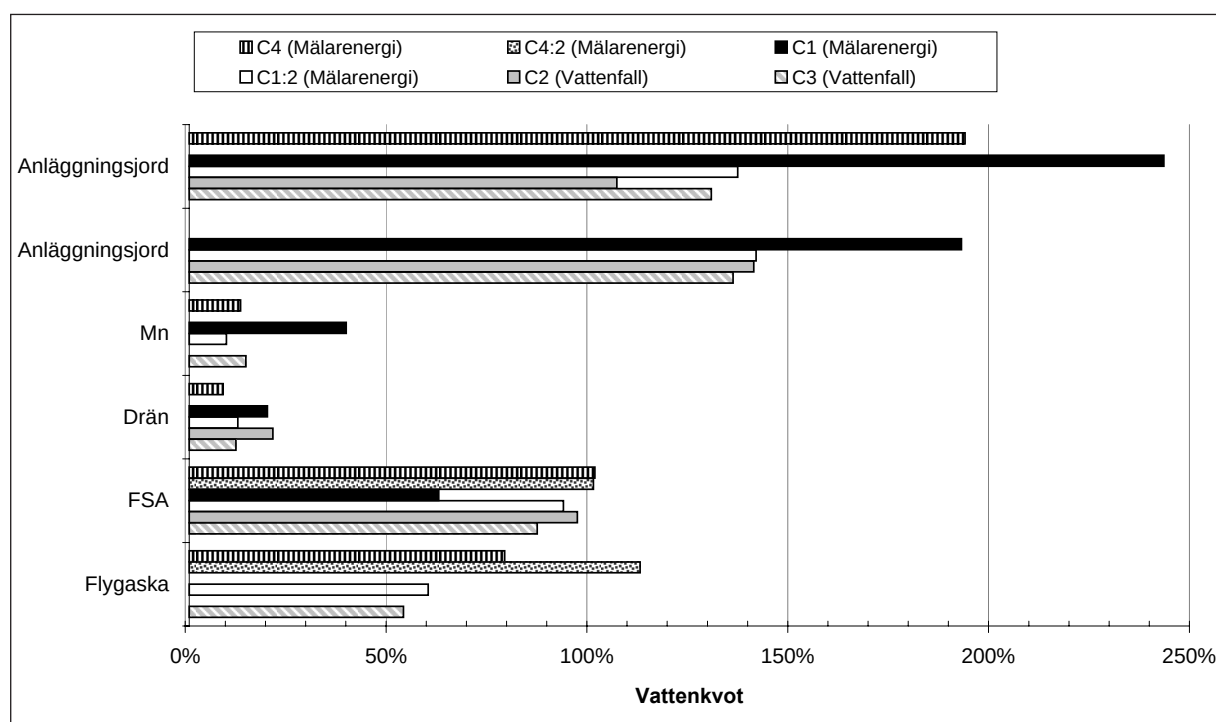
³ L/S-kvot vid lakning är förhållandet mellan massa lakvatten, m_w , och massa torrsustans, m_s . Exempelvis vid lakning med L/S 10 är mängden lakvatten 10 gånger större än mängden torrsustans som lakas. Genom att successivt öka mängden lakvatten höjs L/S kvoten under lakning.

3.1.1 Dragmossen

Provtagningen utfördes i 6 punkter ner till skyddsskiktet. Borrprovtagningen utfördes augusti 2006. På cell 1 (C1) och cell 4 (C4) togs det två parallella prover i profilen, se tabell 3-1 (ovan).

De olika skiktens vattenkvot redovisas i figur 3-1. FSA-skiktet underlagras av ett avjämningsskikt bestående av flygaska (från Mälarenergi, Västerås). Dräneringsmaterial överlagras FSA-skiktet. Det framgår av figur 3-2a och 3-2b att de olika skikten är väl

separerade, dvs. grusmaterial från dräneringsskiktet och flygaska från avjämningsskiktet trängde inte in i FSA-materialet. Redovisningen börjar uppfifrån och startar med anläggningsjorden och avslutas med avjämningsskiktet som överlagras avfallet. Tättskiktet som består av FSA tillverkades maj 2004. Vid tillverkning och utläggning av FSA undersöktes bland annat materialets vattenkvot och TS. FSA-materialets vattenkvot och TS vid provtagningen augusti 2006 jämförs med dessa värden.



Figur 3-1. Tättskiktsprofilens vattenkvot skikt för skikt vid provtagningen augusti 2006.



Figur 3-2. Tättskiktsprofilen, med a) dränskikt och FSA och b) FSA och avjämnings-skikt (flygaska).

Cell 1 och cell 4

Anläggningsjorden (0–1 m) inom området cell 1 (C1) och cell 4 (C4) har stor andel organiskt material. Materialets vattenkvot varierade i profilen mellan ca 190 % och 240 %, figur 3-3. Motsvarande värden på TS låg mellan 29–34 %, se figur 3-3. Dessa prover bedömdes vara vattenmättade och uppvisade värmeutveckling. Vid uttag av lysimetervatten under november 2006 låg vattentemperaturen i skyddsskiktet runt 20–27 °C.

Moränens vattenkvot i profilen (1–1,5 m) var runt 10–14 %. Motsvarande värden på TS ligger mellan 88 % och 91 %. Moränen är löst packad och materialet bedömdes inte vara vattenmättat vid provtagningsstillfället.

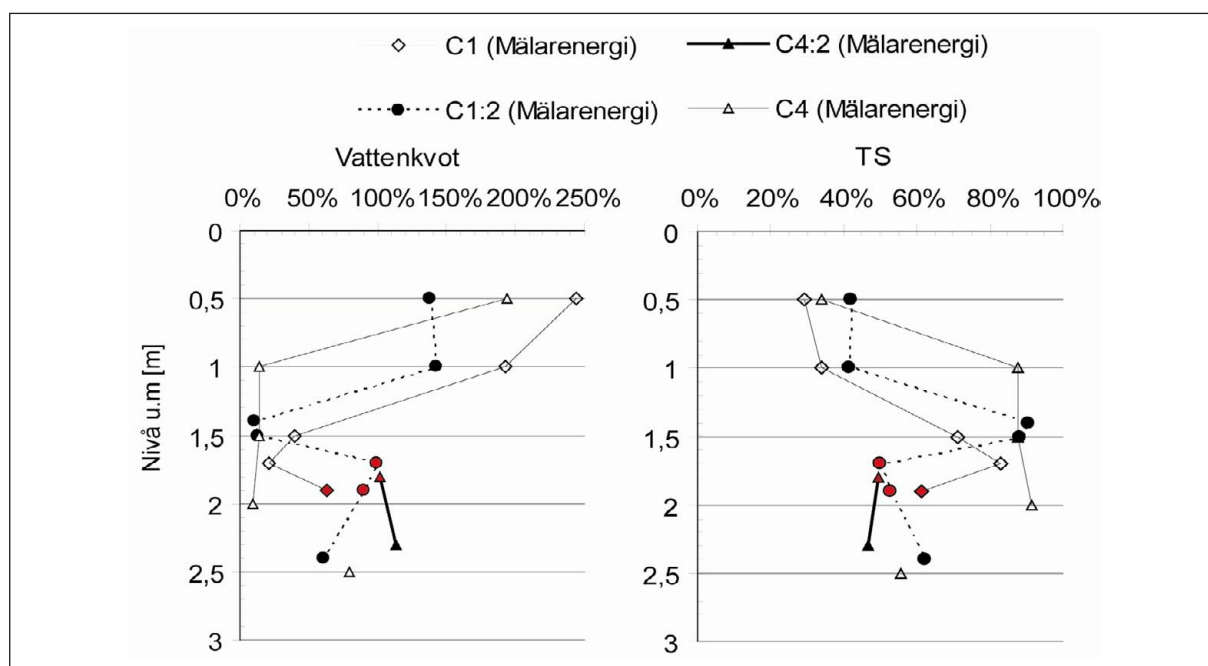
Dräneringssand installerades på cell 4 medan dräneringsgrus (slaggrus) finns i cell 1, 2 och 3. Dräneringsandens vattenkvot i profilen (1,5–1,7 m) var ca 9 %, vilket motsvarar en TS-halt på ca 91 %. Dräneringsgrusets (1,5–1,7 m) vattenkvot varierar mellan 13 % och 22 % (TS-halt mellan 82 % och 88 %).

FSA-materialet i cell 1 och 4 tillverkades med flygaska från Mälarenergi. FSA-materialets vattenkvot vid installation (maj 2004) varierade mellan 120 % och 150 %, med medianvärde på 136 %, figur 3-3. Utläggning av FSA-skiktet utfördes direkt efter tillverkning, dvs. inom några timmar. FSA-skiktets

vattenkvot vid provtagningen ca 2 år senare (augusti 2006) låg mellan 63–102 % (TS mellan 50–61 %). Vid provtagningen i punkt C4 togs det inget FSA-prov. Vid provtagningen i de övriga cellerna stansades kolvprover ut från det övre lagret av FSA-skiktet. Provtagningen medförde att i vissa fall trängde dräneringsgrus in i det utstansade FSA-materialet. Dessa prov blev störda på grund att provtagarens egg skadades av dräneringsmaterialet vid provtagning. Vattenkvoten på 63 % uppmättes i FSA-material med innehåll av dräneringsmaterial. FSA-material som inte var kontaminerat med grus hade en vattenkvot på ca 90–102 % (TS ca 50–53 %), se figur 3-3 (röd markering).

FSA-skiktets kompression uppgick till 50–55 %, dvs. FSA-skiktets tjocklek på 0,5–0,55 m komprimerades till ca 0,25 m och återfinns på nivå 1,7–2 m. Vid kompression pressades porvatten ut ur materialet och FSA-skiktets vattenkvot minskade därmed. FSA-materialets skrymdensitet ökade från 800 kg/m³ vid utläggning till mellan 1222 kg/m³ och 1332 kg/m³ efter kompression. Provets permeabilitet utvärderades från CRS-försök (constant rate of strain) och var ca 10⁻⁸ m/s, se bilaga E.

Vid provtagningen i augusti 2006 hade flygaskan som underlagrar FSA-skiktet vattenkvotsvärden mellan 61–113 % (TS 49–62 %). Bedömningen är att flygaskans ursprungliga vattenkvot vid installation (maj 2004) var ca 40–60 % (TS 63–71 %). Flygaskans vattenkvot har höjts till 60–100 %. Enbart



Figur 3-3. Profilens vattenkvot respektive TS. Röd markering anger vattenkvot och TS i tätskiktets FSA-material.

utpressat vatten från FSA-skiktet kan inte förklara flygskans förhöjda vattenkvot vid provtagningen i augusti 2006. Pressvatten bedöms dock vara den dominerande orsaken till den förhöjda vattenkvoten i avjämningsskiktet (flygaskan).

Cell 2 och cell 3

Anläggningsjorden – Vattenkvoten i anläggningsjorden vid provtagningen i augusti 2006 låg mellan 100 och 140 %, figur 3-4. På enstaka nivåer uppvisade proverna svag värmeutveckling. Vid uttag av lysimetervatten november 2006 låg vattentemperaturen i skyddsskiktet runt 24 °C.

Moränens vattenkvot i profilen var ca 15 % i cell 2. I cell 3 undersöktes inte moränens vattenkvot. Moränsskiktet bedömdes vara homogent på hela provytan, dvs. över cell 1–4.

Dräneringsskiktets vattenkvot i profilen var mellan 13 % och 22 % (TS mellan 82 och 88 %).

FSA-skiktet i cell 2 och 3 var tillverkad med flygaska från Vattenfall Uppsala. Vid utläggning (maj 2004) hade blandningen vattenkvot på 111,8 % (TS 47 %) i medianvärde. Den något lägre vattenkvoten, jämfört med cell 1 och 4, kan förklaras med att FSA lagrades upp till 3–5 dygn innan utläggning. Tätskiktets vattenkvot sänktes ytterligare efter installation av skyddsskiktet, genom att vatten pressades ut från materialet i samband med kompressionen. Vid

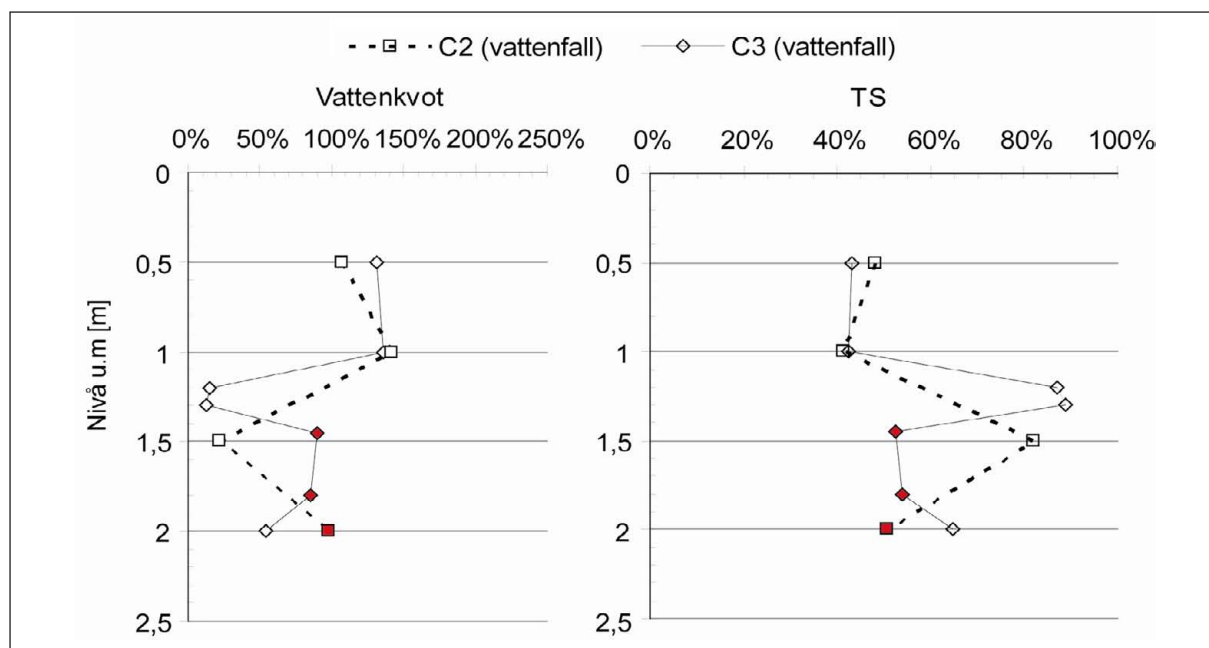
provtagningen 2006 var FSA-materialets vattenkvot mellan 85 och 98 %, figur 3-4 (röd markering). FSA har lagts ut med 0,5 m skiktthjocklek. Vid provtagningen var tjockleken på FSA-skiktet ca 0,25–0,35 m. Provernas skrymdensitet kunde inte kontrolleras eftersom inga kolvprover kunde tas i cell 2 och cell 3.

Avjämningskiktet som utgörs av flygaska hade en vattenkvot på ca 54 % (TS 65 %).

3.1.2 Lilla Nyby, Eskilstuna

Deponin Lilla Nyby, Eskilstuna kommun, skall sluttäckas i etapper under de närmaste 10–15 åren. Pilotförsök med täckning av provytor med flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) har genomförts under 2005 och 2006. Resultaten har varit goda med avseende på genomsläppligheten.

Den valda lösningen uppfyller funktionskravet på täthet (<50 l/år och m²), vilket bedöms kunna innehållas över lång tid (flera hundra år). Lösningen bygger på att avfall nyttiggörs som konstruktionsmaterial för sluttäckningen och därmed sparar resurser. Som tätskikt användes en blandning av flygaska och avloppsslam från Eskilstuna kommuns egna verksamheter. Tekniken som användes vid blandning och utläggning av FSA var en vidareutveckling av tekniken som användes på Dragmossens deponi, Älvkarleby, och resultaten är fullt jämförbara



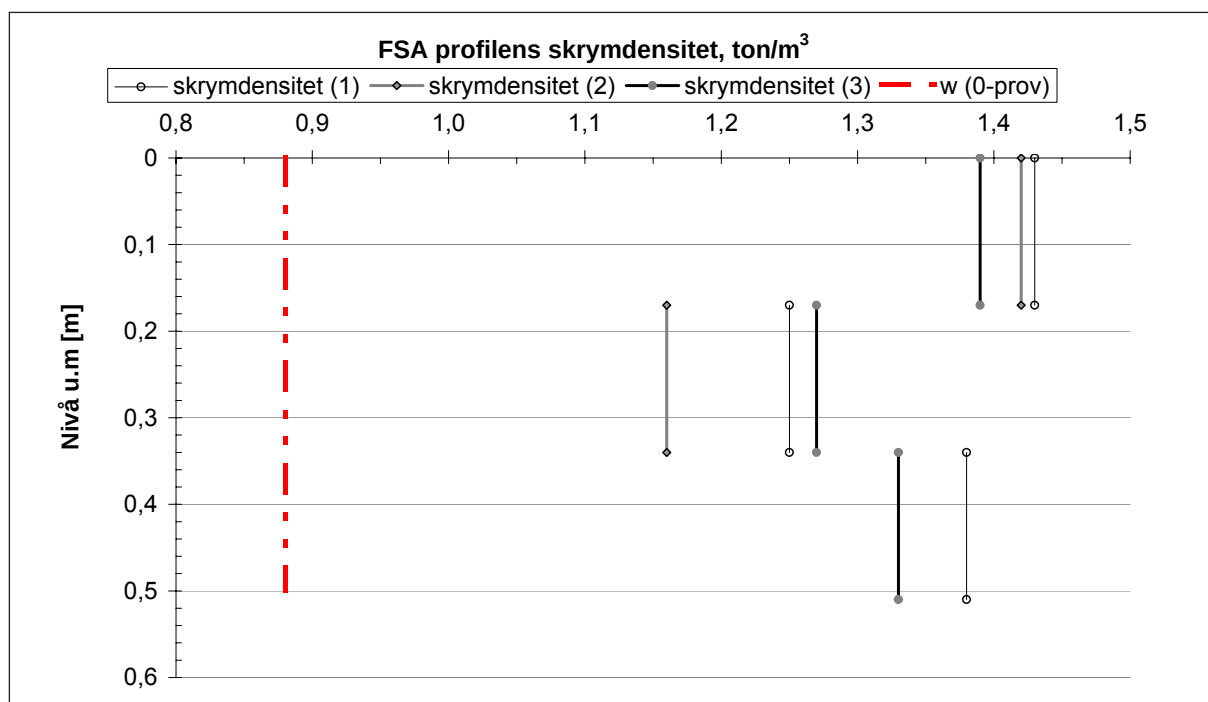
Figur 3-4. Profilers vattenkvot respektive TS. Röd markering anger vattenkvot och TS i tätskiktets FSA-material.

med resultat från denna. Nedan redovisas resultat från provtagning av tätskiktsprofilen i Lilla Nyby.

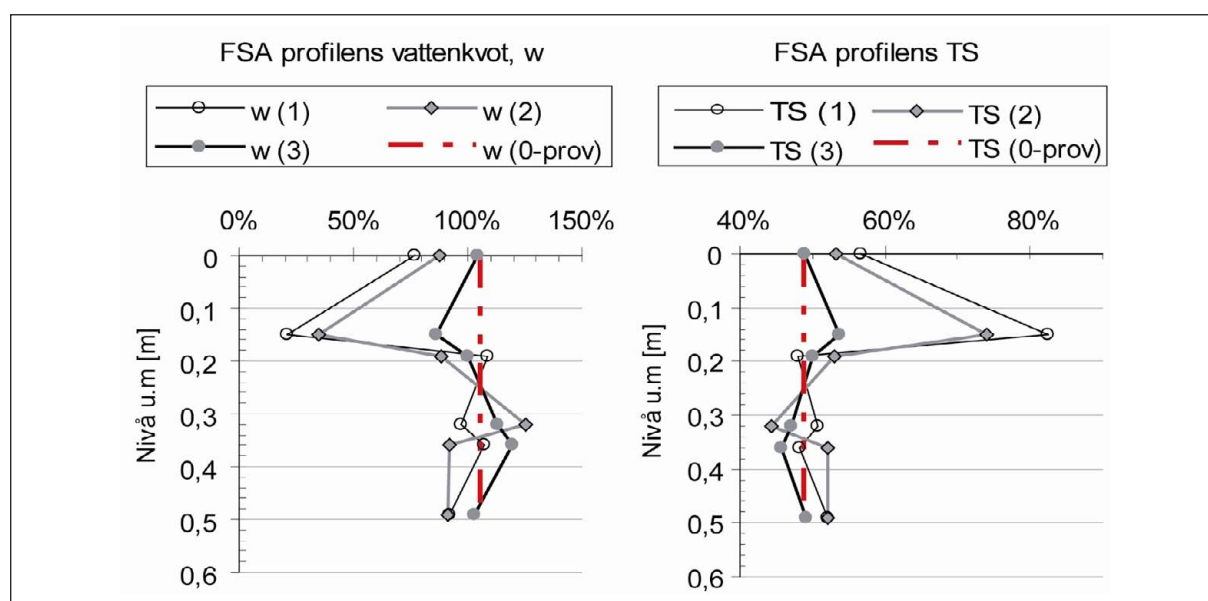
I tre provpunkter togs det upp prov med kolvprovtagare i FSA-skiktet. Tre kolvar fylldes med FSA i varje punkt. Respektive kolv fylldes med ca 0,15–0,17 m FSA-material. FSA har lagts ut i 0,6 m skikt-tjocklek. FSA-skiktets tjocklek efter kompression var ca 0,4–0,5 m. FSA-skiktets skrymdensitet var vid utläggningen ca 890 kg/m³. Halvår senare var materialets skrymdensitet ca 1330 kg/m³, figur 3-5.

Ökningen orsakades av kompression. Skrymdensiteten varierade i FSA-skiktsprofilen, se figur 3-5. Det översta lagret på ca 0,17 m hade den högsta densiteten. Den lägsta densiteten hade mittenskiktet, se figur 3-5.

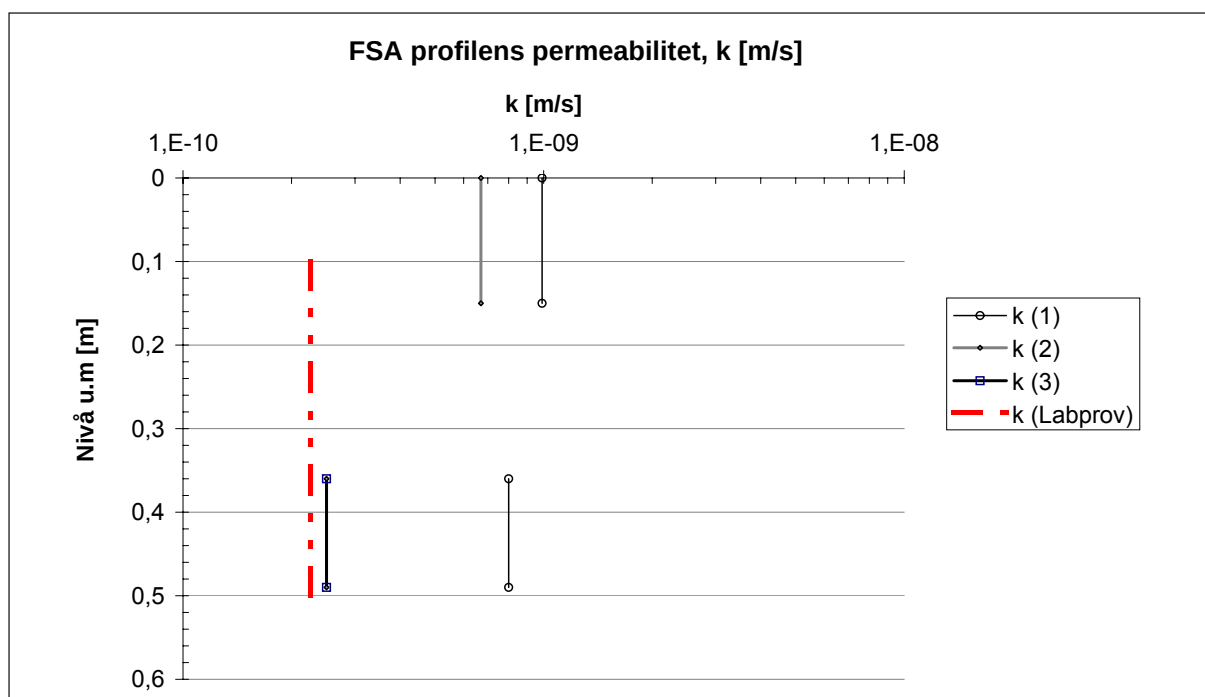
FSA-skiktet påverkades av uttorkning under utläggningstiden, figur 3-6. I FSA-skiktets övre del minskade vattenkvoten från 105 % (TS 49 %) till mellan 20–30 % (TS 70–80 %). Materialets vattenkvot var i stort sett opåverkad på nivån större



Figur 3-5. FSA-profilens skrymdensitet vid utläggning (0-prov) och efter ca 6 månader, Lilla Nyby, Eskilstuna.



Figur 3-6. FSA-profilens vattenkvot respektive TS vid utläggning (0-prov) och efter ca 6 månader, Lilla Nyby, Eskilstuna.



Figur 3-7. FSA-profilens permeabilitet, baserat på CRS-försök. Som referens anges permeabiliteten hos laboratorie-tillverkade prover, streckad röd linje.

0,15–0,17 m, figur 3-6. FSA-skiktets återfuktades dock i alla tre punkter, figur 3-6. Risken för uttorkning kan minskas genom bevattning efter det att dräneringsskiktet är installerat. I annat fall tar det upp till månader innan nederbörd når ner till tätskiktet igenom skyddsskiktet.

Proverna från fält undersöktes med avseende på permeabilitet i laboratorium. Permeabiliteten utvärderades från CRS-försök (constant rate of strain). Samtliga FSA-prov från fält hade en permeabilitet som var lägre än 10^{-9} m/s. Permeabiliteten var högst, 10^{-9} m/s, i ytskiktet, dvs. i skiktet som utsattes för torkning och återfuktning. Permeabiliteten i laboratorietillverkade prover var lägre än 3×10^{-10} m/s, figur 3-7 (ovan) och bilaga E.

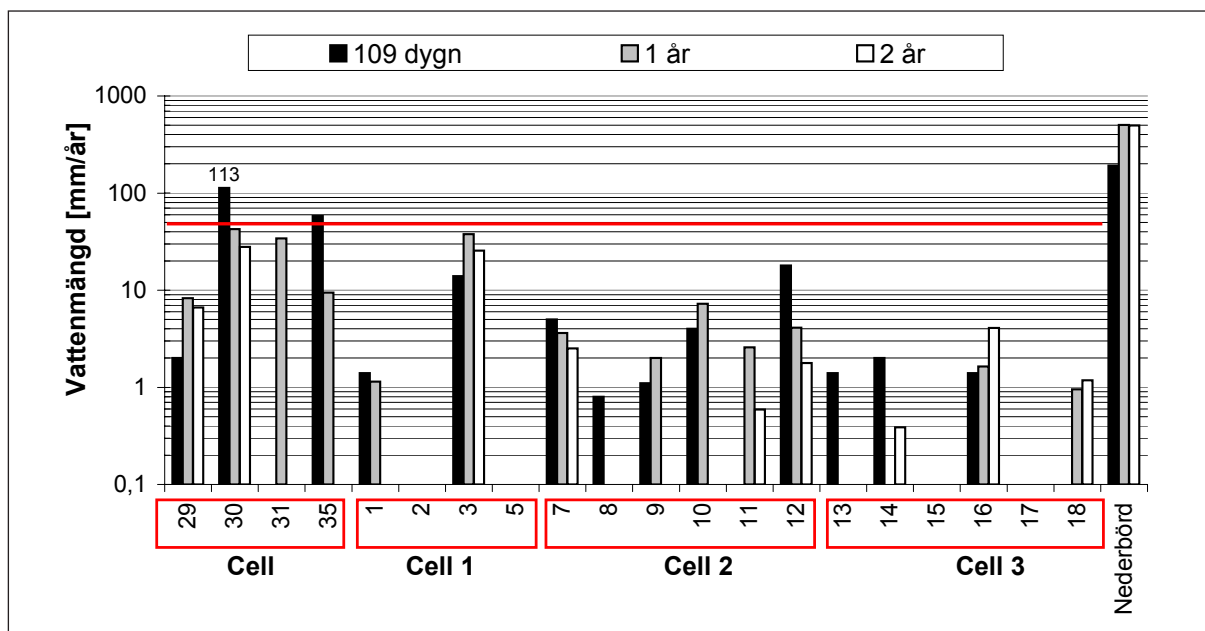
3.2 Tätskiktets täthet i fält (Dragmossen)

Tätskiktets täthet undersöktes vid fem tillfällen mellan maj 2004 och oktober 2006, se tabell 3-2. Av 20 lysimetrar som installerades under tätskiktet var 11 stycken torra efter drygt ett år. Sex lysimetrar samlade upp vatten som perkolerade igenom tätskiktet (FSA-skiktet) under hela perioden. Mängden vatten som lysimetrarna samlade upp efter de första 109 dagarna härstammar till delar från pressvatten från FSA-skiktet. I figur 3-8 (nedan) redovisas tätskiktets täthet uttryckt som mm/år och den totala nederbördsmängden under respektive period. Observera att skalan är logaritmisk. Vattenmängden uttrycks i mm/år vilket motsvarar liter/m² och år. Tätheten för den första perioden, 109 dygn, är uttryckt som årsekvivalens, dvs.:

$$\text{Täthet [liter/m}^2 \text{ och år]} = x \text{ [liter/m}^2 \text{ och 109 dygn]} \cdot \frac{365 \text{ dygn}}{109 \text{ dygn}}$$

Tabell 3-2. Datum för vattenprovtagning, ackumulerad tid i dygn och periodindelning.

Datum	2004-06	2004-10	2005-04	2005-10	2006-05	2006-10
Akkumulerad tid	0	109 d	318 d	492 d	708 d	849 d
Periodindelning	109 d		383 d, (ca 1 år)		357 d, (ca 1 år)	



Figur 3-8. Täthet för respektive lysimeter under perioden.

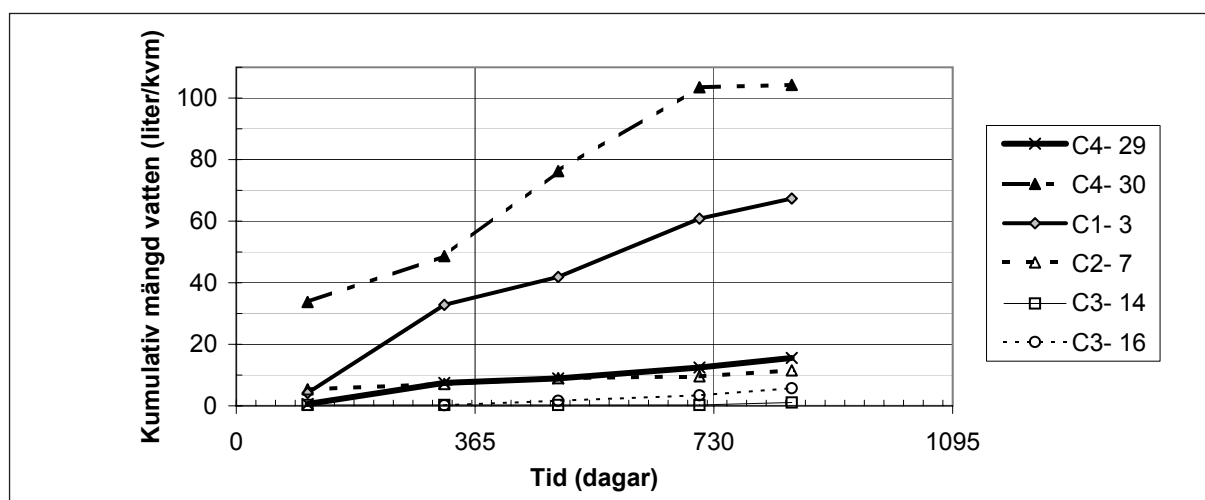
Under den första perioden på 109 dagar var nederbördsmängden ca 200 liter (SMHI), medan under år 1 och 2 var nederbördsmängden ca 500 liter/m² och år (500 mm/år).

Cell 4

Några av lysimetrarna i cell 4 gav den största mängden perkolerat vatten genom tätskiktet. Det uppsamlade vattnet under den första perioden, dvs. under de första 109 dagarna, var till delar pressvatten. Kompression av tätskiktet, som ligger runt 30–50 %, medförde att vatten pressades ut ur materialet. Området runt lysimeter 30 och 35 var mer permeabelt än övriga delar av cell 4. Generellt minskade mängden vatten

med tiden. Under år två var den högst uppmätta genomsläppligheten mindre än 30 mm/år, figur 3-8. I de resterande lysimetrarna i cell 4, låg mängden vatten, som perkolerade genom tätskiktet, under 10 mm/år under det andra året.

I figur 3-9 (nedan) redovisas den kumulativa mängden vatten i de sex lysimetrar som gav vatten under hela mätperioden, lysimetrarna 29, 30, 3, 7, 14 och 16. Övriga lysimetrar gav i storleksordning lika mycket eller mindre vatten, se figur 3-8. Det framgår av figuren att mängden perkolerat vatten avtar med tiden. Under perioden mellan maj 2006 och oktober 2006 var den perkolerade vattenmängden liten, dvs. den kumulativa mängden vatten stagnerar, figur 3-9.



Figur 3-9. Kumulativ mängd vatten som har samlats upp i lysimetrarna under 2,3 år.

Cell 1

Lysimeter 3 samlade upp den största mängden vatten. Generellt bedöms cell 1 ha en täthet som ger mindre perkolationsmängd än 20 mm/år efter det första året. Tätskiktets täthet ökade med tiden, figur 3-9.

Cell 2

Mängden vatten minskar med tiden och efter det första året var den mindre än 5 mm/år (5 liter/m² och år).

Cell 3

Mängden vatten per år var under 2 mm/år under hela perioden.

3.3 Utlakning

Förenklat styrs utlakningen från FSA-skiktet av mängden lösta ämnen i porvattnet och av hur snabbt porvattnet byts ut (pressas ut), dvs. materialets permeabilitet. Höga halter i porvattnet och en hög permeabilitet ger stor utlakning. Låg permeabilitet kan begränsa utlakningen trots höga halter i porvattnet.

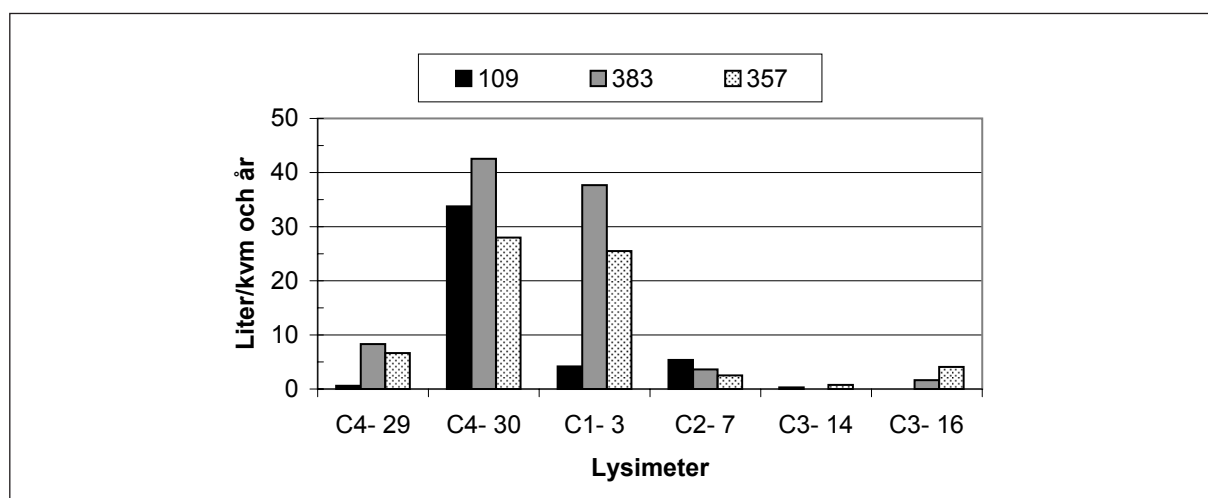
3.3.1 L/S-kvot

Mängden vatten som perkolerar igenom tätskiktet minskar med tiden, figur 3-10. Mängden vatten som perkolerar genom tätskiktet jämförs med FSA-skiktets torrsustans och uttrycks som L/S-kvot. L/S-kvoten räknas fram genom att den totala volymen vatten (L) som har perkolerat igenom tätskiktet mäts (uppsamlat lysimetervatten per tids- och ytenhet). Volymen vatten som har perkolerat igenom FSA-skiktet kontrollerades vid fyra mättillfällen, se tabell 3-2. Efter varje mätning bestämdes den kumulativa L/S-kvoten, dvs. hur stor volym vatten som har perkolerat igenom skiktet totalt. Detta värde relateras sedan till tätskiktets materialets torra vikt (S) per ytenhet som kom i kontakt med den uppmätta vatten-volymen. Figur 3-11 (nedan) visar den kumulativt uppnådda L/S-kvoten under de första 2,3 åren. Cell 4 och delar av Cell 1 var delområden med den sämsta blandningskvaliteten, Mácsik *et al.* (2006).

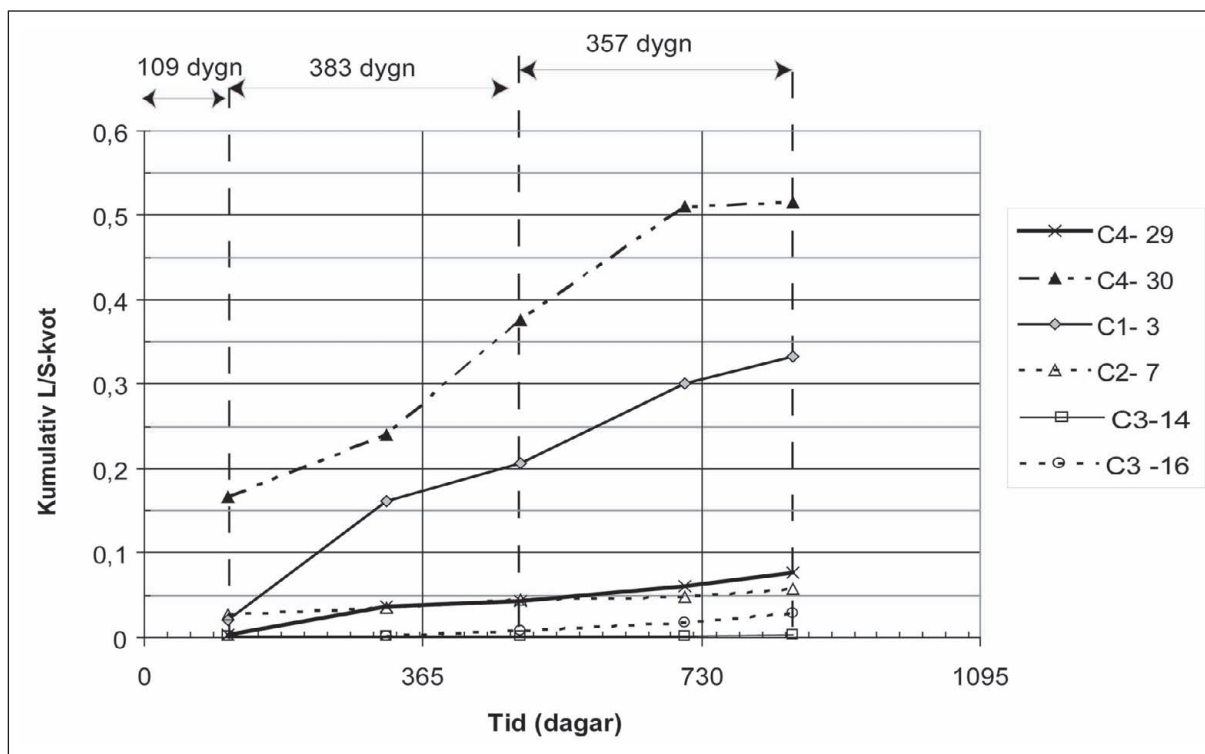
Vid beräkning av den kumulativa L/S-kvoten (Liquid/Solid-ratio) användes FSA-blandning bestående av 50 % flygaska och 50 % avloppsslam baserat på torrsvikt. FSA-materialets densitet antas vara 1300 kg/m³ och materialets vattenkvot 100 % (TS lika med 50 %). Tätskiktets genomsnittliga tjocklek efter kompression antas vara 0,3 m. Tätskiktets torrsvikt per m² deponiyta är:

$$S = 0,3 \text{ m} * 1300 \text{ kg/m}^3 * 0,5 \approx 200 \text{ kg}$$

Den ackumulerade mängden vatten under de första 2,3 åren i lysimeter 30 var 113 liter (L). Efter 2,3 år var därmed L/S-kvoten lika med 0,57, figur 3-11.



Figur 3-10. Utvecklingen av tätskiktets täthet under den undersökta perioden på 2,3 år.



Figur 3-11. Den kumulativa L/S-kvoten i FSA-skiktet efter 839 dagar (2,3 år).

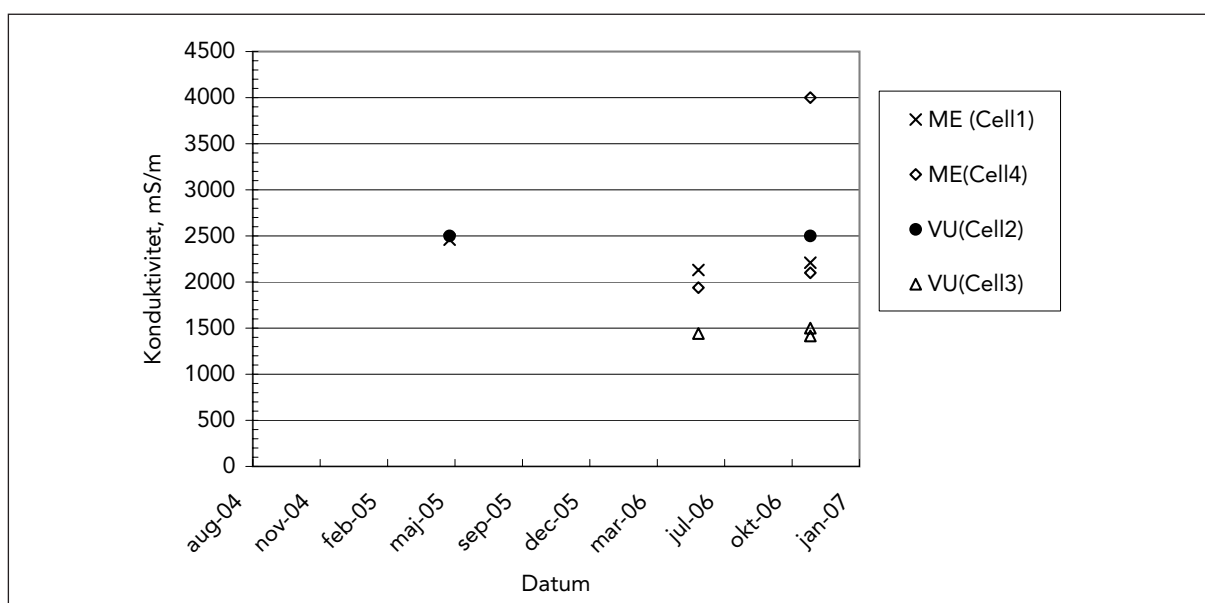
Att uppnå L/S 25, med en lägre perkolationshastighet på 50 liter/m² och år, skulle det ta ca 100 år.

Observera att de lysimetrar som redovisas begränsas till de lysimetrar som samlade in vatten under hela perioden. Noterbart är att tätheten ökade med tiden och att bättre blandningskvalité gav täthetsvärden på < 30 liter/m² och år, figur 3-10. Under det andra året var perkolationshastigheten < 10 liter/m² och år i 18 av 20 lysimetrar.

3.3.2 Halter i lysimetervatten

Flygaskorna som användes vid tillverkning av FSA hade hög elektrisk konduktivitet. FSA-materialets konduktivitet härstammar från flygaskan. Mälarenergis aska hade högre konduktivitet än Vattenfalls aska.

Konduktiviteten är ett mått på halten lösta joner hos det uppsamlade vattnet. Konduktiviteten förändrades inte under de första två åren. Figur 3-12



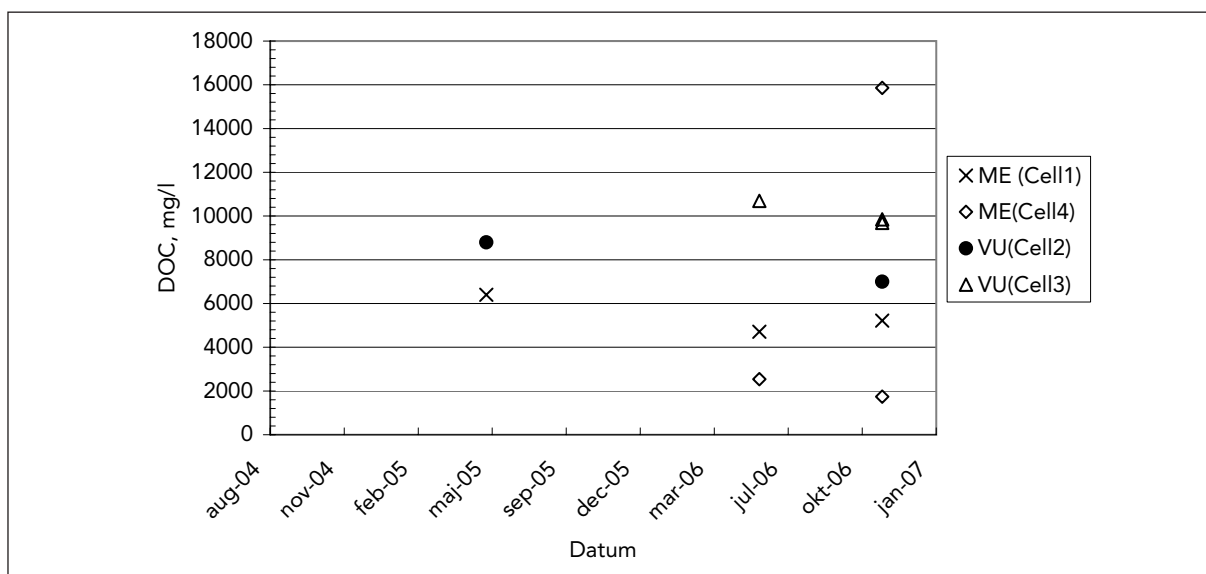
Figur 3-12. Vattnets konduktivitet i lysimetrar vid olika tidpunkter.

visar att konduktiviteten är i princip oförändrad mellan det första och sista provtagningstillfället. Viss variation förekommer mellan de olika cellerna (cell 1–4). Cellerna 1 och 4 samt i delar av cell 2 användes flygaska från Mälarenergi vid framställning av FSA. Inom dessa områden har lysimetervattnet högre konduktivitet. Inom cell 3 användes Vattenfalls flygaska i FSA-blandningen gav lägre konduktivitet i lysimetervattnet.

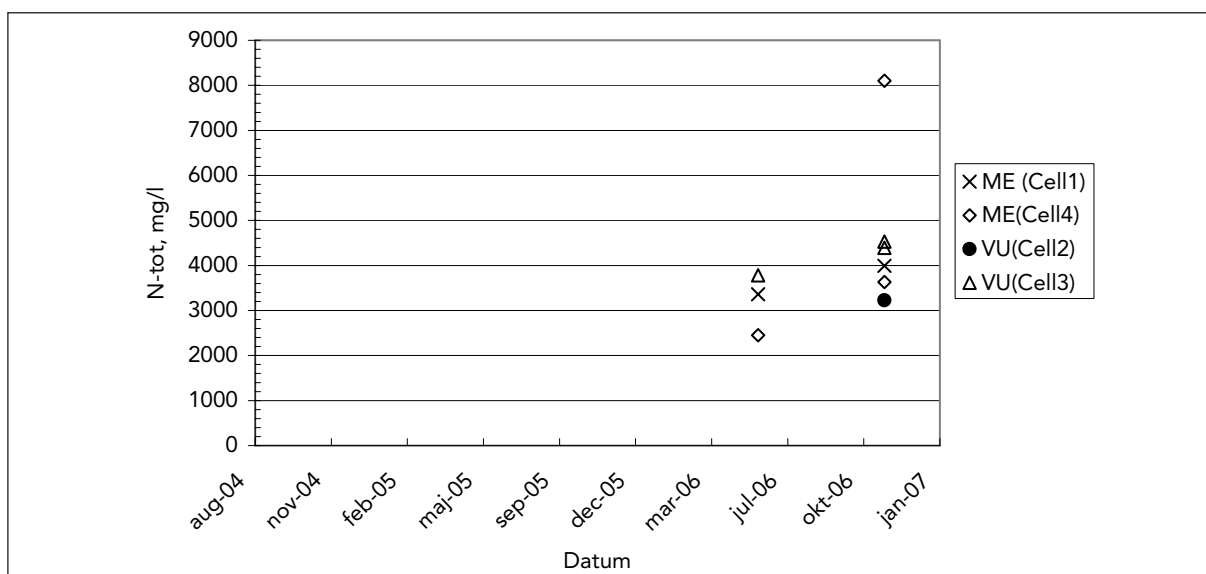
Uppmätta DOC värden i lysimetrarna visar att halten DOC som lakas ut ur FSA-skiktet minskar med tiden, figur 3-13. I cell 4 varierade utlakningen av DOC mellan 2 000–16 000 mg/liter vid det senaste provtagningstillfället. I cell 3 var haltvariationen marginell mellan olika lysimetrar och låg på ca 9 000

mg/liter. Uppmätta halter av totalt kväve (N-tot) visar att halterna ökar med tiden, figur 3-14.

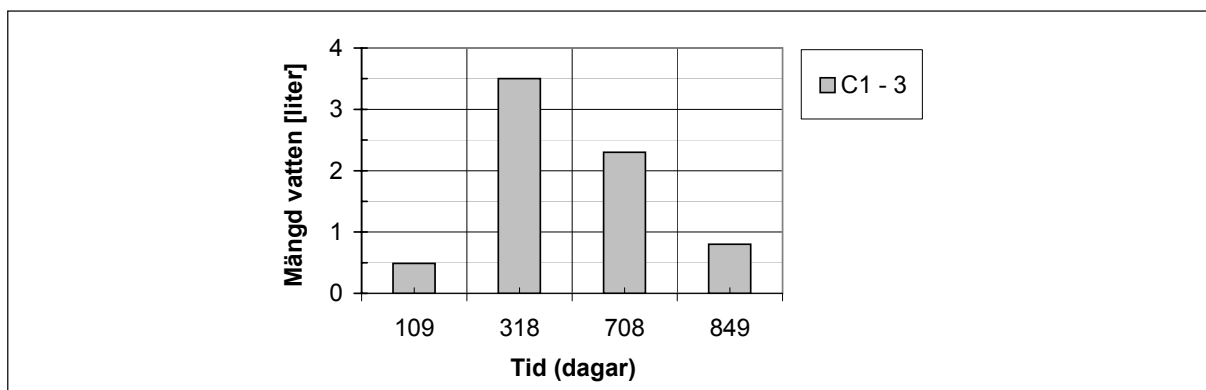
Den kumulativa mängden vatten i lysimeter 3 är < 70 liter/m² och år, vilket ger en kumulativ L/S kvot < 0,35. För lysimeter 3 redovisas nedan sambandet mellan mängd vatten och halterna av Ca, Na, K, Mg, Zn, Cu, Ni, DOC, N(tot) och S. Redovisningen görs enbart för lysimeter 3 (cell 1) och för fyra provtagningstillfällen där vattenproverna var analyserade. Data redovisas för vattenprover provtagna oktober 2004 (109 d), maj 2005 (318 d), maj 2006 (708 d) och november 2006 (849 d). Mängden vatten som samlades upp i lysimeter 3 vid dessa fyra mättillfällen redovisas i figur 3-15 (nedan). I figur 3-16 (nedan) redovisas mängden utlakad Ca, Na, K och Mg.



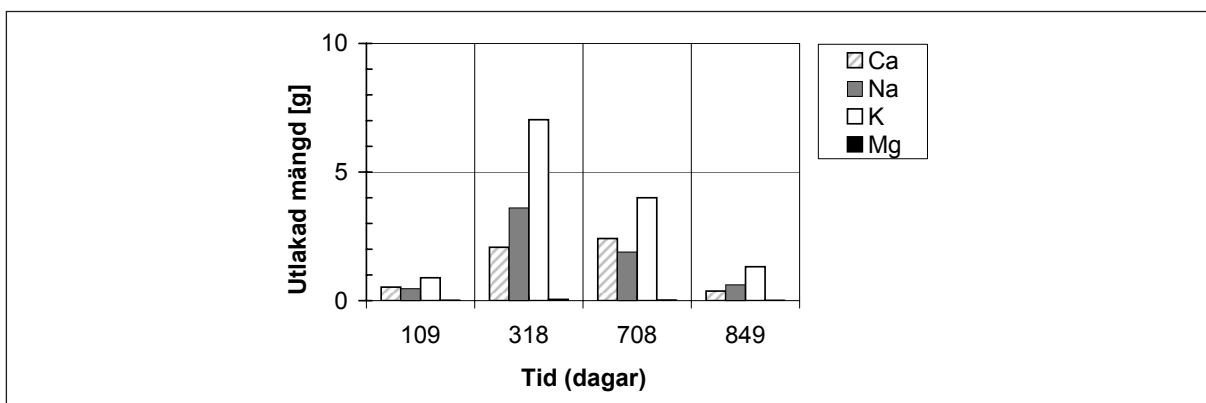
Figur 3-13. Vattnets DOC halt i lysimetrar vid olika tidpunkter.



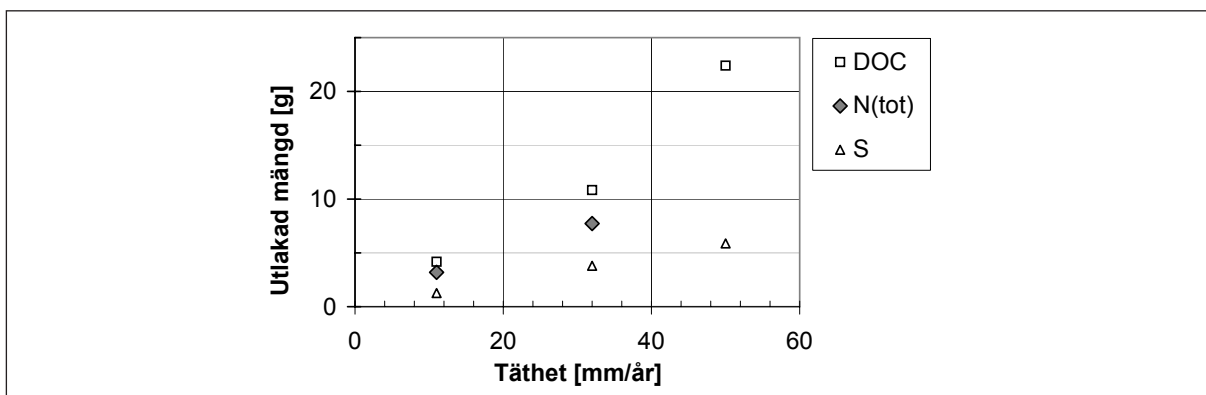
Figur 3-14. Vattnets halt av N(tot) i lysimetrar vid olika tidpunkter.



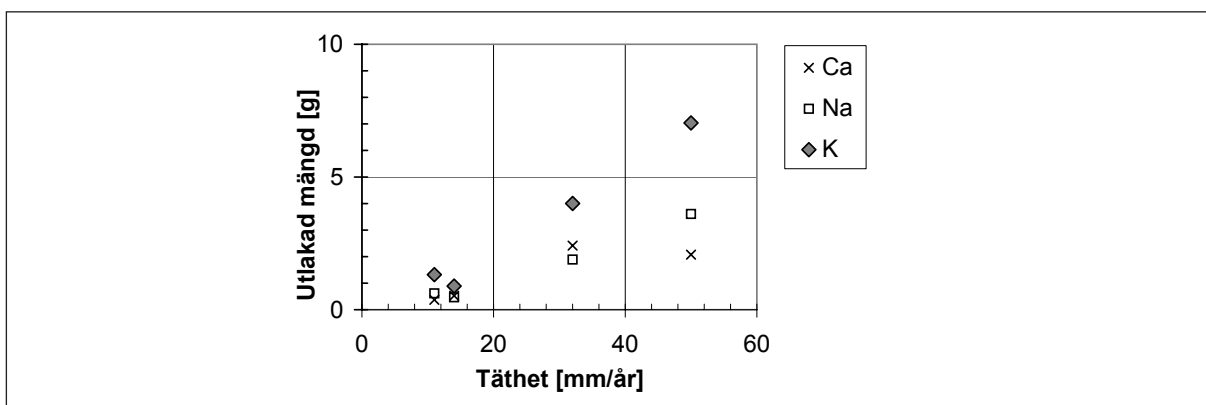
Figur 3-15. Mängd vatten uppsamlad i lysimeter 3 inom cell 1 vid olika tidpunkter under försökets gång.



Figur 3-16. Mängd utlakad Ca, Na, K och Mg vid olika tidpunkter under försökets gång.



Figur 3-17. Sambandet mellan FSA-skiktets täthet och utlakad mängd DOC, N(tot) och S.



Figur 3-18. Sambandet mellan FSA-skiktets täthet och utlakad mängd Ca, Na och K.

Av figurerna 3-15 och 3-16 framgår att utlakningsmängd är starkt relaterad till mängden vatten. Figurerna 3-17 och 3-18 visar att utlakningen av olika ämnen uppvisar ett nära linjärt samband med tätskiktets täthet. Ökad täthet begränsar utlakningen genom att mängden vatten som perkolerar genom materialet begränsas. Lysimetervattnets halter av resp. ämne påverkades inte under de första 2,3 åren. Mängden vatten som perkolerar igenom tätskiktet minskar under denna period och är < 10 liter/m² och år (mm/år) i 18 lysimetrar av 20.

3.4 Gassammansättning och beständighet

3.4.1 Allmänt

Syftet med undersökningen var att bedöma FSA-materialets beständighet med avseende på nedbrytbarhet. Applikationen som FSA-materialet används i bedöms bli anaerob. Under anaeroba förhållanden bildas bl.a. metangas vid nedbrytning av organiskt material. Genom att kontrollera förekomsten av metan i fält och bildning i metan laboriemiljö kan materialets beständighet studeras. Fältundersökningarna hade fokus på kvoten mellan metan och kvävgas och kontrollerades med hjälp av gaslysimetrar installerade i tätskiktet, se figur 3-19 (nedan). Hög kvot tyder på metanbildning, medan låg kvot på avsaknad av nedbrytning då kvävgas inte antas bildas. Vid laborieundersökningen studerades mängd metan som kan bildas i avloppsslam och olika FSA-blandningar, samt fördelningen av organiskt kol i fast fas, i löst fas och i gasfas.

3.4.2 Fältundersökning

Resultaten från två fältprovtagningar genomförda i juni och november 2006 redovisas i tabell 3-3. Koldioxidhalten i tät- och dräneringsskiktet var låga. 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, se bilaga B.

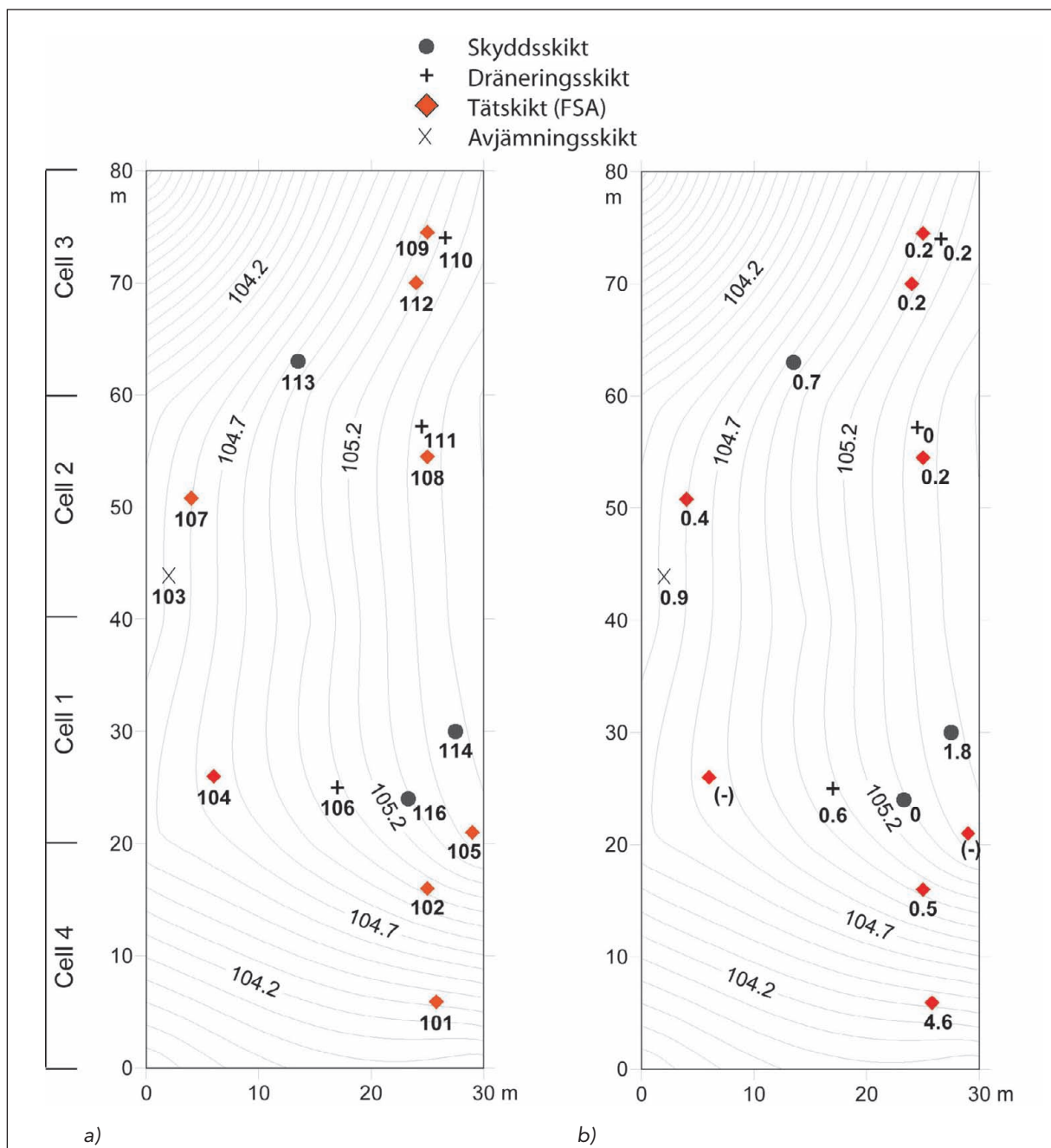
Det är svårt att dra några slutsatser utifrån halten metan som uppmättes i tätskiktet då samband mellan bildningstakt och halt saknas. Under förutsättningen att kvävgas inte bildas i tätskiktet indikerar kvoten CH₄/N₂ bildningstakten av metan. Ju högre kvot nitrithalten är låg i FSA-lakvattnet som har provtagits och att kväve finns som ammonium i tätskiktets reducerande miljö. Detta innebär att kvävgas inte bildas som en denitrifikationsprodukt och att innehållet av kvävgas i tätskiktet kan antas ha fångats upp i tätskiktet i samband med byggnationen.

Gasen vid provpunkterna 104 och 105 var luft. Antagandet är att luft trängde in i systemet.

En CH₄/N₂ – kvot högre än ett observerades i 2 provpunkter (101 och 114) och en förhöjd kvot (> 0,5) observerades vid provpunkterna 103, 106 och 113, tabell 3-3 och figur 3-19. Detta indikerar att metanbildningstakten verkar vara låg i tätskiktet om man bortser från provpunkt 101 som ligger i den delen av upplaget där tätskiktet har dålig kvalitet.

Tabell 3-3. Resultat från gasprovtagningen i fält i juni och november 2006. Gashalterna är uttryckta i vol-%.

Prov	CH ₄ /N ₂	CH ₄ /N ₂	Kommentar
	Jun.	Nov.	
101	3,7	4,6	Tät C ⁴
102	0,3	0,5	Tät C ⁴
104	0,0	0,0	Tät C ⁴
117		0,0	Skyddsskikt C ⁴
105	0,0	0,1	Tät C ¹
106	0,5	0,6	Drän C ¹
116	0,3	0,0	Skyddsskikt, i skiktet med hygeniserat avloppsslam C ¹
103	0,6	0,9	Avjämning C ²
107	0,3	0,4	Tät C ²
108	0,2	0,2	Tät C ²
111	0,3	0,0	Drän C ²
114	2,0	1,8	Skyddsskikt, i "bärsiktet" (BV:s schaktmassor) C ²
109	0,0	0,2	Tät C ³
110	0,1	0,2	Drän C ³
112	0,0	0,2	Tät C ³
113	0,2	0,7	Skyddsskikt, i "bärsiktet" (BV:s schaktmassor) C ³
115	0,0	0,0	Skyddsskikt, i skiktet med hygeniserat avloppsslam C ³



Figur 3-19 a) Gaslysimetrarnas placering och b) Kvoten mellan mängd metan och kvävgas (CH_4/N_2) i gaslysimetrar placerade i tätskiktets olika konstruktionsdelar november 2006.

3.4.3 Laboratorieundersökning

Resultaten från några utvalda nedbrytningsförsök redovisas i figurerna 3-20, 3-21 och 3-22 (nedan). I undersökningen ingick rötat avloppsslam, FSA40 (med tillsats av 40 % flygaska) och FSA60 (med tillsats av 60 % flygaska). Undersökningen inkluderade FSA med Mälarenergis respektive Vattenfalls flygaskor.

Med antagandet att det är slammets organiska innehåll som bryts ned och att askan inte bidrar

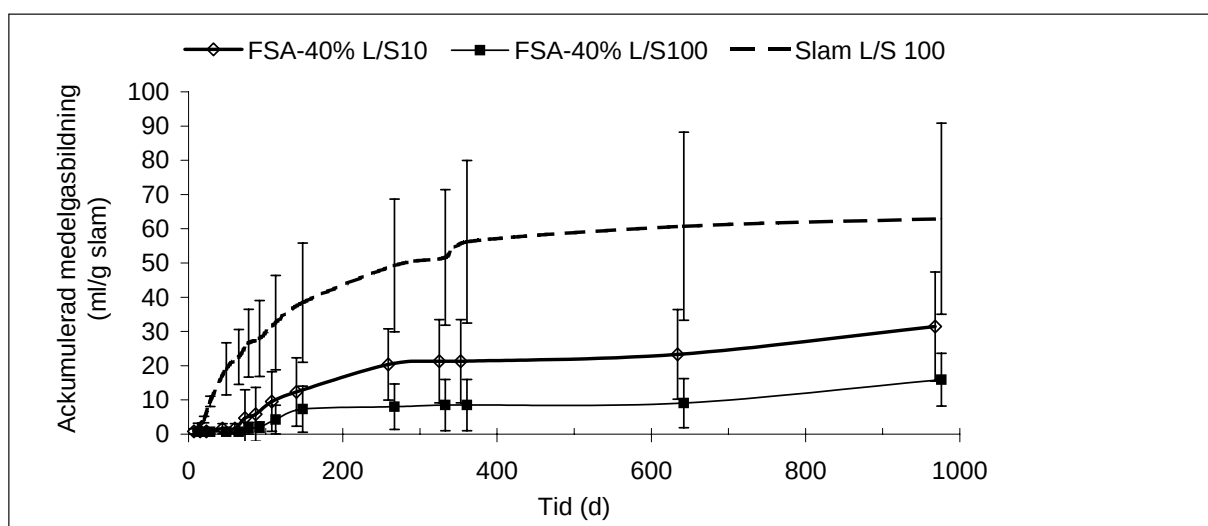
nämnvärt till den totala gasbildningen är det relevant att veta hur mycket gas som bildas per gram avloppsslam i FSA-materialet. För att kunna diskutera nedbrytningen av det organiska materialet omräknades därför gasproduktionen till ml gas per gram avloppsslam i de olika blandningarna. Den totala gasbildningen styrs av den slammängd som finns tillgängligt i FSA-materialet och den eventuella hämningen av nedbrytningen. Flygaskan hämmar nedbrytning genom högt pH och hög elektrisk konduktivitet.

Avloppsslammet lakades enbart vid L/S 100 då L/S 10 var omöjligt att genomföra då ingen fri vattenfas fanns för analys. FSA lakades med L/S kvot 10 respektive 100. Efter filtrering återställdes L/S kvot 10 i proverna och nedbrytningsförsöken genomfördes sedan vid L/S 10 efter ympning av bakteriekultur. Proverna förvarades och gasbildningen kontrollerades regelbundet under drygt 2,5 år (> 950 d). Resultaten visar att nedbrytning sker i de prover som innehåller 40 % flygaska oavsett typ av aska (FSA40). Resultaten från nedbrytningsförsöken efter lakning vid L/S 10 respektive 100 visas i figur 3-20. Jämfört med försöken genomförda med enbart slam, är gasbildningen från FSA40-blandningen något lägre per gram slam men i jämförbar storleksordning.

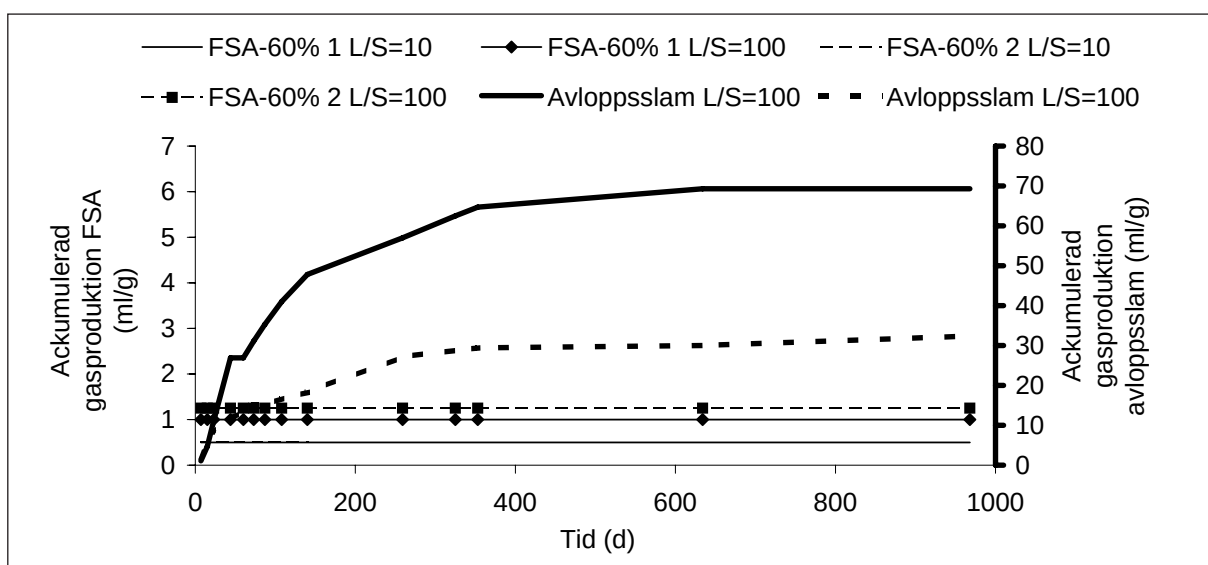
Kurvorna tenderar att uppnå en asymptotisk nivå med tiden, dvs. gasutvecklingen har mer eller mindre avstannat efter 950 dygn av experiment.

En fördröjning (ca 2 månader) av nedbrytningsstarten kunde observeras i FSA blandningar. Gasbildningen blev som högst 90 ml/g slam vilket motsvarar ca 12 % av den teoretiska gasmängden som skulle kunna bildas av nedbrytbart organiskt material (ca 750 ml/g).

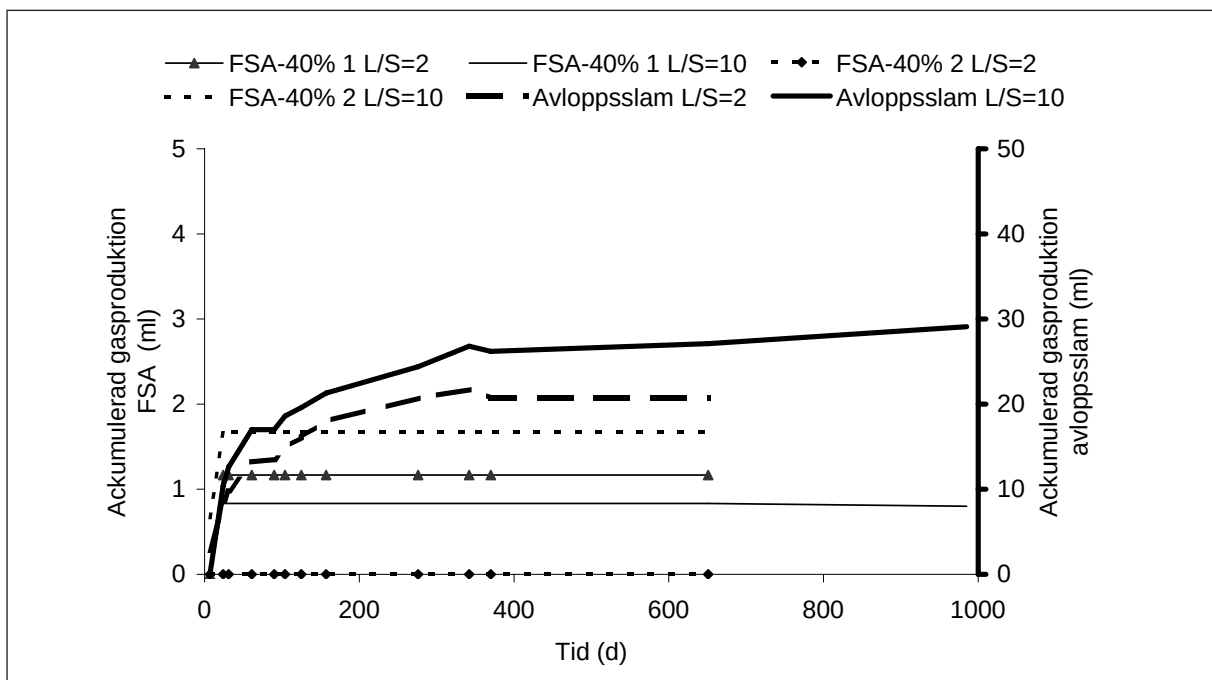
Gasbildningen som observerades från blandningar med 60 % flygaska (FSA60) är försumbar och beror huvudsakligen på tryckutjämnning, figur 3-21. Undersökningen visade ingen skillnad mellan lakning vid L/S 10 och 100 och mellan de två undersökta flygaskorna.



Figur 3-20. Gasproduktion vid anaerob nedbrytning av FSA 40 % 1 och 2 efter ett första lakningssteg vid L/S 10 och 100 samt det råa slammet (ml gas per gram slam i FSA).



Figur 3-21. Gasproduktion vid anaerob nedbrytning av FSA60 % efter lakningssteg vid L/S 10 och 100 samt det rötade avloppsslammet (ml gas per gram slam i FSA).



Figur 3-22. Gasproduktion vid anaerobnedbrytning av FSA40 (1-Mälarenergi Västerås) och 2 (Vattenfall Uppsala) vid L/S 2 och 10 samt det rötade avloppsslammet (ml gas per gram slam i FSA).

Resultaten från nedbrytningsförsöken vid L/S 2 och 10 utan att lakvattnet byts ut visas i figur 3-22. Oavsett L/S kvoten eller andel aska i blandningen visar resultaten att gasbildningen är försumbar och nedbrytningen hämmas.

3.4.4 Beständighet

Nedbrytning av FSA, dvs. nedbrytning av organiskt material som finns i slammet, kan leda till att organiskt material omvandlas till icke fasta föreningar dvs. till gasfas eller löst fas i porvatten. Gasbildning och utlakning kan i sin tur leda till ökad porositet hos FSA-materialet. Figur 3-23 visar andelen organiskt materialet som kan omvandlas till gasfas eller löst fas under försöket för tre undersökta uppställningar: rent slam, FSA40 och FSA60.

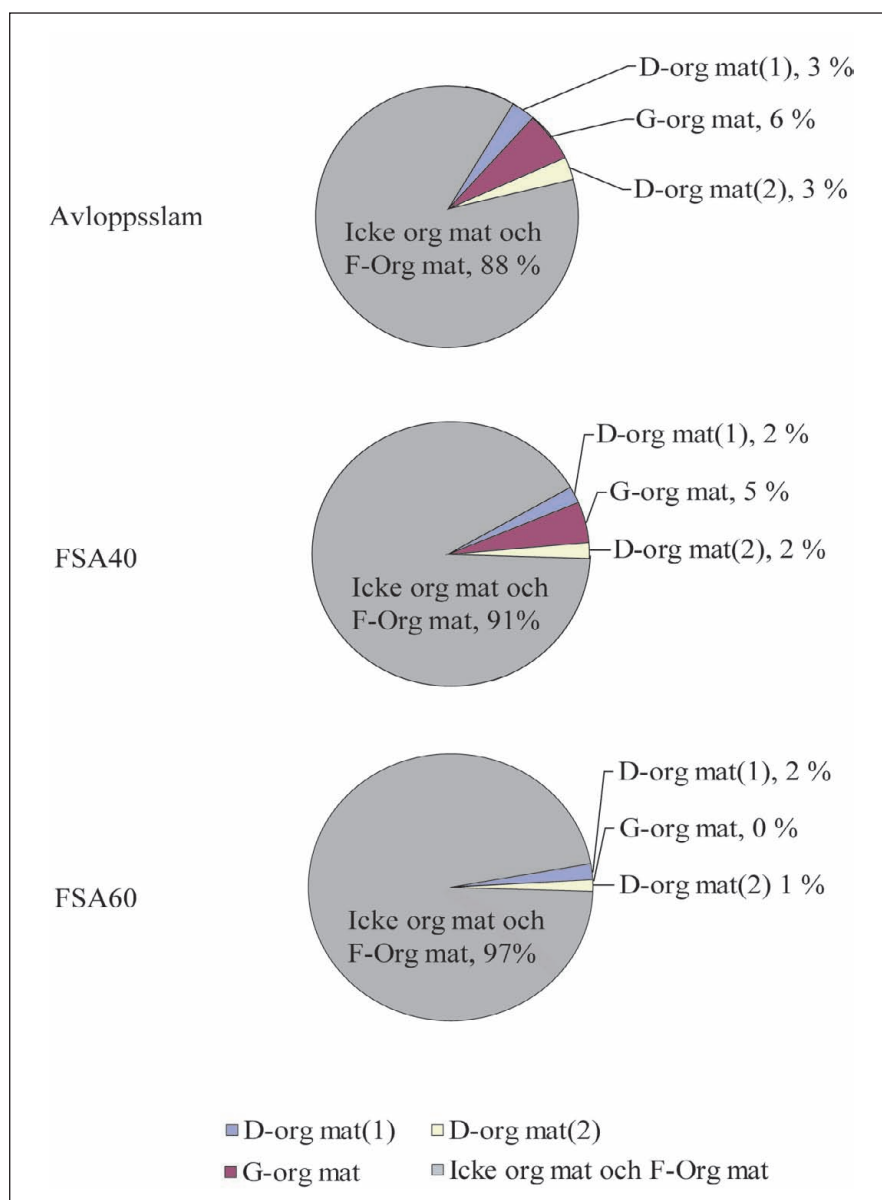
Observera att: Laboratorieproverna undersöktes vid anaeroba förhållanden vad gäller gasbildning efter lakning. Proverna lakades först vid med L/S 10 eller 100. Efter filtrering ympades provet med en bakteriekultur som motsvarade L/S 10. Under inkubations-tiden registrerades gasproduktionen. Förhållandena, först lakning och sedan initiering av biologisk nedbrytning, anses optimala för gasbildning och utlakning.

En massbalans över fördelningen av det organiska kolet gjordes under försöket. Under försöket bestämdes andelen organiskt material löst i lakvatten vid L/S 10 respektive 100 (D-organiskt material 1). Efter ympning undersöktes gasbildningen under ca 950 dagar, dvs. andelen organiskt material som bildade gas (G-organiskt material) bestämdes. Efter avslutat nedbrytningsförsök bestämdes lakvattnets innehåll av löst organiskt material (D-organiskt material 2).

Resultaten visade att den totala mängden löst organiskt material som lakades ut var densamma oavsett om lakningen skedde vid L/S 10 eller 100, dvs. den utlakade mängden organiskt material per gram slamequiväler påverkas inte av L/S-kvoten.

Det är gasbildning och utlakning som kan medföra ökad porositet hos FSA-materialet. Resultaten visade att enbart en liten andel av det organiska materialet kan omvandlas i gas- eller i löst form trots att försöken optimerades för att främja nedbrytning.

Noterbart är att tillsatsen av 40 % flygaska i kombination med ursköljning av salterna gynnade nedbrytningen jämfört med rötat avloppsslam. Detta kan ses i figur 3-23 då gasbildningen i ren slam var 6 % medan i det FSA40 var ca 5 %, vilket skulle motsvara ca 8 % av slamminnehållet. Inblandning av 60 % flygaska hindrade gasbildning och anaerob nedbrytning av organiskt material trots utlakning.



Figur 3-23. Omfördelning av det organiska materialet i FSA-materialet och avloppsslammet efter nedbrytningsförsöken. Antal replikat 3.

4. Diskussion

4.2 Uppföljning av mätta parametrar

4.1 Allmänt

Nedan diskuteras hur tätskiktets miljögeotekniska egenskaper har förändrats med tiden. Syftet är att genom att sammanställa resultat från deponierna i Dragmossen och Lilla Nyby kunna utvärdera materialets beständighet och hur ingående parametrar som kan påverka kvaliteten hos FSA-skiktet påverkar tätskiktets funktion och beständighet.

4.2.1 FSA skiktets kvalitet

Tillverkningen av FSA (flygkastabiliserat avloppsslam), som utfördes våren 2004, pågick i ca 5 dagar i effektiv tid. FSA består av en blandning av avloppsslam och flygaska. Avloppsslammet levererades från Stockholm Vatten Bromma. Två flygaskor nyttjades vid tillverkningen, en från Mälarenergi, Västerås (MV) och en från Vattenfall Uppsala (VU). Slammet

hade en genomsnittlig vattenkvot på ca 220 % (TS ca 31 %) medan flygaska från MV hade vattenkvot på ca 32 % (TS 76 %) och flygaska från VU hade en vattenkvot på ca 20 % (TS 83 %).

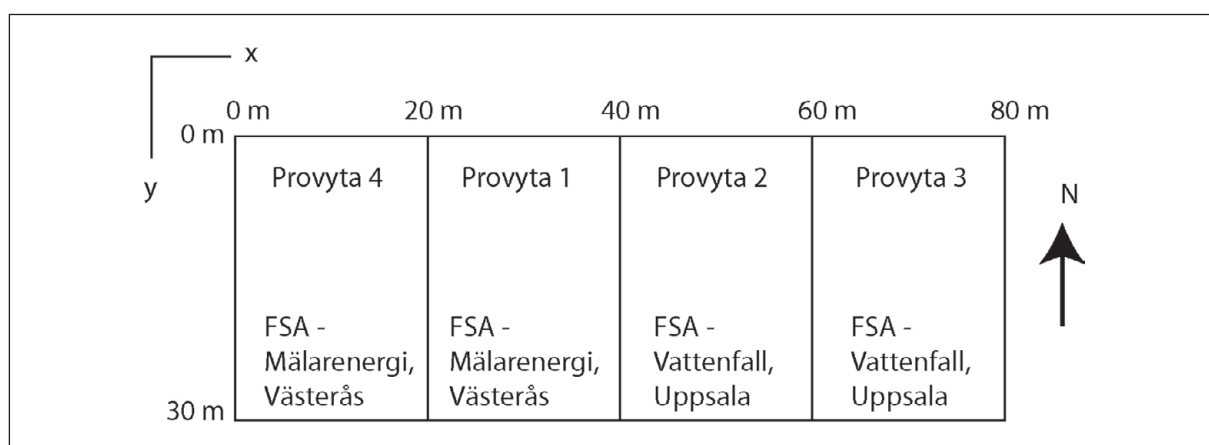
Halva deponiytan med cellerna 4 och 1 tillverkades med flygaska från MV och den andra halvan, cellerna 2 och 3 med flygaska från VU, figur 4-1. Cell 4 tillverkades först, följt av cell 1, 2 och slutligen cell 3. FSA med flygaska från MV (FSA-MV) hade en vattenkvot vid utläggning på ca 136 % (TS = 42 %). FSA med flygaska från VU (FSA-VU) hade lägre vattenkvot, ca 111 % (TS 47 %).

Generellt var homogeniteten och blandningskvaliteten sämst i cell 4 där arbetet startades.

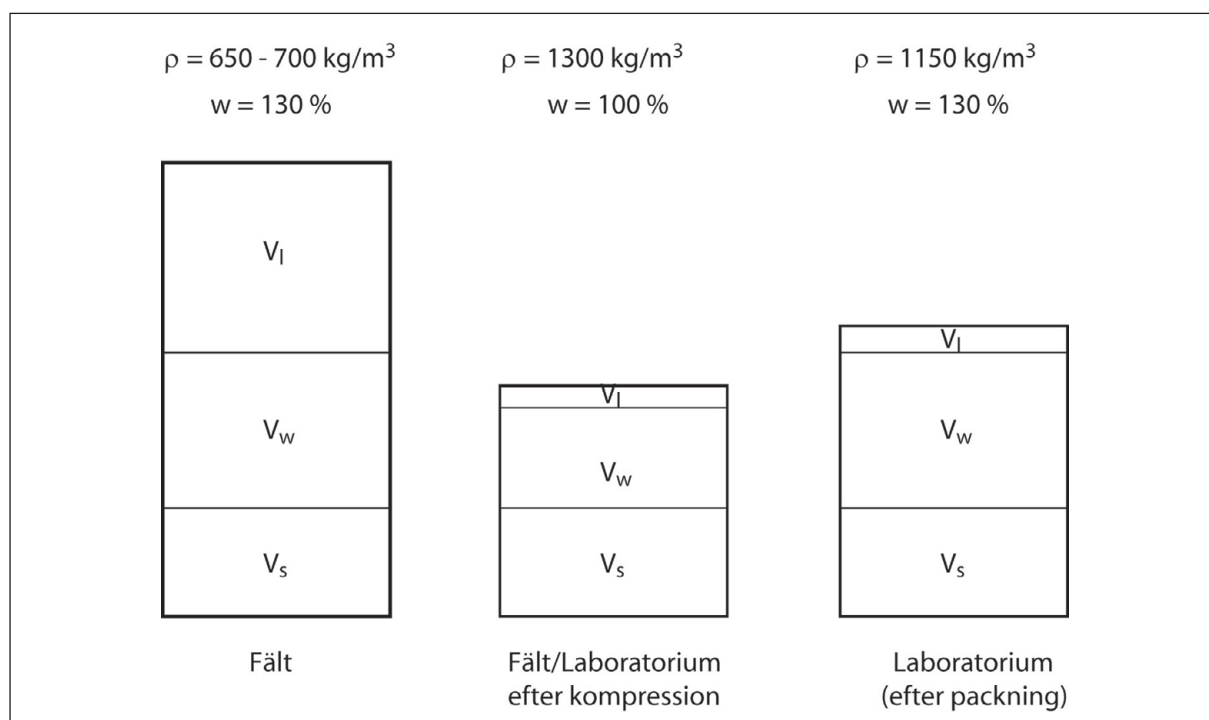
4.2.2 FSA-skiktets geotekniska egenskaper

Kompression av materialet kunde ske orsakad av den egna lasten och av den last som fördes på från dränerings- och skyddslagret. Kompressionen blir störst för material som har lägst skrymdensitet. Vid kompression pressas det ut luft och vatten från materialet, vilket leder till att materialet konsolideras. Genom kompressionen minskar tjockleken på FSA-skiktet med 20–55 %, figur 4-2.

På Dragmossen bedömdes FSA-materialets densitet i fält direkt efter utläggning. Skrymdensiteten var ca 650–700 kg/m³, se figur 4-1. Vid utläggning



Figur 4-1. Försöksytans koordinater och ingående material.



Figur 4-2. Schematisk beskrivning av kompression av fälttillverkat FSA skikt och laborietillverkade provkroppar.

jämnades FSA-skiktet med skopan. Skyddsskiktet som lastades på tätskiktet medförde kompression i materialet och att luft samt vatten pressades ut ur FSA-skiktet. Vattenkvoten sjönk därvid till ca 100 %. Skrymdensiteten drygt 2 år efter utläggning var ca 1300 kg/m³. Skiktet komprimerades drygt 50 %.

Som jämförelse kan nämnas att laboratorietillverkade prover som packades i skikt hade skrymdensitet runt 1150 kg/m³ och vattenkvot ca 130 %, figur 4-2. Kompressionen av laboratorietillverkade provkroppar låg på 10–20 %. Skrymdensitet på FSA-material tillverkat i laboratorium låg på ca 1250–1350 kg/m³.

Vid utläggning av FSA-material bör därför hänsyn tas till att kompressionen av materialet kan variera beroende på packning, dvs. beroende på materialets ursprungliga skrymdensitet. Medan kompressionen hos laboratorietillverkade prover ligger runt 10–20 %, kan kompressionen i fält uppgå till 20–50 %.

Skiktjtjockleken är en viktig faktor eftersom tunna skikt kan lättare skadas. Tjockare skikt innehåller mer flygaska per ytenhet (pH-buffert) och mer organiskt material (buffert mot nedbrytning och utlakning). Variation i densitet vid utläggning bör också minimeras. Kontroll av densitet och vattenkvot hos FSA-skiktet är viktig vid kvalitetskontroll.

Vid kompression pressas det bl.a. vatten ur FSA-materialet. Kompressionen bedöms ske under de första månaderna efter utläggning av dränerings- och skyddsskiktet. Lysimetrarna som installerades under tätskiktet visade att mängden vatten som pressades ut/perkolerade igenom materialet minskade med tiden.

Observera att mätning av densitet i fält kan bli felvisande om densiteten hos materialet överskattas orsakad av att ytskiktet packas med skopan mer än underliggande FSA-skikt. En överskattning av densiteten leder till att kompressionen kan underskattas.

4.2.3 Tätskiktets beständighet

Tätskiktets beständighet styrs av biologisk nedbrytning av organiskt material och utlakning av organiskt material som ingår i FSA. Utförda laboratorieundersökningar indikerar att nedbrytningen av organiskt material begränsas av ett högt pH och hög konduktivitet. Vid laboratorieundersökningarna har FSA40 och FSA60 undersökts. Undersökningen visar att

högt innehåll av flygaska höjer blandningens elektriska konduktivitet och att hög konduktivitet höjer porvattnets DOC-innehåll.

Laboratorieundersökningen visar att om FSA-material med 40 % flygaska (FSA40) sköljs ur på salter kan nedbrytning och gasbildning initieras. Motsvarande material med 60 % flygaska (FSA60) uppvisade ingen tendens till nedbrytning efter ursköljning.

I cellerna 2 och 3 var mängden vatten som har perkolerat igenom FSA-skiktet liten. Efter 2,3 år var mängden < 12 liter/m² deponiyta. FSA-materialet som denna volym var i kontakt med under väger ca 200 kg (TS). Detta motsvarar en kumulativa L/S kvot som är mindre än 0,06 efter 2,3 år. Att uppnå L/S 10 med denna takt tar det ca 400 år. Cellerna 4 och 1 var den kumulativa L/S kvoten ca 0,5 efter 2,3 år i enstaka punkter. Mätningarna indikerar dock att den kumulativa ökningen av L/S kvoten avtog med tiden, dvs att tätskiktets täthet ökade.

Försöket visar att andelen kol som finns kvar i fastform efter försöket dominerar. I de fall gasbildning har skett har en andel av kolet omvandlats till gas. Noterbart är att tillsatsen av 40 % flygaska FSA(40) tillsammans i kombination med utsköljning av saltarna gynnar nedbrytningen jämfört med rent slam.

Nedbrytning av FSA innebär att några procent av det organiska materialet som finns i FSA bryts ned och kan omvandlas till icke fasta föreningar dvs. gas eller löst i porvatten.

FSA-materialet är svårnedbrytbart tack vare inblandningen av flygaska med högt pH och hög elektrisk konduktivitet (hög salthalt). Förekomsten av flygaska minskar den biologiska aktiviteten i materialet jämfört med enbart slam. En halt på 40 % flygaska fördröjer nedbrytning medan en 60 % flygaska hämmar gasbildningen helt. Om utlakningen av saltarna hindras hämmas gasbildningen helt även vid en askhalt på 40 %.

Fältförsöket som utfördes under drygt två år visade att metanbildning förekommer i FSA men att gasproduktionstakten är låg. Kvoten mellan metan och kväve är mycket låg vilket indikerar att mängden metan som har bildats är i samma storleksordning med mängden kväve som har fångats i samband med anläggningen av FSA-skiktet, dvs låg.

Undersökningen av FSA-materialet efter 2,5 års nedbrytning i laboriemiljö, med optimala förhållanden för att premiera nedbrytning, visar att en stor andel av det organiska kolet är kvar i fastform.

Tillsatsen av flygaska ökar lösligheten av kol (DOC) men att effekten är begränsad till några enstaka vikt %.

I figur 4-3 redovisas pH och elektrisk konduktivitet hos vatten med olika L/S kvot från laboratorie- och fältförsök. Laboratorieundersökningen startades vid en L/S-kvot lika med 25 och avslutades vid L/S 1000, figur 4-3. Fältundersökningar visar de kumulativa L/S kvoten under de första 2,3 åren. L/S kvoten är:

- < 0,06 för cell 2 och 3,
- < 0,55 för cell 1, se figur 4-3
- < 0,35 för cell 4, se figur 4-3.

Det bör noteras att den höga L/S kvoten för cell 1 och 4 bedöms ha orsakats av kompression och utpressning av porvatten, som i sin tur orsakades av hög vattenkvot och låg skrymdensitet i FSA materialet.

Bedömningen, baserad på mätning av permeabilitet i fält, är att det tar ca 100 år att uppnå L/S-kvot 25, även om tätskiktet släpper igenom 50 liter vatten per år, 50 mm/år, se figur 4-4 (nedan).

Vid vattenmängd på 25 liter/m² och år tar det mer än 200 år att uppnå samma L/S som laboratorie-försöket startar ifrån, dvs L/S 25, figur 4-4 (mitt-diagram).

Efter det första året ökade tätheten hos FSA-materialet och vattenmängden begränsades till 5–25 mm/år. Större delen av deponiytan bedöms ha en täthet som < 5 liter/m² och år. Därmed skulle det ta mer än tusen år att sänka konduktiviteten till samma nivå som laborieförsöket startar ifrån, dvs. L/S

lika med 25.

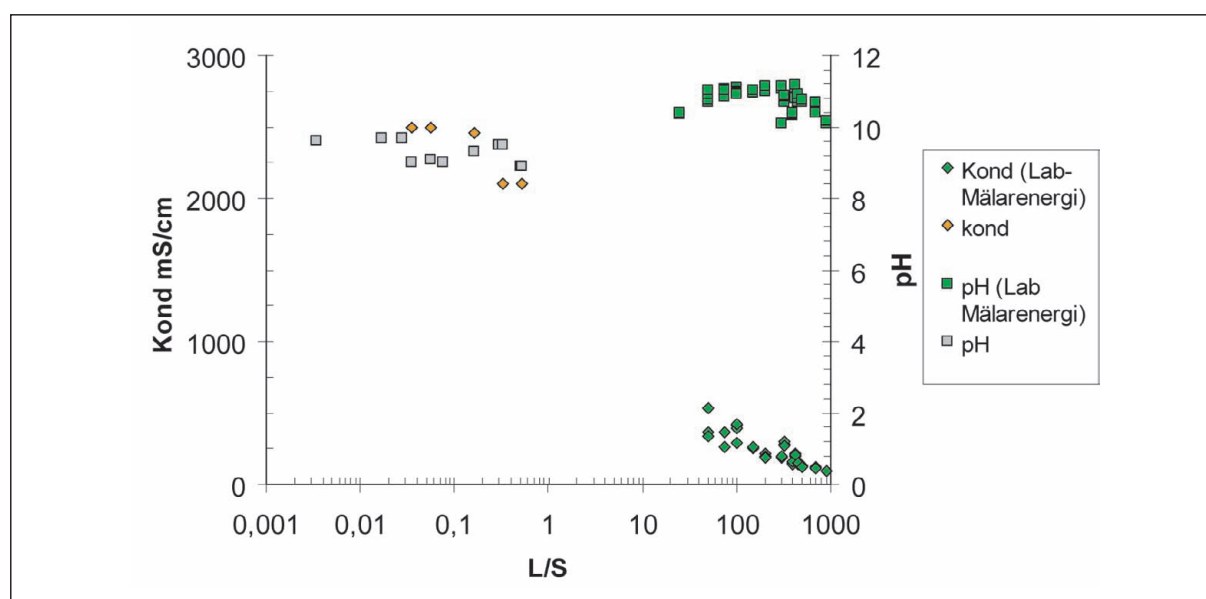
Motsvarande resultat vad gäller beständighet erhöles med flygaska från Vattenfall Uppsala (VU). VU har lägre konduktivitet än ME, vilket kan förklaras med att Vattenfalls flygaska har lägre halter av bl.a. Ca, K och Na än flygaskan från Mälarenergi.

Den omvandling som sker de första månaderna efter att FSA-skiktet installeras kompenseras dessutom av de sättningar som sker i tätskiktet och som täpper igen de porer som bildas under denna period. Efter drygt 2 år är den genomsnittlig L/S kvot i fält lägre än 0,2. Temperaturen i tätskiktet är ca 20 °C och är jämförbar med temperaturen under laboratorieförsöken.

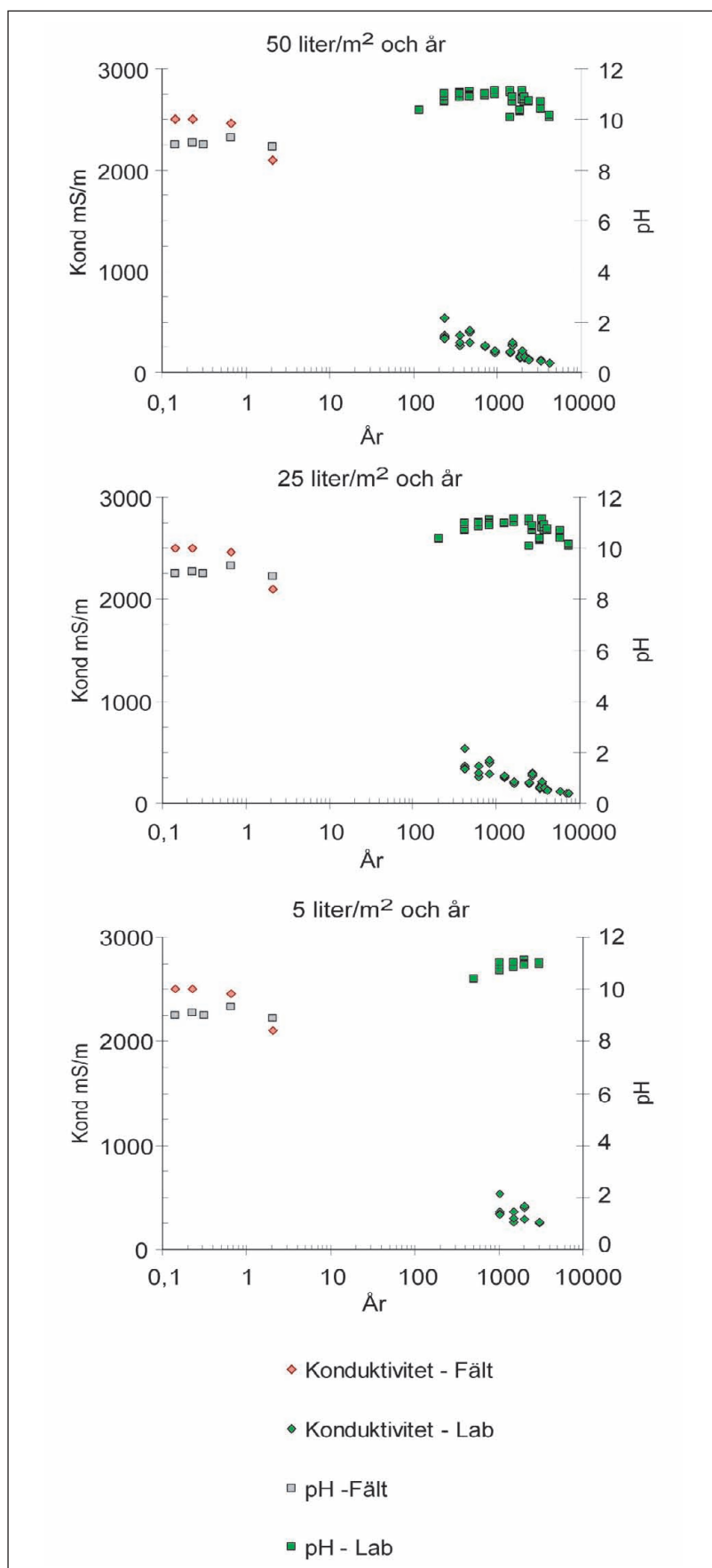
4.2.4 Kvalitetens påverkan på täthet

Sluttäckningens syfte är att begränsa lakvattenbildningen i avfallet. Funktionskravet på en deponi innehållande *icke-farligt avfall* är att mängden vatten som perkolerar igenom tätskiktet begränsas till < 50 mm/år (50 liter/m² och år). Tätheten hos FSA-materialet i tätskiktet är beroende av blandningskvaliteten. Undersökningen visar att tätheten ökar med tiden, dvs. mängden vatten som perkolerar igenom tätskiktet minskar med tiden.

I Cell 4 med den sämsta kvalitén varierade mängden vatten som perkolerade igenom tätskiktet. Omräknad till årsperkolation efter de första 109



Figur 4-3. Sammanställning av pH och konduktivitetvärden i laboratorie- och fältmätningar. Värdena är framtagna för FSA med Mälarenergis flygaska.



Figur 4-4. Uppskattning av tiden för att uppnå L/S-kvot som motsvarar laboratorieförsöket vid vattengenomsläpplighet som motsvarar 50, 25 respektive 5 liter/m² år.

dagarna, varierade värdena uppmätta i olika lysimetrar mellan några enstaka liter m^2 och år och > 100 liter/ m^2 och år. Efter drygt två år (2 år 109 dygn) var det högsta värdet på tätskiktets täthet lägre än 30 liter/ m^2 och år.

FSA-material som användes i Cellerna 1, 2 och 3 hade bättre kvalitet än det material som nyttjades i Cell 4. I cell 1 varierade mängden perkolerat vatten mellan några liter och ca 26 liter. Cellerna 2 och 3 var perkolationen < 10 liter/ m^2 och år under hela mätperioden och i samtliga lysimetrar.

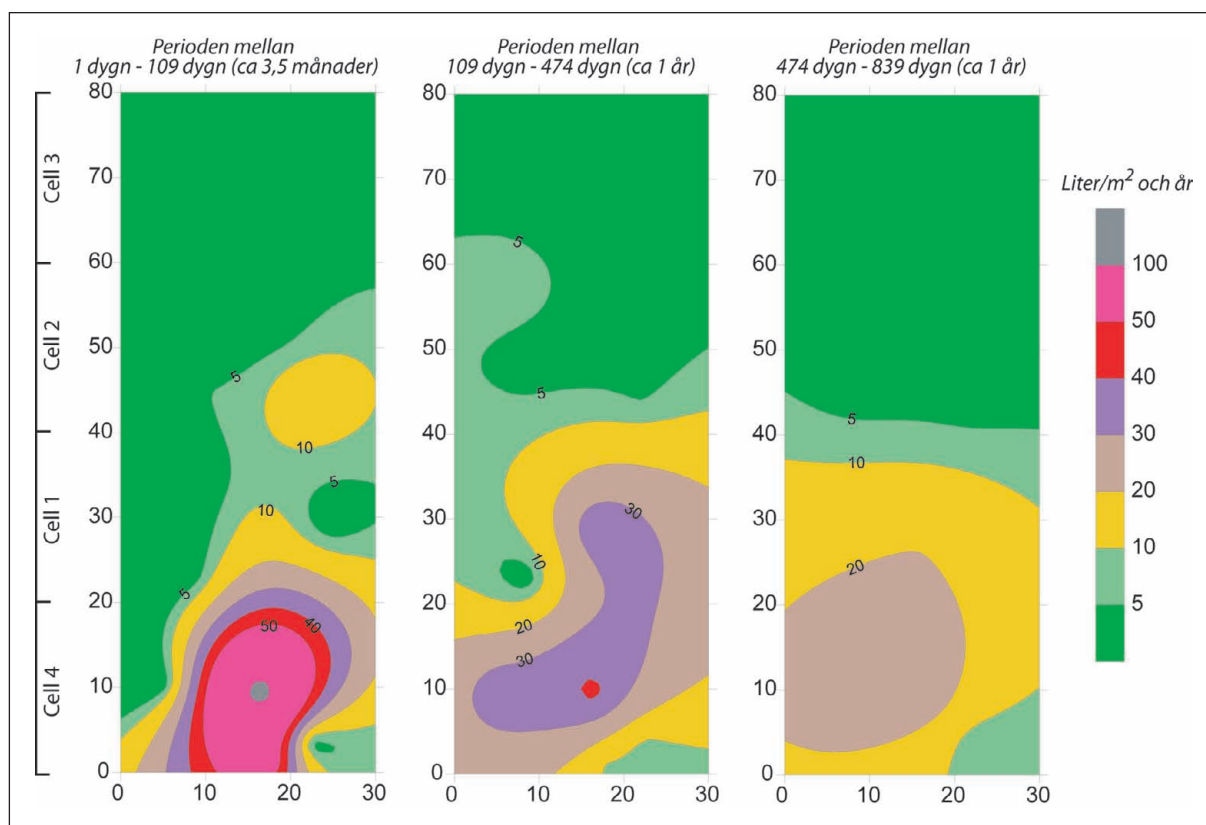
Figur 4-5 beskriver den bedömda mängden vatten som perkolerade igenom tätskiktet under de första 2,3 åren, uppdelad i tre perioder.

1. Den första perioden är på 109 dagar. Under denna period bedöms att en stor del av den kompressionen av FSA-skiktet skedde. Det går inte att utesluta att kompressionen av materialet fortsatte även efter 109 dygn, men den avtog med tiden. Kompressionen medförde att porvatten pressades ut ur FSA-materialet.
2. Period två motsvarade ca 1 år (tiden mellan 109 dygn och 474 dygn).
3. Även den tredje perioden var på ca 1 år (tiden mellan 474 och 839 dygn).

5. Slutsatser

Undersökningen visar att FSA är ett svårnedbrytbart material. Under förhållanden med långsam utlakning bedöms FSA materialet vara beständigt och materialet bedöms kunna nyttjas som tätskiktmaterial. På materialnivå är det flygaskans andel och kvalitet samt FSA-materialets vattenkvot (TS) som är styrande för att uppnå *tätt* förhållande. Flygaskans och avloppsslammets vattenkvot (TS), flygaskans pH och konduktivitet och blandningens homogenitet är därmed indirekt styrande faktorer som påverkar FSA-materialets täthet och beständighet. FSA-materialets höga konduktivitet sänks genom ursköljning av lösta joner, dvs. porvattnets konduktivitet minskar med stigande L/S kvot. Denna effekt kan minskas genom höjning av andelen flygaska i FSA. Vid en täthet som motsvarar en perkolation på 5–10 liter vatten per kvadratmeter deponiyta och år (liter/ m^2 och år eller mm/år) tar det hundratals år att uppnå L/S kvot 10. Nedbrytning vid L/S kvot < 10 är samtidigt minimal enligt laboratorieförsöken.

Inhomogen FSA-blandning, dålig kontroll på flygaskans och avloppsslammets egenskaper, varierande



Figur 4-5. Tätskiktets täthet uttryckt i liter/ m^2 och år (mm/år) efter 109, 474 och 839 dagar (2 år och 109 dagar).

densitet hos utlagt FSA-material vid utläggning, uttorkning av tätskiktet, osv. kan dock leda till att tätskiktet inte klarar kravet på 50 mm/år. Försämrade permeabilitet medför också att FSA-skiktets beständighet äventyras av nedbrytning av organiskt material som finns i FSA-materialet.

Uppföljningen av Dragmossens deponi visar att kompression kan höja FSA-materialets täthet även när blandningshomogeniteten är dålig, som i fallet med cell 4. Kompressionen är därmed en viktig mekanism. Kompressionen medför att den utlagda tjockleken kan minska med upp till 50 %. Kompressionen är en viktig faktor som bör beaktas för att undvika differentialsättningar i FSA-skiktet. Ojämn yta kan leda till vattenansamling i dräneringsskiktet och därmed höjd L/S kvot.

Laboratorieundersökning på nedbrytning av FSA visar att 40 % tillsats av flygaska och ursköljning av salter (sänkning av porvattnets elektriska konduktivitet) kan initiera nedbrytning av organiskt material. Vid 60 % tillsats av flygaska kunde ingen nedbrytning registreras trots ursköljning. För att minska risken för nedbrytning bör FSA-material med lägre andel än 40 % flygaska inte användas i tätskikt.

FSA är ett tätskiktsmaterial som kan nyttjas vid sluttäckning av deponier med icke – farligt avfall. Ingående material, flygaska och avloppsslam, ska karakteriseras med avseende på pH, elektrisk konduktivitet, vattenkvot (TS) etc. FSA materialets densitet, täthet, kompressionsegenskaper är viktiga parametrar som påverkar FSA-skiktets täthet och livslängd (beständighet). Kontroll av utläggning, av blandningskvalitet, vattenkvot (TS), lagring, utläggning etc. ger FSA med god täthet och därmed god beständighet. Genom en kontrollerad styrning av FSA-materialets tekniska egenskaper kan täthetsfunktionen och beständigheten säkras i tätskiktsapplikationer.

6. Rekommendationer

Sluttäckning av deponier är en stor och viktig investering för samhället. Funktionskraven som ställs idag på deponitäckning är högt ställda. För att uppnå

och kunna bibehålla denna funktion under långa perioder, hundratal år, ställs det stora krav på tätskiktet och sluttäckningskonstruktionen. Flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) har utvecklats med målsättning att uppfylla funktionskraven som tätskiktsmaterial.

Flygaskastabiliserat avloppsslam behåller slammets goda täthetsegenskaper samtidigt som flygaskan ger blandningen förbättrade bärighetsegenskaper och förhöjt pH och elektrisk konduktivitet, vilket hämmar nedbrytningen av organiskt material som finns i slammet.

De svenska miljömålen ambition är att senast år 2015 skall minst 60 % av fosforföreningarna i avlopp återföras till produktiv mark, varav minst hälften bör återföras till åkermark. I avvaktan på att aktörer från VA-verk, myndigheter och livsmedelsföretagen kommer överens om villkoren för slam-användning i jordbruk behövs alternativ för avsättning av slammet. Sluttäckning av deponier är ett avsättningsalternativ under denna period.

Deponiytorerna som är täckta med FSA är i dagsläget bara några år gamla. För framtida användning av FSA i tätskikt är det viktigt att nedbrytning och permeabilitetsutveckling följs upp och utreds, men erfarenheter från flera olika platser och från laboratorieförsök bedöms ge gott tolkningsunderlag för att kunna göra en bedömning av FSA-materialets funktion, långtidsbeständighet och permeabilitet.

Dåligt utförd blandning eller blandning av slam och aska som är olämpliga kan bidra till att slammets innehåll av nedbrytbart material bryts ner vilket kan påverka tätheten på lång sikt. Resultat från fältmätningar indikerar dock att materialets täthet ökar med tiden. En tätare konstruktion gör att utlakningen bromsas upp. Andelen organiskt material som kan brytas ner eller lakas ut begränsas till några procent av FSA-materialet. Nedbrytning av detta organiska material styrs av att salter som hämmar nedbrytning sköljs ur materialet. God kontroll av avloppsslammets, flygaskans och blandningens kvalitet samt att det utlagda FSA materialet komprimeras och skyddas mot uttorkning ger en låg årlig perkolation av vatten. Fältundersökningar indikerar vidare att bildning av metan som är ett tecken på nedbrytning är låg.

Undersökningen visar att en sluttäckningskonstruktion med FSA i tätskiktet klarar funktionskraven som ställs på deponier med *icke-farligt avfall*. Undersökningen visar också att täthet ökar med

tiden, vilket ger god prognos för att konstruktionen med FSA är en långsiktig lösning. Krav på kvalitets-säkring och repeterbarhet på FSA-materialet är viktig. För att underlätta att FSA med rätt kvalitet

tillverkas och läggs, ut pågår arbete med en *vägled-ning* som omfattar laboratorieundersökning, projekt-ering, entreprenad och kvalitetskontroll.

Referenser

Mácsik J., Svedberg B., Kärrman E. & Mossakowska A. 2006: *Hydraulic liner for landfill cover – an alternative use of sewage sludge*. IWA World Water Congress Beijing, China 10–14 September 2006. 171–172.

Carling M., Ländell M., Håkansson K. & Myrhede E. 2006: *Täckning av deponier med aska och slam – erfarenheter från tre fältförsök*. VA-Forsk rapport 2006-08.

Mácsik J., Maurice C., Mossakowska A. & Eklund C. 2006: *Pilotförsök med flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) som tätskikt*. Värmeforsk rapport 942/VA-Forsk, rapportNr 2006-01.

Mácsik J., Svedberg B., Lenströmer S. & Nilsson T. 2004: FACE. *Flygaska i geotekniska tillämpningar. Etapp 1: Inventering/tillämpbarhet*. Värmeforsk rapport 870.

Mácsik J., Rogbeck Y., Svedberg B., Uhlander O. & Mossakowska A. 2003: *Linermaterial med aska och rötslam – Underlag för genomförande av pilotförsök med stabiliserat avloppsslam som tätskiktsmaterial*. Värmeforsk rapport 837.

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

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

Bilaga A: Vattenlysimeter – uppmätta halter och täthet

FSA med flygaska från Mälarenergi mätningar är utförda i cell 1.

ELEMENT Filtrerad	Enhet	okt-04	maj-05	maj-06	nov-06
		L 3 JA	L 3 Nej	L 3 Nej	L 3 Nej
Ca	mg/l	1070	593	1050	464
Fe	mg/l	0,273	0,207	0,23	0,138
K	mg/l	1820	2010	1740	1650
Mg	mg/l	12,5	13,3	6,21	4,65
Na	mg/l	953	1030	821	770
S	mg/l	1560	1680	1650	1580
Si	mg/l	8,62	–	–	–
Al	µg/l	<100	44,5	29,5	52,5
As	µg/l	177	112	<60	71,2
B	µg/l	785	–	–	–
Ba	µg/l	192	63,7	101	34,3
Cd	µg/l	<20	1,17	<0,3	<0,6
Co	µg/l	39,1	33,2	35,2	38,6
Cr	µg/l	<20	0,694	0,635	1,54
Cu	µg/l	258	51,4	34,6	43,3
Li	µg/l	71,4	–	–	–
Hg	µg/l	–	<0,02	<0,02	<0,04
Mn	µg/l	44	12,8	38,6	7,43
Mo	µg/l	1920	–	–	–
Ni	µg/l	225	204	202	242
P	µg/l	9500		4670	5390
Pb	µg/l	<100	4,71	7,45	2,82
Sr	µg/l	3060	–	–	–
V	µg/l	<10	–	–	–
Zn	µg/l	62,7	55,2	28,2	47,2
N-tot	mg/l	–	–	3360	3990
NH ₄ -N	mg/l	–	–	–	3530
Sum NO ₂ -N + NO ₃ -N	mg/l	–	–	–	<6,0
Cl	mg/l	–	–	868	1330
DOC	mg/l	–	6400	4710	5220
pH		–	9,3	9,4	9,3
Kond.	mS/m	–	2460	2130	2210
Liter prov	liter	0,49	3,5	2,3	0,8
Dagar	dygn	109	212	216	141
Täthet, liter/kvm, år	mm/år	14	50	32	11

– ej analyserat.

FSA med flygaska från Mälarenergi mätningar är utförda i cell 4.

ELEMENT Filtrerad	Enhet	maj-06	nov-06	nov-06
		30 Nej	29 Nej	30 Nej
Ca	mg/l	12	706	10,5
Fe	mg/l	0,443	0,867	0,609
K	mg/l	1500	3210	1260
Mg	mg/l	19,2	27,3	12,6
Na	mg/l	675	1290	561
S	mg/l	1910	2990	66,9
Si	mg/l	–	–	–
Al	µg/l	155	77,9	351
As	µg/l	259	163	382
B	µg/l	–	–	–
Ba	µg/l	242	126	172
Cd	µg/l	0,472	<0.6	1,18
Co	µg/l	36,7	123	56,7
Cr	µg/l	14,4	7,18	40,6
Cu	µg/l	14,4	57,9	29,8
Li	µg/l	–	–	–
Hg	µg/l	0,0657	0,0604	0,119
Mn	µg/l	82,7	267	138
Mo	µg/l	–	–	–
Ni	µg/l	472	588	606
P	µg/l	11200	26700	8530
Pb	µg/l	16,4	29,6	35,4
Sr	µg/l	–	–	–
V	µg/l	–	–	–
Zn	µg/l	87,7	127	180
N-tot	mg/l	2450	8100	3630
NH ₄ -N	mg/l	–	5880	2170
Sum NO ₂ -N + NO ₃ -N	mg/l	–	<6.0	<6.0
Cl	mg/l	1520	1530	1490
DOC	mg/l	2540	15860	1740
pH		8,6	8,9	8,9
Kond.	mS/m	1939	4000	2100
Liter prov	liter	3,3	0,46	0,1
Dagar	dygn	216	141	141
Täthet, liter/kvm, år	mm/år	46	6	1,4

– ej analyserat.

FSA med flygaska från Vattenfall, mätningarna är utförda i cell 2.

ELEMENT Filtrerad	Enhet	maj-05	nov-06
		7 Nej	7 Nej
Ca	mg/l	1290	706
Fe	mg/l	0,205	0,197
K	mg/l	1310	1780
Mg	mg/l	3,14	5,75
Na	mg/l	1020	1140
S	mg/l	1640	1530
Si	mg/l	–	–
Al	µg/l	32,6	78,9
As	µg/l	121	54,6
B	µg/l	–	–
Ba	µg/l	171	73,7
Cd	µg/l	1,28	<0.4
Co	µg/l	52,8	49,7
Cr	µg/l	<3	3,36
Cu	µg/l	56,8	22,1
Li	µg/l	–	–
Hg	µg/l	<0,02	<0.04
Mn	µg/l	90,1	40
Mo	µg/l	–	–
Ni	µg/l	452	299
P	µg/l	–	10500
Pb	µg/l	28,9	4,64
Sr	µg/l	–	–
V	µg/l	–	–
Zn	µg/l	106	27,1
N-tot	mg/l	–	3230
NH ₄ -N	mg/l	–	2700
Sum NO ₂ -N + NO ₃ -N	mg/l	–	<6.0
Cl	mg/l	–	1460
DOC	mg/l	8800	7000
pH		9	9,1
Kond.	mS/m	2500	2500
Liter prov	liter	0,2	0,23
Dagar	dygn	212	141
Täthet, liter/kvm, år	mm/år	3	3

– ej analyserat

FSA med flygaska från Vattenfall, mätningarna är utförda i cell 3.

ELEMENT	Enhet	okt-04	maj-06	nov-06	nov-06
		15	16	16	14
Filtrerad		JA	Nej	Nej	Nej
Ca	mg/l	254	2730	2130	2420
Fe	mg/l	0,0406	0,47	0,69	0,169
K	mg/l	56,2	405	626	442
Mg	mg/l	0,147	0,493	<0.5	<0.5
Na	mg/l	40,2	628	644	493
S	mg/l	248	1590	597	535
Si	mg/l	15,2	–	–	–
Al	µg/l	394	199	95,4	169
As	µg/l	<100	434	551	649
B	µg/l	88,8	–	–	–
Ba	µg/l	142	624	423	359
Cd	µg/l	<20	0,602	<0.06	<0.06
Co	µg/l	61,7	945	512	126
Cr	µg/l	<20	1,06	3,05	1,97
Cu	µg/l	1170	595	174	23,6
Li	µg/l	<10	–	–	–
Hg	µg/l	–	0,075	<0.04	<0.04
Mn	µg/l	–	248	164	64,5
Mo	µg/l	249	–	–	–
Ni	µg/l	40,8	1620	1390	761
P	µg/l	1610	28200	12500	14200
Pb	µg/l	<100	6,61	1,96	6,99
Sr	µg/l	358	–	–	–
V	µg/l	19,5	–	–	–
Zn	µg/l	28,8	67,9	27,6	57
N-tot	mg/l	–	3780	4390	4530
NH ₄ -N	mg/l	–	–	2480	2980
Sum NO ₂ -N + NO ₃ -N	mg/l	–	–	<6.0	<6.0
Cl	mg/l	–	951	773	608
DOC	mg/l	–	10690	9690	9850
pH		–	9,7	9,7	9,6
Kond.	mS/m	–	1441	1415	1500
Liter prov	liter	0,07	0,23	0,3	0,1
Dagar	dygn	109	216	141	141
Täthet, liter/kvm, år	mm/år	2	3	4	1

– ej analyserat.

Bilaga B: Gaslysimeter – gassammansättning (FÄLT)

Tabell. Resultat från gasprovtagningen i fält i juni och november 2006. Gashalterna är uttryckta i vol-%.
Results from the field measurements in June and November 2006. The gas concentrations are expressed in vol-%.

Prov	CH ₄	CH ₄	CO ₂	CO ₂	N ₂	N ₂	O ₂	O ₂	CH ₄ /N ₂	CH ₄ /N ₂	Kommentar
	Jun.	Nov.	Jun.	Nov.	Jun.	Nov.	Jun.	Nov.	Jun.	Nov.	
101	75	77	0	1	20	17	4	5	3,7	4,6	Tät ^{C4}
102	21	30	0	1	73	63	5	5	0,3	0,5	Tät ^{C4}
104	0	0	0	2	78	76	21	22	0,0	0,0	Tät ^{C4}
117	2	1	6	3	77	80	14	16		0,0	Skyddskikt ^{C4}
105	1	5	0	0	77	75	21	20	0,0	0,1	Tät ^{C1}
106	29	33	0	1	63	59	8	6	0,5	0,6	Drän ^{C1}
116	17	0	14	7	64	78	5	15	0,3	0,0	Skyddskikt, i skiktet med hygeniserat avloppsslam ^{C1}
103	34	43	1	2	58	47	5	5	0,6	0,9	Avjämning ^{C2}
107	22	23	0	2	70	67	6	6	0,3	0,4	Tät ^{C2}
108	16	11	0	0	69	72	11	14	0,2	0,2	Tät ^{C2}
111	20	0	1	1	72	77	7	22	0,3	0,0	Drän ^{C2}
114	50	49	18	13	25	27	7	11	2,0	1,8	Skyddskikt, i "bärsiktet" (BV:s schaktmassor) ^{C2}
109	4	14	0	3	88	72	8	10	0,0	0,2	Tät ^{C3}
110	6	11	1	1	85	70	9	19	0,1	0,2	Drän ^{C3}
112	3	16	1	0	78	77	17	7	0,0	0,2	Tät ^{C3}
113	12	32	12	14	72	45	5	10	0,2	0,7	Skyddskikt, i "bärsiktet" (BV:s schaktmassor) ^{C3}
115	1	1	7	4	80	78	12	17	0,0	0,0	Skyddskikt, i skiktet med hygeniserat avloppsslam ^{C3}

Bilaga C: Samband mellan TOC nedbrytbarhet i FSA efter 2,5 år (LAB)

FSA och avloppsslam lakades med L/S-kvot 10 och 100. Undersökningens syfte var att utreda om ursköljning av FSA-materialets höga konduktivitet kan påverka FSA-materialets beständighet mot biologisk nedbrytning, och att kontrollera fördelningen av organiskt material löst i vatten (DOC), i gasform och kvar i materialet (TOC). Efter lakning separerades därför lakvatten från den fasta fasen. Lakvattnets halt av löst organiskt material (DOC) bestämdes sedan (D-organiskt material 1). Till den fasta fasen tillsattes ytterligare vatten så att L/S-kvot 10 uppnåddes. Därefter ympades bakterier i provet och gasbildningen undersöktes under ca 950 dagar. Den bildade metangasens volym anges per gram slam. Efter avslutat nedbrytningsförsök separerades lakvatten och fast fas igen och lakvattnets halt av DOC bestämdes (D-organiskt material 2).

Fasta fasens resterande TOC bestämdes sedan och redovisas som vikt-% av ingående slam.

Resultaten visade att den totala mängden löst organiskt material som lakades ut var densamma oavsett om lakningen skedde vid L/S 10 eller 100, dvs. den utlakade mängden organiskt material per gram slam-ekvivalent påverkas inte av L/S-kvoten.

DOC och TOC antogs komma från en cellulosaamolekyl $C_6H_{12}O_6$ och gasvolymen som mättes antas bestå av metan eftersom bildad koldioxid löser sig i lakvattnet på grund av högt pH. I fallet med slam ingår både metan och koldioxid i den uppmätta gasvolymen. Fördelningen av organiskt material, löst, kvar i materialet och nedbrutet, kunde inte utföras på grund av problem med mätning av TOC-halten.

Provbeteckning	D-organiskt material 1 (vatten) mg/l	D-organiskt material 2 (vatten) mg/l	Gas-bildning ml	TOC-fast fas Vikt-%
Aska 1 40% L/S 10	796	1080	450	7,9
Aska 1 40% L/S 100	89			
Aska 1 60% L/S 10	733	790	10	4,5
Aska 1 60% L/S 100	74			
Aska 2 40% L/S 10	829			
Aska 2 40% L/S 100	92			
Aska 2 60% L/S 10	734			
Aska 2 60% L/S 100	73			
Slam L/S 100	127	130	600	39

* Slam L/S 10 gick ej att filtrera

Bilaga D: Borrprovtagning – Tätskiktsprofilens vattenkvot/TS-halt

C1 – Mälarenergi	Nivå, m	TS	w
Anläggningsjord	0,5	29%	244%
Anläggningsjord	1	34%	193%
Morän	1,5	71%	40%
Drän	1,7	83%	20%
kolvprov, övre nivån under dräneringsskiktet	1,9	61%	63%
C1:2 – Mälarenergi	Nivå, m	TS	w
Anläggningsjord (Värme)	0,5	42%	138%
Anläggningsjord	1	41%	142%
Mn	1,4	91%	10%
Drän	1,5	88%	13%
FSA	1,7	50%	99%
FSA	1,9	53%	89%
Avjämningskikt Flygaska (Mälarenergi)	2,4	62%	61%
C2 – Vattenfall	Nivå, m	TS	w
Anläggningsjord	0,5	48%	107%
Anläggningsjord	1	41%	142%
Drän	1,5	82%	22%
FSA (Vattenfall)	2	51%	98%
C3 – Vattenfall	Nivå, m	TS	w
Anläggningsjord (Värme)	0,5	43%	131%
Anläggningsjord	1	42%	136%
Anläggningsjord Morän	1,2	87%	15%
Drän	1,3	89%	13%
FSA (Vattenfall)	1,5	53%	90%
FSA (Vattenfall)	1,8	54%	85%
Avjämningskikt Flygaska (Mälarenergi)	2	65%	54%

C4 – Mälarenergi	Nivå, m	TS	w
Anläggningsjord (Värme)	0,5	34%	194%
Mn	1	88%	14%
Mn	1,5	88%	14%
Mn/Drän	2	91%	9%
FSA kolvprov, övre nivån under dräneringsskiktet	2,1	–	–
Avjämningskikt Flygaska (Mälarenergi)	2,5	56%	80%
C4:2 – Mälarenergi	Nivå, m	TS	w
FSA kolvprov, övre nivån under dräneringsskiktet	1,8	49,6%	102%
Avjämningskikt Flygaska (Mälarenergi)	2,3	47%	113%

Bilaga E: Ödometerförsök – FSA skiktets permeabilitet (LAB)

MRM

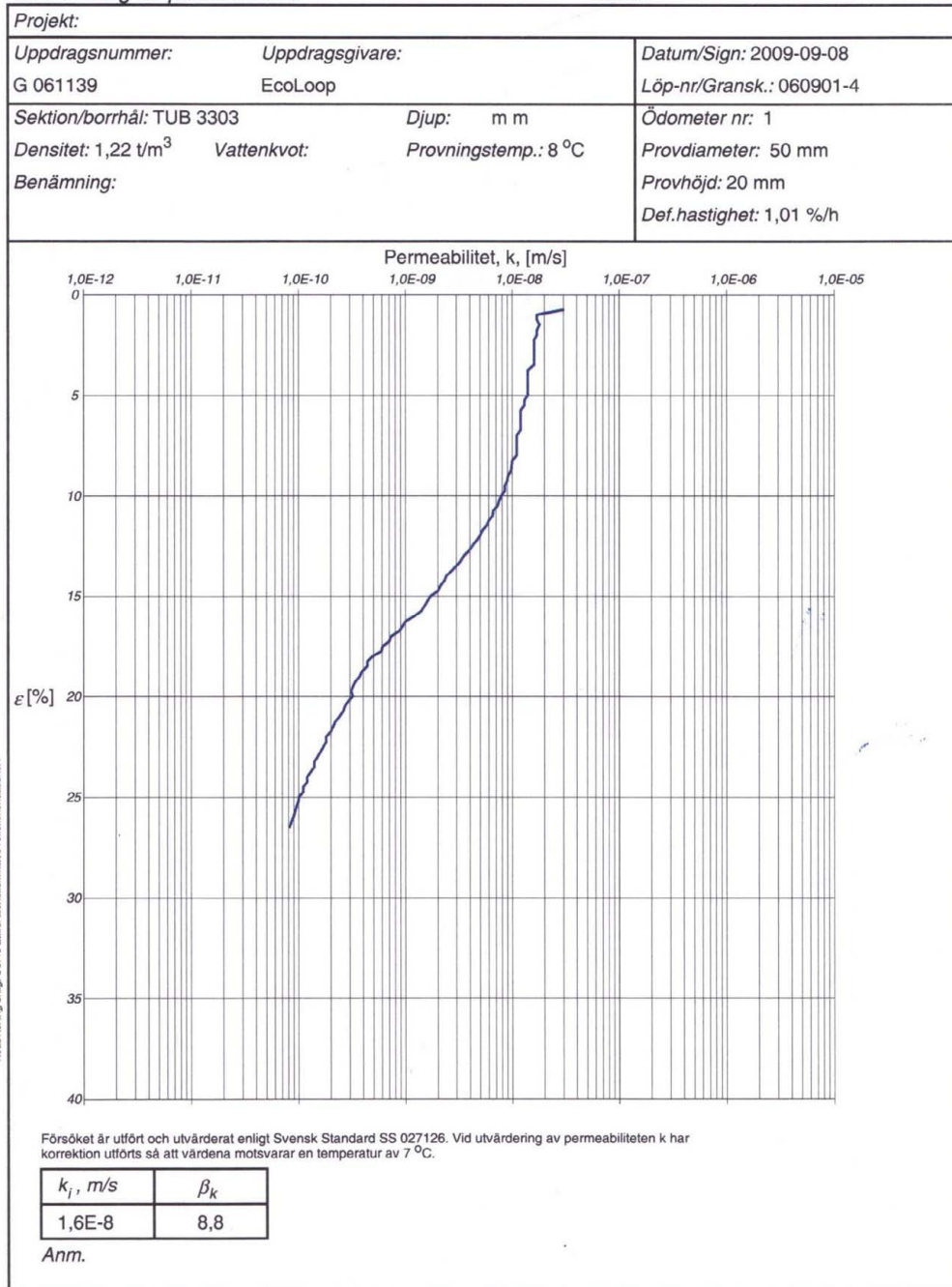
mark radon miljö

Utvärdering av permeabilitet



RAPPORT

Utfärdad av ackrediterat laboratorium
Issued by an Accredited Laboratory

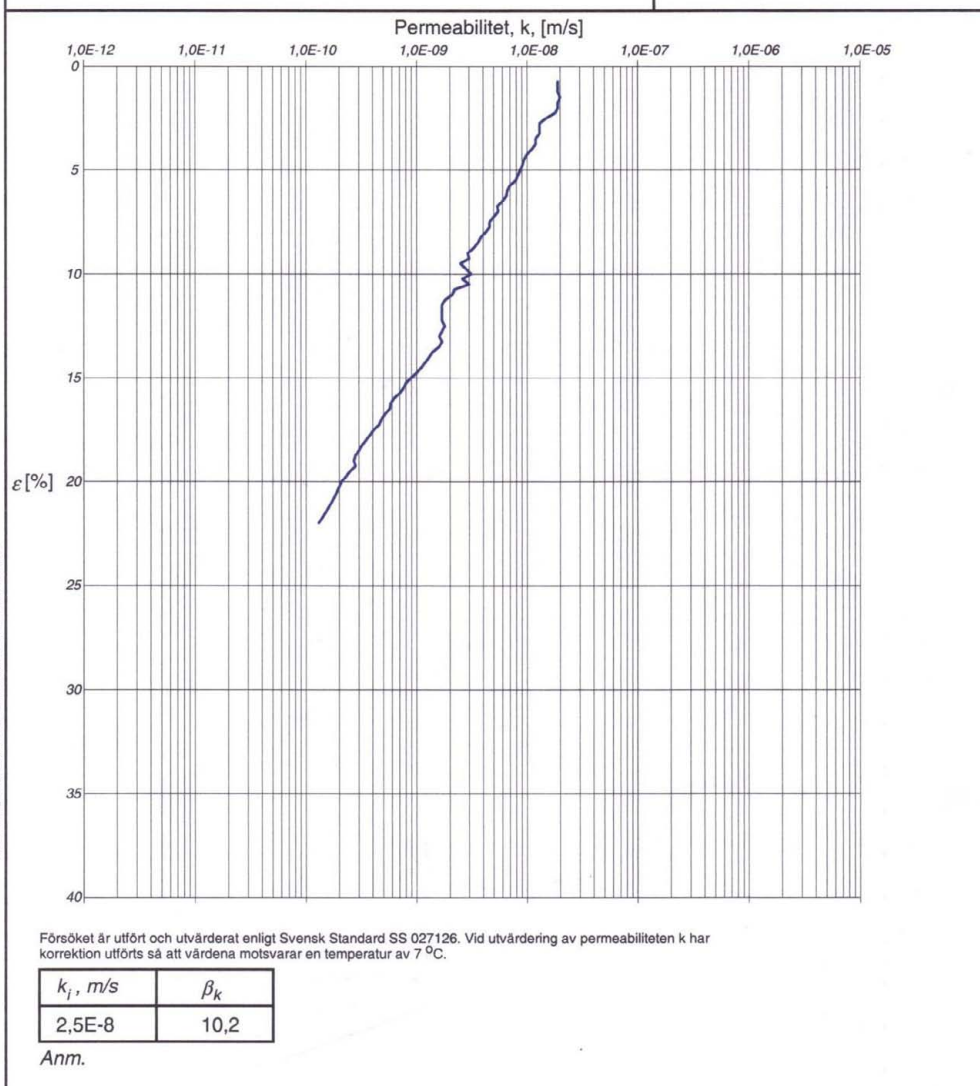


MRM Konsult AB Box 63, 971 03 Luleå
Lab.telefon 0920-60487
www@mrm.se

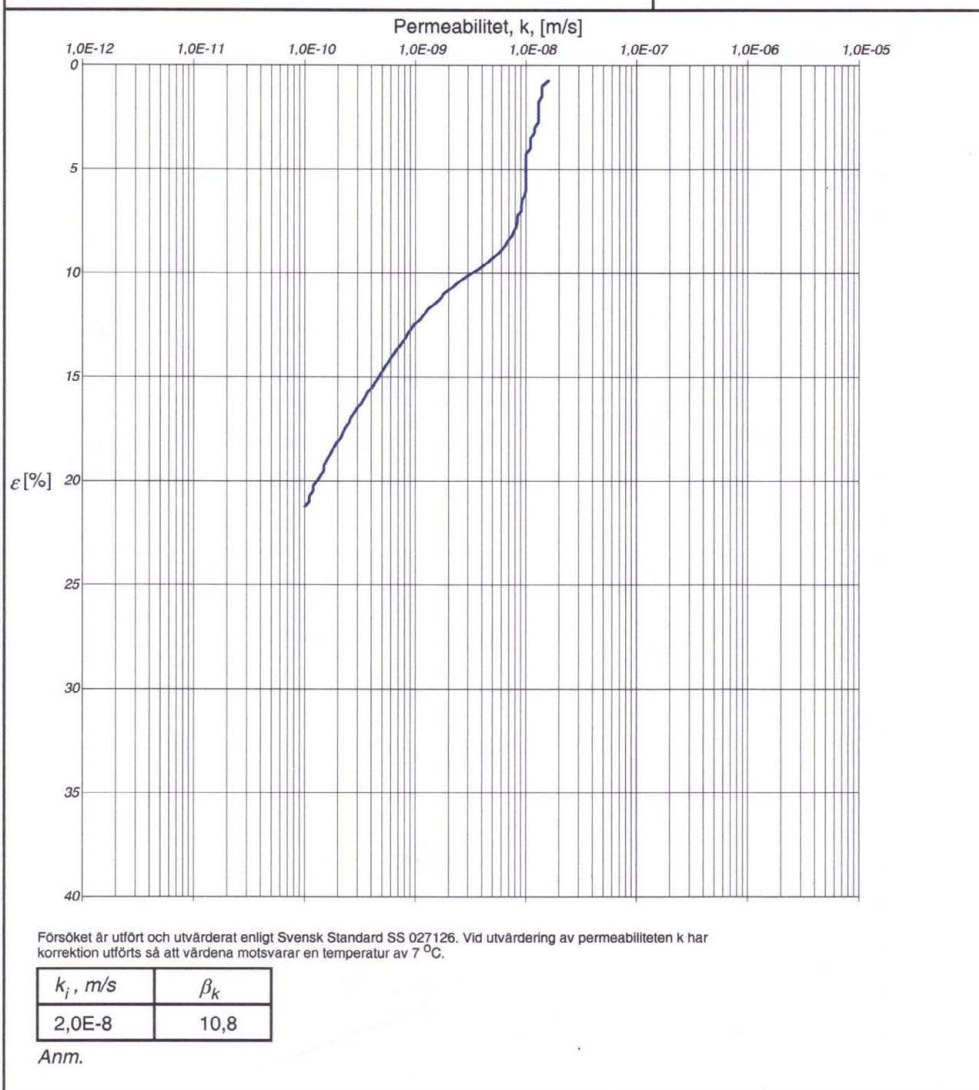
h:\aa_le\CRS\data\CRSUT1.crs 2006-09-22
Denna rapport får endast återges i sin helhet om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat. Kunden har informerats om mätosäkerheten vid kontraktsgenomgången

3 (4)

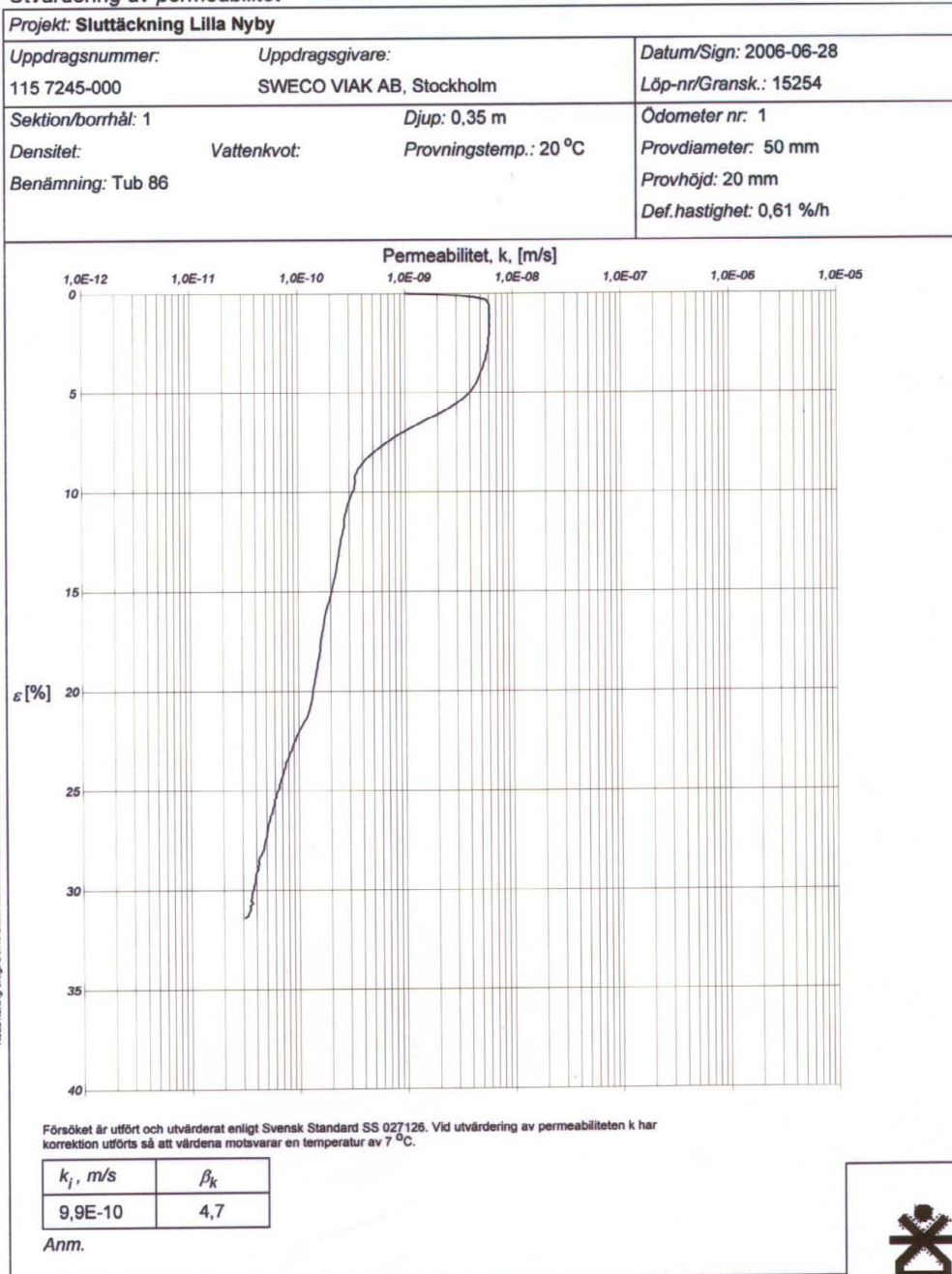
Projekt:		
Uppdragsnummer: G 061140	Uppdragsgivare: EcoLoop	Datum/Sign: 2006-09-08 Löp-nr/Gransk.: 060901-4
Sektion/borrhål: tub 3140	Djup: m m	Ödometer nr: 3
Densitet: 1,32 t/m ³	Vattenkvot:	Provdiameter: 50 mm
Benämning:	Provningstemp.: 8 °C	Provhöjd: 20 mm
		Def.hastighet: 1,01 %/h



Projekt:		
Uppdragsnummer: G 061141	Uppdragsgivare: EcoLoop	Datum/Sign: 2006-09-08 Löp-nr/Gransk.: 060901-4
Sektion/borrhål: tub SGC 7393	Djup: m m	Ödometer nr: 4
Densitet: 1,26 t/m ³	Vattenkvot:	Provdiameter: 50 mm
Benämning:	Provningstemp.: 8 °C	Provhöjd: 20 mm
		Def.hastighet: 1,01 %/h



Utvärdering av permeabilitet

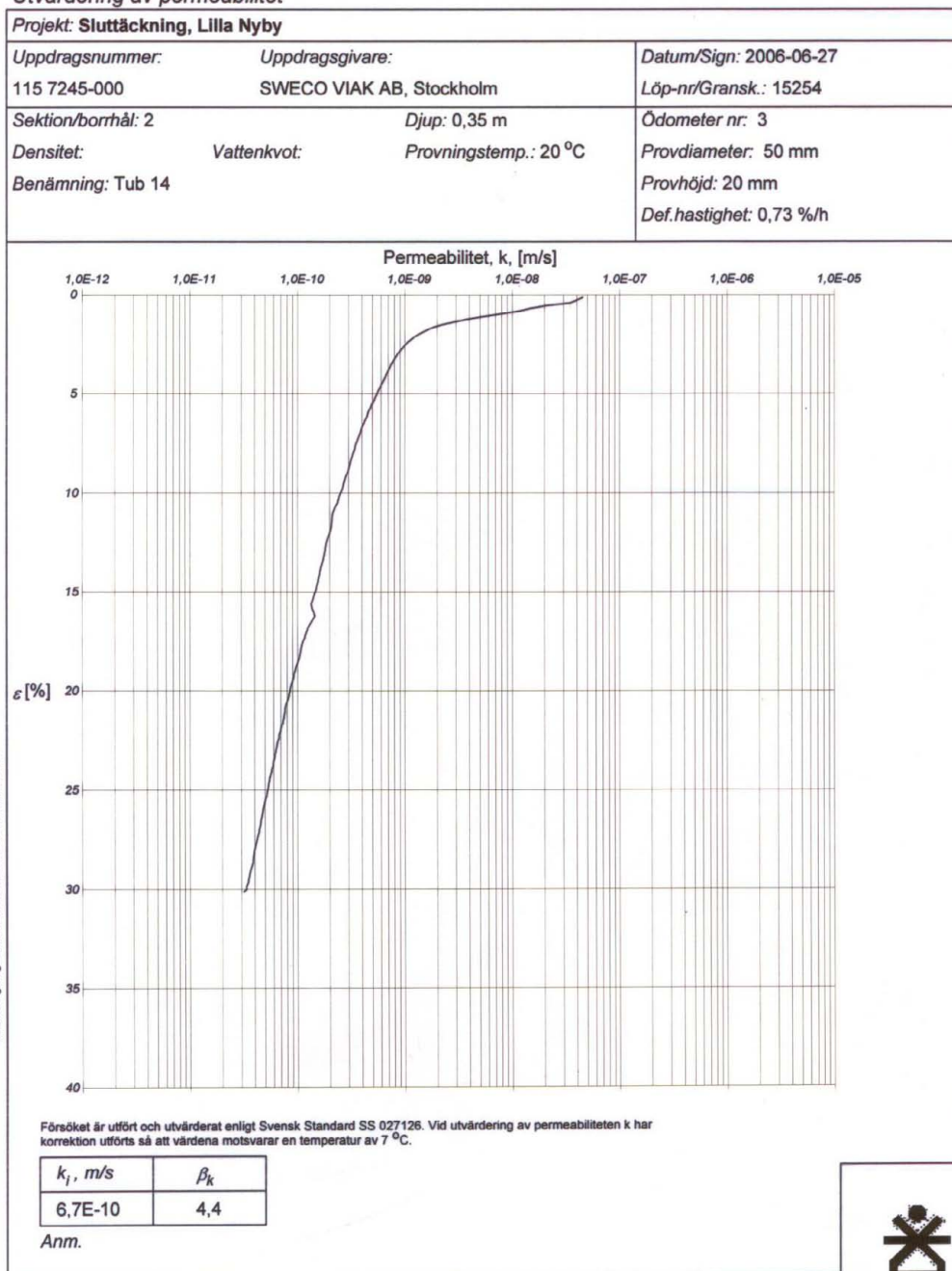


SWECO GEOLAB, Gjörwellsgatan 22, Box 34044
 100 26 STOCKHOLM, Tel 08-695 60 00, Fax 08-695 63 60
 geolab@sweco.se, www.sweco.se/geolab, Ingår i SWECO VBB AB

P:\2172\Uppdrag 2006\15254\la06_154.txt 2006-06-30



Utvärdering av permeabilitet



SWECO GEOLAB, Gjörwellsgatan 22, Box 34044
100 26 STOCKHOLM, Tel 08-695 60 00, Fax 08-695 63 60
geolab@sweco.se, www.sweco.se/geolab, Ingår i SWECO VBB AB

P:\2172\Uppdrag 2006\15254\06_296.bl 2006-06-29





Box 47607 117 94 Stockholm

Tfn 08 506 002 00

Fax 08 506 002 10

E-post svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se