

Flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) som tätskiktsmaterial vid sluttäckning av deponier

– en vägledning

*Carling M.
Håkansson K.
Mácsik J.
Mossakowska A.
Rogbeck Y.*



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:	Flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) som tätskiktsmaterial vid sluttäckning av deponier – en vägledning
Title of the report:	Fly ash stabilised sewage sludge (FSS) as liner material – an instruction manual
Rapportens beteckning Nr i serien:	2007-10
Författare:	Mácsik J., Ecoloop; Carling M. och Håkansson K., Geo Innova; Rogbeck Y., SGI; Mossakowska A., Stockholm Vatten
Projektnr:	26-108
Projektets namn:	FSA som tätskiktsmaterial vid sluttäckning av deponier – en vägledning
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling (f.d. VA-Forsk), Värmeforsk, RTK, Stockholm Vatten, Geo Innova, SGI och Ecoloop)
Rapportens omfattning Sidantal: Format:	57 A4
Sökord:	Rötat avloppsslam, flygaska, tätskikt, deponi, vägledning
Keywords:	Sewage sludge, flyash, liner, waste site, instruction manual, pilot study
Sammandrag:	Den aktuella vägledningen riktar sig till den som planerar att utföra sluttäckning med tätskikt av FSA och behöver stöd för att projektera, utföra och kontrollera sin konstruktion. Vägledningen kan också fungera som stöd för miljömyndigheter att sluttäckningen utförs fackmannamässigt.
Abstract:	This instruction manual is aimed for those who are planning closures of a landfill with FSS and need guidance to plan, carry out and control the liner construction. The manual can also be used by environmental agencies in order to control that the closure is done appropriately.
Målgrupper:	Konsulter, entreprenörer, deponi- och materialägare, miljömyndighet
Omslagsbild:	Utlagt FSA-, dränerings- och skyddsskikt, Lilla Nyby, Eskilstuna. Fotograf: 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

Den nu aktuella vägledningen riktar sig till den som planerar att utföra sluttäckning med tätskikt av FSA och behöver stöd för att projektera, utföra och kontrollera sin konstruktion, dvs. till deponiägare, konsulter, materialägare, entreprenörer. Vägledningen ska också fungera som stöd för miljömyndigheter att sluttäckningen utförs fackmannamässigt.

Med hjälp av vägledningen ska man på ett säkert sätt kunna ta fram tätskiktskonstruktion baserad på flygaska och avloppsslam som uppfyller aktuella funktionskrav. Den långsiktiga målsättningen är att vägledningen efter några års uppföljningsarbete med avseende på beständighet, hantering och utläggning av FSA ska kunna revideras och utformas som en handbok.

Projektet har finansierats av Svenskt Vatten (VA-Forsk), Värmeforsk, Regionplane- och trafikkontoret (RTK), Stockholm Vatten, Statens geotekniska institut (SGI), Geo Innova och Ecoloop. Projektets referens- och styrgrupp bestod av Thomas Hellström/Peter Balmér (VA-Forsk), Claes Ribbing (Svenska Energiaskor), Lars Dalgren (Fortum Värme), Hanna Strand, (Göteborg Energi), Charlotta Andersson, (SÖRAB), Thomas Rihm (Avfall Sverige) och Teresa Kalisky (RTK).

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	7
Summary	8
1 Inledning	9
1.1 Definitioner	9
1.2 Materialbeskrivning	10
1.3 Avgränsning	10
2 Projekteringsförutsättningar	10
2.1 Miljökrav	10
2.1.1 Allmänna krav	10
2.1.2 Täthet vs Utlakning	11
2.1.3 Beständighet	11
2.1.4 Miljösystemanalys	12
2.1.5 Arbetsmiljö	12
2.2 Juridiska krav	12
2.3 Tekniska krav	12
2.4 Material till tätskikt	13
2.4.1 Råmaterial	13
2.4.2 Laboratorieundersökningar	14
2.4.3 Utprovning av blandningsrecept	15
2.5 Konstruktiv utformning	17
2.5.1 Avjämningsskikt	17
2.5.2 Tätskikt	18
2.5.3 Materialskiljandeskikt	18
2.5.4 Dräneringsskikt	18
2.5.5 Skyddsskikt	18
2.5.6 Växtetableringsskikt	19
3 Redovisning i bygghandling	19
4 Utförande	19
4.1 Transport och lagring	19
4.1.1 Transport	19
4.1.2 Lagring	19
4.2 Tillverkning av FSA	21
4.2.1 Skopblandare	22
4.2.2 Tvångsblandare	22
4.2.3 Stjärnsikt	22
4.2.4 Annan blandningsutrustning	22
4.3 Utläggning av FSA och övriga skikt	22
4.3.1 Stödwall	22

4.3.2	Utläggning av FSA, dränerings- och skyddsskikten.....	23
4.4	Arbetsmiljö	24
4.5	Väderlek	25
5	Kvalitetskrav och kontroll	25
5.1	Utförandekontroll/egenkontroll.....	26
5.2	Efterkontroll (frivillig).....	26
5.3	Risker/konsekvenser.....	26
6	Drift och underhåll.....	27
	Referenser/hänvisning	28
	Bilaga A: Laboratorieundersökning och viktiga parametrar.....	30
	Bilaga B: Egenkontroll.....	33
	Bilaga C1: Exempel på utförda objekt	
	– Tekniska Verken i Linköping.....	38
	Bilaga C2: Exempel på utförda objekt	
	– SRV återvinning i Huddinge	43
	Bilaga C3: Exempel på utförda objekt	
	– Dragmossen, Älvkarleby	48
	Bilaga C4: Exempel på utförda objekt	
	– Lilla Nyby, Eskilstuna.....	53
	Bilaga D: Faktablad	57

Sammanfattning

Det finns ett stort antal äldre deponier som ska avslutas inom den närmsta tioårsperioden genom sluttäckning. Tätskiktets funktion är att den ska begränsa mängden vatten som infiltrerar ner till avfallet. Det innebär att det ställs höga krav på täthet, hållfasthet och beständighet på tätskiktetsmaterial. Vid flera pilotförsök har flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) använts som tätskiktetsmaterial. Resultaten visar att FSA kan vara ett material som har låg hydraulisk konduktivitet och som uppfyller kraven på tätskikt på deponier för icke-farligt avfall. Sluttäckningen med FSA som tätskiktetsmaterial ställer speciella krav på val av material, på blandning och utläggningen.

Målsättningen med denna vägledning är att den ska fungera som hjälp för att på ett säkert sätt ta fram en sluttäckningskonstruktion, baserad på flygaska och avloppsslam, som uppfyller ställda funktionskrav. Vägledningen innehåller en beskrivning av vilka geotekniska och miljömässiga krav som måste uppfyllas. Den inkluderar följande skeden; tillverkningsfas, lagring, utläggning och uppföljning/kontroll. Vägledningen riktar sig till den som planerar att utföra sluttäckning med tätskikt av FSA och behöver stöd för att projektera, utföra och kontrollera sin konstruktion, dvs. till deponiägare, konsulter, materialägare och entreprenörer. Vägledningen ska också fungera som stöd för miljömyndigheter att sluttäckningen utförs fackmannamässigt.

Slam och aska från olika anläggningar kan ha mycket varierande egenskaper. Kvaliteten på de ingående materialen påverkar blandningens materialegenskaper och därmed även dess täthet och beständighet. Både nya råmaterial och blandningar måste därför undersökas med avseende på olika materialegenskaper. Sammanfattningsvis är blandningens TS-halt en kritisk faktor för både hållfasthet, täthet och praktisk hanterbarhet.

För att erhålla tillräckligt stora mängder råmaterial kan det bli aktuellt att lagra material. Flera olika aspekter måste då beaktas, eftersom lagring av råmaterial kan påverka egenskaperna. Tillverkning av FSA bör ske med blandningsförhållanden som utvärderats och bedömts i inledande laboratorieförsök. Flera olika typer av blandningsmetoder kan fungera. Två olika utläggningsstrategier har prövats med framgång. Väderleken är en viktig faktor för hur väl blandning och utläggning av FSA-skiktet fungerar. Väderleken har också betydelse för eventuella arbetsmiljöproblem (ammoniavgång och damning).

Förutom den kvalitetskontroll som görs på råmaterial och blandning rekommenderas att man i fält verifierar att tätheten är tillräcklig. Personalens kunskande och engagemang är mycket viktigt för att tätskiktets kvalitet ska kunna säkerställas.

Summary

Several old waste sites are on the verge to be closed up during the next ten years. The function of a liner is to limit the amount of water that is infiltrated to the waste. This leads to high demand on a liner's permeability, shear strength and durability. Several pilot studies have been followed up where fly ash stabilised sewage sludge (FSS) was used as liner. The results show that FSS has low hydraulic conductivity (low permeability) and that it meets the demands put on a liner for non-hazardous wastes. Closure with FSS as liner puts special demands on the materials, the mixing action and during installation

The aim of this instruction manual is that it will work as an aid to manufacture and install liner, based on fly ash and sewage sludge, which fulfils functional demands. The manual contains a description of geotechnical and environmental demands to accomplish. This includes the following; manufacturing, storing, installation and follow up/control. This instruction manual is aimed for those who are planning closures of a landfill with FSS and need guidance to plan, carry out and control the liner construction. The manual can also be used by environmental agencies in order to control that the closure is done appropriately.

Sewage sludge and fly ash from different producers can have varying properties. The quality of the used materials can change the FSS mixture's material properties and thereby also its permeability and durability. Both raw materials and mixtures should thereby be investigated according to material parameters. The mixtures dry solid content is a critical parameter as both shear strength and handling properties will be effected.

In order to acquire sufficient amount of raw material storing is often required. Several aspects must then be counted on, as the properties of the raw materials can be altered. Manufacturing FSS must be done with the same material properties that have been investigated and evaluated in laboratory.

Different mixing methods can installation strategies perform well. The weather is an important factor during mixing and installation. It is also of importance due to work environment (ammoniac release to the air and dusting conditions).

Beside quality control of the raw materials and the mixture it is also recommended to verify permeability during field conditions. The know how and engagement of the staff is of great importance in order to fulfil requirements.

1 Inledning

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, finansierade av bl.a. RVF, VA-Forsk, Värmeforsk och RTK har visat att flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) har en stor potential att kunna användas som tätskikt vid sluttäckningar (bl.a. Värmeforskrapporterna 837, 942, 943 och 948, RVF-rapport 02:18). Utförda fältförsök visar att FSA-material kan användas som tätskikt i stor skala och att det finns vissa kritiska faktorer för att säkerställa tätskiktets funktion. Med dagens kunskap bedöms FSA kunna nyttjas som tätskikt i sluttäckningskonstruktioner på deponier för icke-farligt avfall.

Målsättningen med denna vägledning är att på ett säkert sätt ta fram en sluttäckningskonstruktion baserad på flygaska och avloppsslam som uppfyller ställda krav. Vägledningen innehåller en beskrivning av vilka geotekniska och miljömässiga krav som måste uppfyllas. Den inkluderar följande skeden; tillverkningsfas, lagring, utläggning och uppföljning/kontroll.

Erfarenheter från utförda projekt har insamlats vid två workshops där diskussioner förts kring kritiska faktorer angående projektering, miljöbedömning, hantering och utförande av FSA. Deltagare har varit deponiägare, konsulter, entreprenörer och miljömyndigheter med erfarenhet av frågeställningarna.

1.1 Definitioner

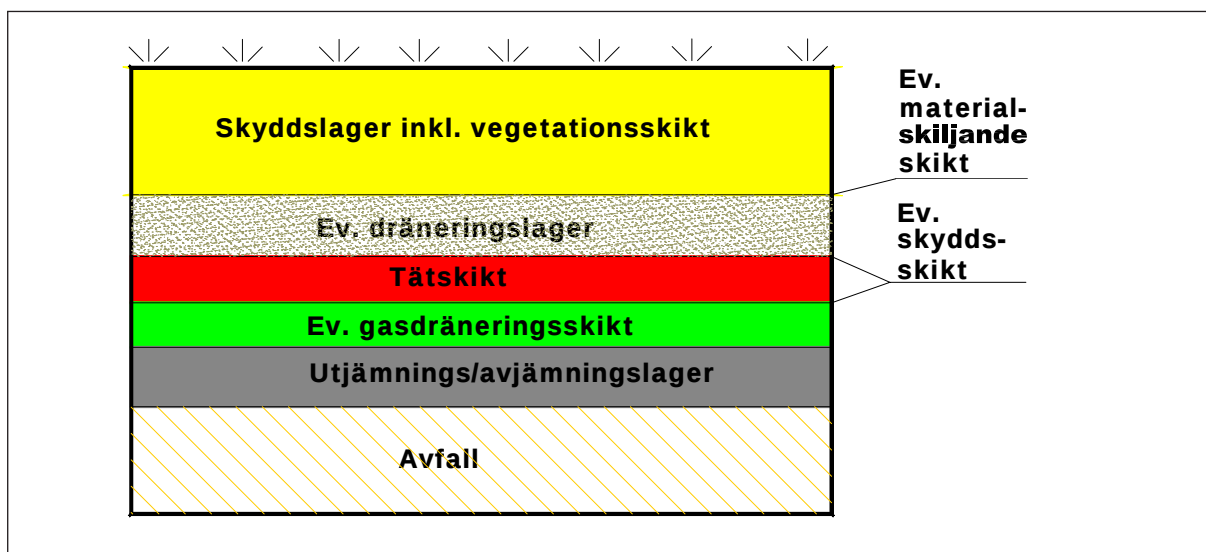
En beskrivning av vissa viktiga parametrar och metoder för att bestämma dessa finns i bilaga A.

En principsektion för sluttäckning av deponi visas i figur 1-1 och några viktiga begrepp definieras nedan.

Sluttäckning: Samlande term för en permanent överäckning från överkant avfall till markyta, se figur 1-1. Det kan bestå av utjämnings/avjämningslager, ev. gasdränerings-skikt, ev. skyddsskikt, tätskikt, ev. dräneringslager, skyddslager och vegetationsskikt.

Tätskikt: Barriär som reducerar genomträngningen av en vätska eller gas som rör sig genom konvektion och/eller diffusion.

FSA: Flygaskastabiliserat avloppsslam



Figur 1-1. Principsektion för sluttäckning av deponi.

1.2 Materialbeskrivning

För att säkerställa att specifika ingående material ger ett FSA med rätt kvalitet måste materialen undersökas och klassas. Material som inte är lämpliga bör kunna exkluderas från vidare utredning redan i ett tidigt skede. Baserat på hela konstruktionen kan FSA-skiktets deformations- och hållfasthetsegenskaper samt beständighet dimensioneras.

1.3 Avgränsning

Det finns avsättning för askor och avloppsslam i flera olika applikationer. Denna Vägledning avgränsas till att gälla rotat avloppsslam i kombination med bio-, torv och kolaska som tätskikt på deponier. Erfarenhet av tillverkning av FSA med andra askor, exempelvis från avfallsförbränning, är begränsad i dagsläget. Avloppsslammet kan även ingå i andra lager, som t.ex. i växtetableringsskikt, avjämnings-skikt men dessa tillämpningar inkluderas inte i denna Vägledning. Även askor kan användas i olika lager som t.ex. avjämningslager, men ej heller dessa tillämpningar ingår. Vid förhöjda halter av metaller och eller organiska ämnen bör utlakning och yt-utlakning från hela tätskiktstrukturen utvärderas.

Här anges kortfattat vad som gjorts tidigare inom området med referenser till svensk och utländsk forskning. Referera också till tidigare gjorda arbeten inom Värmeforsk om de ligger inom området.

2 Projekterings-förutsättningar

2.1 Miljökrav

2.1.1 Allmänna krav

Sluttäckning av deponier regleras av förordningen (2001:512) om deponering av avfall. I förordningen finns inte reglerat *hur* täckningen ska vara konstruerad. Istället är kravet formulerat som ett funktionskrav (§ 31): *”Sluttäckningen skall vara så konstruerad att mängden lakvatten som passerar genom täckningen inte överskrider eller kan antas komma att överskrida 5 liter per kvadratmeter och år för deponier för farligt avfall och 50 liter per kvadratmeter och år för deponier för icke-farligt avfall.”*

Funktionskravet gäller för konstruktionen i sin helhet, inte enskilda skikt. Det övergripande målet på täckningen är att funktionen upprätthålls på lång sikt. Funktionskravet medför i sin tur att en rad andra faktorer bör ställas på de material som ska fungera som täckning. Framför allt gäller det faktorer som på ett eller annat sätt kan påverka beständigheten.

I Naturvårdsverkets handbok (2004:2) med allmänna råd avseende deponering framgår att material till sluttäckning kan utgöras av avfall från industriprocesser. Avfallet bör vara väl undersökt med avseende på föroreningsinnehåll och lakbarhet. Vid val av material bör beständigheten över tiden beaktas. I handboken påpekas att samma krav på egenskaper bör gälla även för jungfruliga material. Den miljöpåverkan som det aktuella FSA-materialet kan ge upphov till (främst genom utlakning av miljöstörande ämnen) måste värderas dels utifrån vad den aktuella platsen tål, dels utifrån vad konventionella material kan förväntas ge upphov till. Hänsyn bör tas till att en deponi är ett redan påverkat område, och att även konventionella material ger upphov till en miljöbelastning. För konstruktionsmaterial som används under tätskiktet i en deponi bör gälla samma krav (dvs. mottagningskriterier) som för avfall som deponeras. Detta framgår bl.a. av Naturvårdsverkets handbok 2007:1 (Naturvårdsverket, 2007).

Enligt handboken för deponering av avfall (Naturvårdsverket, 2004) bör biologiskt nedbrytbart material inte användas i tätskiktet. Skälet anges vara att underlag saknas för att säkerställa den långsiktiga beständigheten. Senare års studier har visat att under rätt betingelser blir nedbrytningen av det organiska materialet i en FSA-blandning mycket liten och beständigheten hos FSA-materialet god, Mácsik *et al.* (2007).

Några aspekter av funktionen hos FSA-material är av särskild betydelse vid bedömning av miljöpåverkan och därmed möjligheterna att använda flygaskastabiliserat slam (FSA) i tätskikt. Det gäller t.ex. den hydrauliska konduktiviteten (permeabiliteten), materialets beständighet och läckage av eventuella föroreningar från materialet.

2.1.2 Täthet vs Utlakning

Huvudsyftet med tätskiktsmaterialet är att det ska förhindra att vatten infiltrerar ner i avfallet, dvs. materialet ska vara så tätt som möjligt och ha en låg hydraulisk konduktivitet. Beroende på tätskiktets låga hydrauliska konduktivitet (dvs. att materialet är tätt) kommer huvuddelen av det vatten som når tätskiktet att rinna av på tätskiktets överyta. Endast en mycket liten del kommer att infiltrera ner i tätskiktet. Det innebär att utlakning av näringsämnen och miljöstörande ämnen från de ingående materialen i FSA-tätskiktet främst kommer att ske från tätskiktets överyta. En betydligt mindre mängd vatten kommer att infiltrera ner genom tätskiktet och bilda lakvatten.

Halterna i det avrinnande vattnet är beroende av mängden avrinnande vatten, vilket innebär att halterna i det avrinnande vattnet kommer att variera beroende på nederbördsintensitet, totalnederbörd samt tätskiktets hydrauliska konduktivitet. Vad den eventuella miljöpåverkan som utlakning av näringsämnen och föroreningar innebär, beror i stor utsträckning på var deponin är lokaliserad, dvs. omgivningens skyddsvärde och sårbarhet. Om utlakningen medför oacceptabel miljöpåverkan bör det avrinnande vattnet tas omhand utifrån lokala förutsättningar och i enlighet med förordningen om deponering av avfall (2001:512, 21 § och 30 §).

Även om näringsinnehållet i avrinnande vatten och lakvatten från en deponi med FSA-tätskikt lokalt

och under kortare tid kan bli mycket högt, är de utsläppta mängderna totalt sett små jämfört med det läckage som sker från t.ex. jordbruket. I det långa perspektivet bedöms inte näringsläckaget utgöra ett problem, eftersom de lätttrörliga närsalterna kan förväntas laka ut under en begränsad tidsperiod och i huvudsak under en period när lakvattenhantering fortfarande pågår vid deponin (2001:512, 30 §).

2.1.3 Beständighet

Eftersom sluttäckningskonstruktionen ska fungera även i ett mycket långt tidsperspektiv är materialets beständighet av betydelse. Beständigheten hos ett FSA-material kan definieras som kapaciteten att motstå biologisk nedbrytning (aerob eller anaerob) och utlakning av ämnen (främst organiskt kol) från FSA-materialet, dvs. materialets fysikaliska integritet. Både anaerob och aerob nedbrytning kan under optimala förhållanden orsaka en tydlig minskning av beständigheten. Faktorer som är av betydelse för nedbrytning av det organiska materialet är bland annat pH, salthalt (elektrisk konduktivitet), täthet och vattenmättnad. Nedbrytningen av organiskt material begränsas av ett högt pH och hög elektrisk konduktivitet. En hög vattenmättnad innebär att förutsättningarna för aerob nedbrytning minskar. För material som har en hög täthet, t.ex. FSA-material, bedöms inte utlakning av organiskt kol påverka tätheten. Flygaskastabiliserat slam 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.

Askans och det rötade avloppsslammets kvalitet och FSA-blandningens homogenitet är viktiga faktorer som styr FSA-materialets täthet, salthalt och pH. God kontroll av avloppsslammets, askans och blandningens kvalitet samt att det utlagda FSA-materialet komprimeras och skyddas mot uttorkning ger en låg årlig perkolation av vatten (Mácsik *et al.* 2007). Korrekt blandat och använt i tätskiktet bedöms materialet klara tätskiktskravet på hundratals år. Sämre blandningar och/eller ingående material kan begränsa livslängden hos FSA-materialet som tätskikt. Krav på kvalitetssäkring och repeterbarhet på FSA-materialet är därmed viktig.

Det är i sammanhanget viktigt att påpeka att tätskiktets funktion inte är samma sak som beständigheten. Tätskiktets funktion och beständighet kan vara acceptabel trots en måttlig beständighet hos det organiska materialet.

2.1.4 Miljösystemanalys

Kretsloppsprincipen hör till miljöbalkens allmänna hänsynsregler och formuleras i 2 kap 5 §: *"Alla som bedriver en verksamhet eller vidtar en åtgärd skall hushålla med råvaror och energi samt utnyttja möjligheterna till återanvändning och återvinning."* Materialbehovet för deponitäckning är mycket stort och användning av jungfruliga material innebär att stora mängder naturmaterial måste användas. Materialbehovet till sluttäckning, exklusive tätskikt är > 30 000 ton/ha. Genom att återanvända material som slam och aska, samt andra material kan ändliga naturresurser sparas. I tätskikt med 0,5 m FSA-material och med lika TS vikt avloppsslam och flygaska, ingår ca 3 000 ton FSA (torrvikt), dvs. och ca 4 500 ton (våtvikt) avloppsslam vid TS 30 % och 1 500 ton flygaska (torrvikt) per hektar deponiyta. I skyddsskiktet bedöms motsvarande mängd avloppsslam kunna nyttjas. Användning av slam och aska i tätskikt innebär också att dessa materials inboende goda egenskaper tas tillvara.

2.1.5 Arbetsmiljö

Ett annat område att ta särskild hänsyn till är arbetsmiljön. Vid användning av slam och aska och FSA-tätskikt är det framför allt lukt, damning samt ammoniakavgång som bör beaktas. Arbetsmiljöaspekter beskrivs mer utförligt under kapitel 4.4.

2.2 Juridiska krav

För allt anläggningsbyggande gäller miljöbalkens portalparagraf (1 kap 1 §) och allmänna hänsynsregler (2 kap). De avvägningar med avseende på

miljön som skall göras är alltså desamma oberoende av om konventionella material används eller om FSA-material används.

Avfall som återvinns för anläggningsändamål berörs av reglerna för klassificering av avfall, transport av avfall och dokumentation av hantering av avfall.

Beroende på sluttäckningens omfattning kräver användning av FSA-material anmälan alternativt tillstånd hos tillsynsmyndigheten.

2.3 Tekniska krav

Det övergripande tekniska kravet är att deponin ska ha en godtagbar säkerhet både vad gäller dess helhet som dess slänter. Enligt 27§ i Naturvårdsverkets handbok 2004:2 (tillika Allmänna Råd) skall deponier ha en säkerhetsfaktor av minst 1,5 beräknad med totalspänningsanalys eller minst 1,35 beräknad med kombinerad analys. Stabiliteten måste vara säkerställd i ett långt tidsperspektiv ("många hundra år"). I NV:s Allmänna Råd finns också rekommendationer vad gäller deponiers släntlutningar. Enligt handbokens 31 § rekommenderas att den minsta lutningen på sluttäckningens tätskikt bör vara 1:20, medan den största lutningen inte bör överskrida 1:3.

De tekniska krav som finns på tätskiktet och sluttäckningen är att deponin ska ha tillräcklig hållfasthet för att klara den avsedda släntlutningen med nämnda säkerhetsfaktorer. Erforderlig skjuvhållfasthet eller friktionsvinkel beror på i vilken släntlutning materialet läggs. Beräkningar kan utföras enligt Rogbeck *et al.* (2007).

För stabiliteten i sluttäckningen måste hållfastheten i de olika lagren/skikten beaktas. Det gäller såväl skyddslagret, gränsskiktet mellan skyddslager och tätskikt samt tätskiktets inre stabilitet. Stabiliteten i materialet beror på dess skjuvhållfasthet eller inre friktionsvinkel. För ett friktionsmaterial är stabiliteten beroende av vattentrycket. Ett dränskikt över tätskiktet minskar höga vattentryck och förbättrar stabiliteten. För FSA-material ökar normalt den odränerade skjuvhållfastheten efter kompression (vid belastning) och efter en tids lagring. Hur mycket materialet deformeras beror på dess kompressions-egenskaper och vilken belastning det utsätts för.

Den kompression som uppkommer genom belastning av överliggande lager (dräneringslager, skyddslager, vegetationsskikt) medför därför en ökad stabilitet hos tätskiktet.

Den skjuvhållfasthet som bestäms i laboratorieundersökningar och verifieras i fält avgör vilken släntlutning som är möjlig för FSA. En beräkning bör göras för det aktuella fallet. En översiktlig bedömning är att det krävs skjuvhållfasthet ≥ 10 kPa vid släntlutning runt 1:4 och skjuvhållfasthet ≥ 15 kPa vid släntlutningar mellan 1:4 och 1:3. För lägre hållfasthet i FSA blandningen eller överliggande skikt måste slänten vara flackare än 1:4.

NV:s krav på att funktionen bibehålls innebär att differenssättningar bör begränsas så att inte tätskiktets funktion äventyras. För ett flexibelt tätskikt kan större differenssättningar tillåtas än för ett styvt tätskikt. FSA är plastiskt och har självläkande egenskaper och kan därför ta upp rörelser i underlaget, dvs. har en eftergivlighet mot förändringar i undergrunden. FSA-materialet tål viss deformation utan att det förlorar sin täthet.

Uttorkning eller frysning kan orsaka *sprickbildning* av tätskiktet och måste därför förhindras. Ett mäktigt skyddslager ($>1,5$ m) med god magasineringskapacitet innebär större möjligheter att behålla fuktigheten.

2.4 Material till tätskikt

FSA (flygkastabiliserat avloppsslam) utgörs av en blandning av flygaska från förbränning av biobränsle och rötat avloppsslam (rötslam). FSA är ett tätskiktsmaterial som kan nyttjas som ensamt skikt eller i kombination med andra tätskiktsmaterial vid sluttäckning av deponier med *icke farligt avfall*. Under optimala förhållanden klarar materialet även krav på 5 mm/år.

I projekt där stora ytor ska sluttäckas är det viktigt att i ett tidigt skede "inventera" tillgång och kvalitet på både askor och avloppsslam. Vissa askor genereras bara under en kort tid på året. Tillgången på aska kan förväntas vara den begränsande faktorn för hur stor yta som kan täckas. Sammantaget behövs en långsiktig planering för att knyta till sig lämpligt material genom avtalsskrivning och för att

vid större materialbehov kunna använda material från flera olika anläggningar och leverantörer.

2.4.1 Råmaterial

Slam

Slam har en naturligt låg hydraulisk konduktivitet (permeabilitet), men inte tillräckligt hög hållfasthet för att fungera som material till tätskikt på deponier. Genom en tillsats av aska kan hållfasthets- och packningsegenskaperna förbättras, samtidigt som blandningen får ett högre pH vilket motverkar biologisk nedbrytning av det organiska materialet.

Slam uppkommer genom mekaniska, biologiska och kemiska processer i våra avloppsreningsverk. Den producerade mängden avloppsslam från kommunala reningsverk uppgår till ca 1 miljon ton (Statistiska centralbyrån, 2004). För att slammet ska bli mer hanterbart, volymerna mindre och för att minska risken för smittspridning stabiliseras och avvattnas slammet. Den vanligaste stabiliseringsmetoden i Sverige är rötning. Vid rötning sker nedbrytning av den del av det organiska materialet som är mest lättnedbrytbart. Det innebär att i ett rötslam är det kvarvarande organiska materialet relativt svårnedbrytbart. Avvattning är mycket viktigt för att slammet ska bli mer hanterbart. Efter avvattning ligger TS-halten normalt på mellan 25–30 %.

Med tanke på tätskiktets beständighet är det endast rötat slam som är aktuellt för användning i tätskiktsapplikation.

Även inom skogsindustrin uppkommer olika typer av slam, som i vissa fall kan utnyttjas för sluttäckning av deponier.

Askor

Varje år genereras ca 1 miljon ton askor i den kommunala avfallsförbränningen, massa- och pappersindustrin, den träbearbetande industrin och från andra energianläggningar (Bjurström, 2006). Askorna är av olika typ och har olika egenskaper. Inom Värmeforsk har en databas, ALLASKA, sammanställts där olika askors egenskaper redovisas. Askornas

egenskaper beror bl.a. på typ av förbränning, bränsle och driftparametrar (t.ex. förbränningstemperatur, eventuella tillsatser). Askan faller antingen ut vid förbränningen som bottenaska eller bäddaska, eller följer med rökgaserna som flygaska och avskiljs med stoftavskiljare.

Flygaska

Utmärkande för flygaskor är dess härdande egenskaper. Materialspecifika faktorer som styr härdningen är bl.a. specifika ytan, CaO-halt och TS-halt (vattenkvot). Det är flygaskans finpartikelhalt, liksom dess höga pH och salthalt (elektrisk konduktivitet) som är intressanta att utnyttja i en FSA-blandning.

Generellt är utlakningen av miljöstörande ämnen lägre i askor från förbränning av bio-, torv och kolbränsle än från förbränning av t.ex. returträ eller avfall. Det innebär att det i första hand är flygaska från biobränsleeldade pannor som är aktuella att använda som tätskiktmaterial. I enstaka fall kan inblandning av bottenaska (som komplement till flygaskan) vara aktuellt för att erhålla tillräcklig hållfasthet i FSA-blandningen.

Användning av torr flygaska är generellt att föredra, eftersom flygaskans egenskaper då utnyttjas bättre, men innebär svårigheter både ur arbetsmiljösynpunkt och ur miljösynpunkt (damning). Dessutom är det svårt logistikmässigt att lagra stora mängder aska torrt, se vidare under avsnitt 4.1.3.

Övriga askor

Beroende på panntyp benämns den aska som faller ut i botten av pannan för bottenaska eller bäddaska. De olika askorna (flyg- respektive bottenaska/bäddaska) kan hanteras separat eller blandas vid utmatningen. Bottenaska har generellt en grövre kornstorleksfördelning.

2.4.2 Laboratorieundersökningar

Slam och aska från olika anläggningar kan ha mycket varierande egenskaper. Att både slammets och askans egenskaper varierar mellan olika anläggningar innebär

att det inte går att ange ett generellt ”recept” för FSA. Kvaliteten på de ingående materialen påverkar blandningens materialegenskaper och därmed även dess täthet och beständighet. Därför ska nya råmaterial och blandningar alltid undersökas med avseende på ett antal olika materialegenskaper.

Om material från flera olika anläggningar ska användas i projektet (t.ex. aska från mer än en förbränningsanläggning) måste egenskaperna hos respektive material undersökas och blandningsrecept för olika råmaterial provas fram.

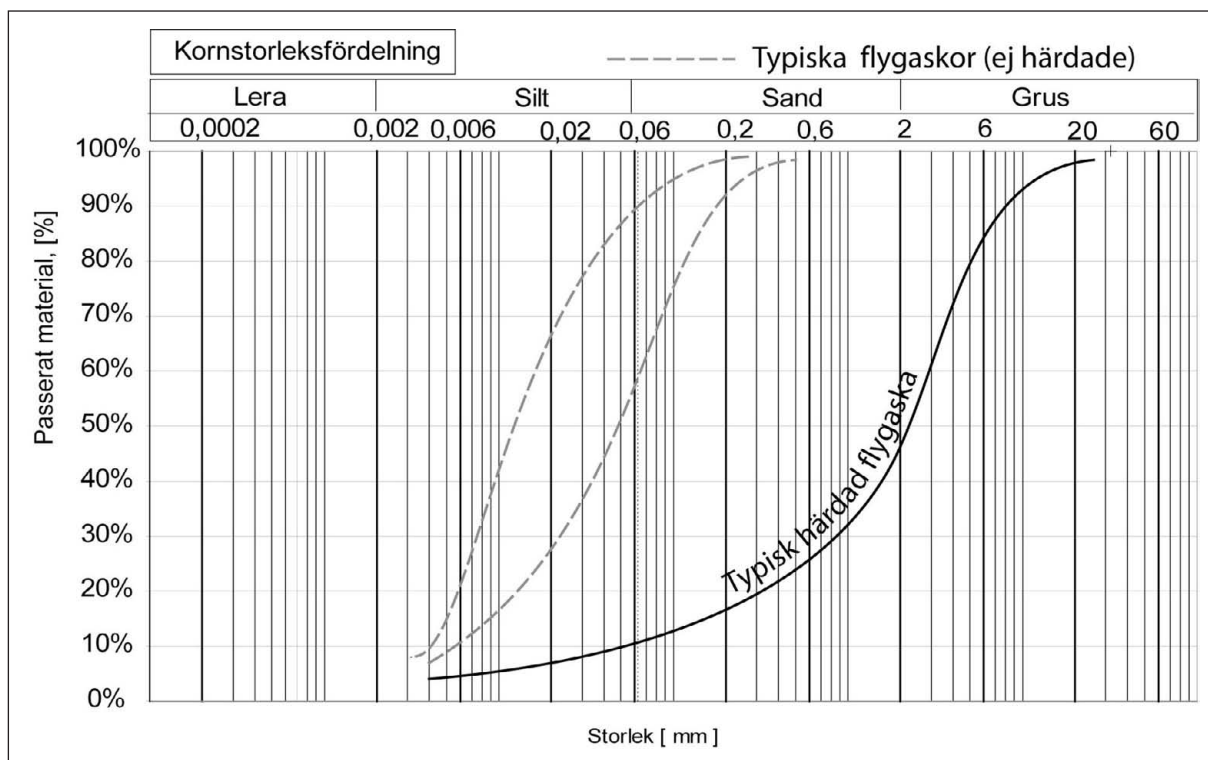
Det är också viktigt att det material som undersöks på laboratorium verkligen representerar det material som kommer att användas i fält, t.ex. för askorna att bränslet är jämförbart och för slammet att TS-halten är ungefär densamma. Hänsyn måste också tas till eventuell lagring av askan och hur pH, TS och härdningsegenskaper kan förändras vid lagring. För att erhålla representativa prover bör lämplig standard användas vid provuttag av råmaterial.

För både slam och aska bör analysresultat från egenkontrollprogram inledningsvis kunna användas för att bedöma råmaterialens miljöegenskaper och möjligheterna att använda materialen för FSA-blandning.

För respektive råmaterial bör det finnas dokumentation kring ett antal material-parametrar, se tabell 2-1:

Även bequerelnivån knuten till cesiumhalten i askan bör kontrolleras innan fullskalig användning, (Möre & Hubbard, 2005). Övriga halter av metaller och organiska ämnen torde inte medföra problem för applikationen som tätskikt. Detta förutsatt att materialet i tätskiktet inte överskrider kriteriekravet för icke-farligt avfall.

Flygaskans pH, elektriska konduktivitet och TS-halt (vattenkvot) är viktiga faktorer som påverkar FSA-materialets geotekniska egenskaper, såväl som dess lakningsegenskaper och beständighet. Ett högt pH och en hög salthalt (elektrisk konduktivitet) innebär att nedbrytningen av det organiska materialet i FSA-blandningen bromsas. En alltför låg TS-halt (hög vattenkvot) medför dels praktiska svårigheter vid hantering av FSA, dels att hållfastheten hos materialet kan bli för låg. Flygaska härdar vid tillsats av vatten, vilket i kombination med längre lagringstid medför att flygaskan blir mer grovkornig, figur 2-1. Detta medför att flygaskan inte kan finfördelas lika effektivt i blandning med avloppsslam och det finns en risk



Figur 2-1. Exempel (principskiss) på typiska kornstorlekskurvor för flygaskor (ej härdade) och härdade flygaskor.

Tabell 2-1. Minimikrav på dokumentation av ingående material.

Parameter	Aska	Slam
Panntyp	x	
Bränsletyp	x	
Volym (ton/år)	x	
Ursprung	x	x
Organiskt kol		x
Glödförlust ^{&}	x	x
TS alt. vattenkvot	x	x
pH	x	x
Elektrisk konduktivitet	x	
CaO (aktiv)	x	
Metaller	x	x
Näringsämnen		x
Organiska föroreningar (PCB, PAH, nonylfenol, toluen)	(x)	x
Kornstorleksfördelning	x	

() beror på materialets lagring, exempelvis material från deponi och behovet av analys varierar från fall till fall.

[&] glödförlust anger både oförbränt och kemiskt bundet vatten.

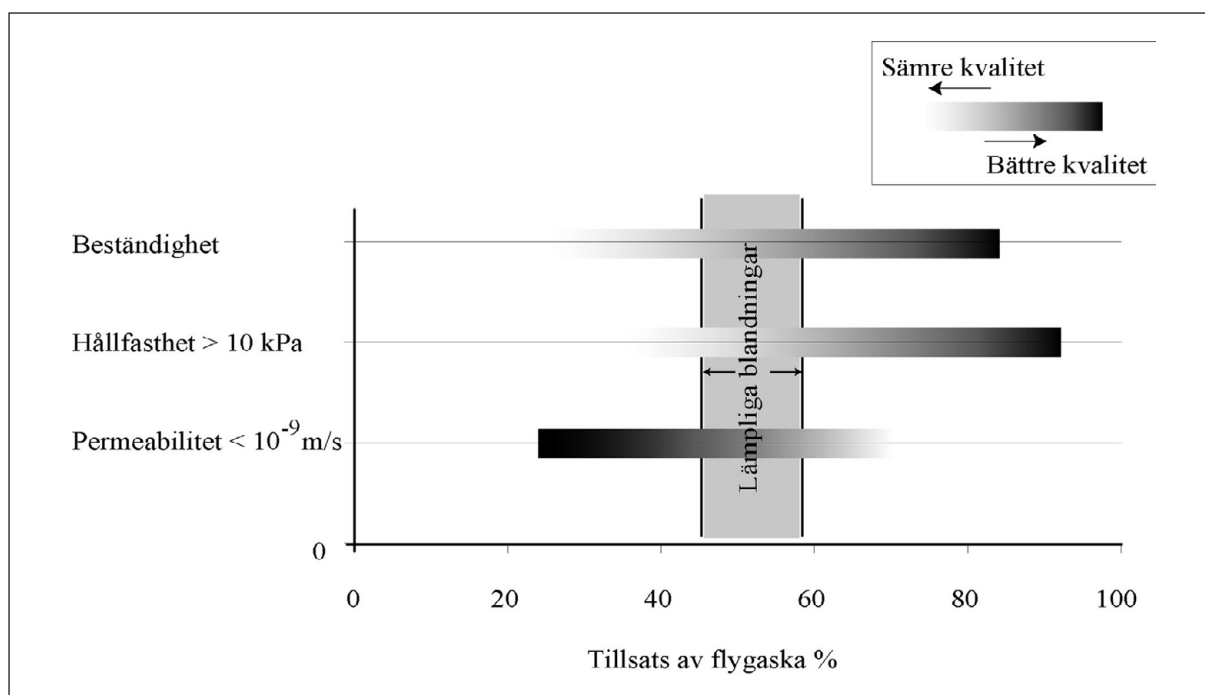
Tabell 2-2. Rekommenderade egenskaper hos råmaterial till FSA.

	Aska	Slam
pH	≥ 11	–
TS (%)	> 60	22–33
Elektrisk konduktivitet	> 1 000 mS/m	–

att FSA-blandningen blir mindre homogen. I tabell 2-2 redovisas krav på pH, TS och elektrisk konduktivitet. Även material som inte uppfyller dessa krav kan vara möjliga att använda för FSA-blandning, men beständighet och hållfasthet för aktuell blandning bör då utredas.

2.4.3 Utprovning av blandningsrecept

Efter att råmaterialens ingående egenskaper dokumenterats och utvärderats (se ovan) provas lämpligt blandningsrecept ut. Blandningar med 45–55 % (uttryckt som torrsvikt) inblandning av flygaska i avloppsslam kan ge ett FSA-material med lämpliga egenskaper med utgångspunkt från täthet, hållfasthet och beständighet, figur 2-2 (nedan). Även inblandning av annan typ av aska (t.ex. bottenaska)



Figur 2-2. Blandningarnas lämplighet med hänsyn till hydraulisk konduktivitet, hållfasthet och beständighet, efter Mácsik et al. (2003).

kan vara aktuell för att erhålla en blandning med rätt egenskaper.

FSA-prover tillverkas med 40–60 % inblandning av flygaska (uttryckt som torrsvikt), och undersöks med avseende på skjuvhållfasthet och hydraulisk konduktivitet. Eftersom flygaskans härdande egenskaper kan påverka både skjuvhållfasthet och hydraulisk konduktivitet i positiv riktning kan det vara av intresse att studera hur egenskaperna förändras med tiden, och efter belastning. Följande parametrar bör undersökas för respektive blandning:

- TS-halt (vattenkvot)
- Skrymdensitet
- Kompression
- Hydraulisk konduktivitet (permeabilitet)
- Skjuvhållfasthet

I Bilaga A beskrivs metoder för att bestämma kompression, skjuvhållfasthet och hydraulisk konduktivitet samt typiska värden för FSA-material. Det är viktigt att i laboratorium undersöka både hur hållfasthet och hydraulisk konduktivitet påverkas av förändrade blandningsförhållanden eftersom detta har betydelse för hur kraven på kvalitetssäkring i fält ska ställas. Detta görs genom att prover med olika blandningsförhållanden undersöks.

I tabell 2-3 ges exempel på hur en provserie kan utformas. Samtliga prover förvaras i kylskåp (7 °C) innan undersökning. Prover som härdar i 28 dagar kan under lagringstiden utsättas för en belastning som motsvarar belastningen i fält. Dubbelprov rekommenderas.

Med utgångspunkt från resultaten från laboratorieundersökningarna väljs aktuell blandning ut, med

Tabell 2-3. Exempel på provserie som tillverkas för bedömning av FSA-materialets egenskaper.

Andel flygaska	Härkningstid (dygn)	Skjuvhållfasthet (kPa)	Kompression (%)	Hydraulisk konduktivitet (m/s)
40	1	x		
	28	x	x	x
50	1	x		
	28	x	x	x
60	1	x		
	28	x	x	x

kravet att blandningen skall ha så låg hydraulisk konduktivitet som möjligt men ändå ha tillräcklig hållfasthet.

FSA-materialets skjuvhållfasthet har betydelse för vilken släntlutning som är möjlig. En ökad andel flygaska ger generellt bättre skjuvhållfasthet. TS-halt (vattenkvot) hos råmaterial och blandning har därvid betydelse. Det innebär att torr flygaska i blandningen med rötslam ger en högre skjuvhållfasthet (τ_{fu}) än en fuktig flygaska.

En ökad andel aska ger dock inte nödvändigtvis en högre hydraulisk konduktivitet (dvs. ett mindre tätt material). Det är snarare askans och slammets inneboende egenskaper än andel aska som styr den hydrauliska konduktiviteten. Däremot kan en relativt måttlig ökning av torrdensiteten för en specifik blandning (t.ex. genom packning eller konsolidering på grund av överlast) ge en betydligt lägre hydraulisk konduktivitet, dvs. ett tätare material.

Packningskurvor på olika FSA-blandningar visar att torrdensitet/packningsegenskaper styrs av TS-halt snarare än inblandad mängd aska. Optimal vattenkvot ligger vanligtvis betydligt lägre än vad som är rimligt att uppnå i fält, med tanke på de ingående materialens TS-halt. Det innebär att det vanligtvis inte är möjligt att uppnå optimal packning i fält. Vid utläggning av skyddsskikt kommer FSA att komprimeras. Om FSA packas vid utläggning, exempelvis med bandfordon, kommer kompressionen hos materialet att vara mindre än om FSA packas med skopa. Kompression kan leda till utpressning av vatten.

Sammanfattningsvis är blandningens TS-halt en kritisk faktor för både hållfasthet, täthet och

praktisk hanterbarhet. Låg TS medför att materialet är blött och svårhanterligt i och med en ”kletig/lerig” konsistens. Höga TS medför att syre kan komma åt materialet med eventuell aerob nedbrytning som följd.

2.5 Konstruktiv utformning

Täckningens främsta uppgift är att begränsa nettoinfiltrationen (dvs. lakvattenbildningen) i deponin. Dimensionering av sluttäckningskonstruktionen görs utifrån krav på infiltrationsbegränsning (täthet), stabilitet, deformation och beständighet.

I tabell 2-4 ges exempel på utformning av en sluttäckning. Förslag på lämpliga material för de olika skikten beskrivs nedan. I bilaga C ges utförda projekt-exempel med detaljerad beskrivning. Beroende på var i sluttäckningskonstruktionen materialet ska användas (ovan, i eller under tätskiktet) kan olika krav på miljöegenskaper såsom utlakning ställas.

2.5.1 Avjämningskikt

Syftet med ett avjämningskikt är att få en stabil arbetsyta för utläggning och eventuell packning av tätskiktet, samt att erhålla önskvärd lutning på sluttäckningen. Lutningen på avjämningskiktet är normgivande för den slutliga ytans lutning.

Tabell 2-4. Exempel på mäktighet och material som kan ingå i en sluttäckning.

Tätskiktsskonstruktion	Mäktighet, m	Exempel
Växtetableringsskikt	0,05	Komposterat slam
Skyddsskikt	> 1,5	anläggningsjord och med möjligt askskikt som rot-penetrationsskydd
Materialavskiljande skikt		sand, grus, geotextil etc.,
Dräneringsskikt	> 0,2	krossat berg
Materialavskiljande skikt		sand, grus, geotextil etc.
Tätskikt (FSA)	0,55 ± 0,05	FSA50 - FSA60
Avjämningskikt	0,3–1	aska + bottensand (med eventuell inblandning av små mängder avloppsslam)
Eventuell gasdräneringsskikt	0,3	slaggrus (ej finmaterial)
Avfall	–	–

Material till avjämningsskiktet kan vara friktionsmaterial av olika typ, t.ex. sand, flygaska, blandaska (flygaska och bottenaska), slaggrus, slam. För att inte torka ut FSA-tätskiktet underifrån är det viktigt att avjämningsskiktet inte utgörs av något grovkornigt, dränerande material.

Avjämningsskiktets tjocklek kan variera mellan 0,3–1 m beroende på t.ex. val av material, risk för sättningar i deponin och risken för uppträngning av grovt avfall som kan skada tätskiktskonstruktionen.

2.5.2 Tätskikt

Det finns inga generella krav på hur tjockt tätskiktet i en sluttäckning ska vara. Tätskikt av FSA-material bör vara minst 0,5 m innan kompression. Tätskiktet ska vara tillräckligt tjockt för att det ska gå att lägga ut materialet. Ett alltför tunt FSA-skikt kan innebära att det blir svårt att hålla en jämn skiktjocklek vid utläggning. Ett tjockt skikt ger också en ”robust” konstruktion som är tillåtande för sättningar, inhomogeniteter i materialet etc.

Två utläggningsstrategier redovisas i denna vägledning (1) FSA-materialet med tillhörande dränerings- och skyddsskikt läggs ut i våder där FSA-skiktet packas enbart med skopa och (2) utlagt FSA-material packas med bandmaskin och skopa innan dräneringsskikt och skyddsskikt läggs ut. I båda fallen är det viktigt att FSA-materialets densitet efter kompression uppnår värden som ger god täthet. Packning med skopa ger en skrymdensitet, ρ , på $< 1 \text{ ton/m}^3$ medan packning med bandmaskin ger ρ ca $1,2 \text{ ton/m}^3$. Vid packning med bandmaskin ska hela ytan packas. Efter kompression som orsakas av skyddsskiktet är den rekommenderade skrymdensiteten större än $1,2 \text{ ton/m}^3$.

I tätskikt som inte packas i fält (1) kommer kompression p.g.a. skyddsskiktets last att medföra att tätskiktet komprimeras avsevärt. Stor mäktighet vid utläggning av tätskiktet medför dock att det i slänter uppstår risk för skred i tätskiktet. Vid dimensionering bör därför både kompression och tätskiktets benägenhet för skred beaktas.

För tätskikt som packas enligt (2) bör utläggning i två delskikt eftersträvas, för att fördela eventuella inhomogeniteter och därmed erhålla en tätare konstruktion. Detta förutsätter dock att den aktuella FSA-blandningen har tillräckligt hög hållfasthet

redan initiiellt, så att det går att köra på materialet.

För beräkning av erforderliga mängder råmaterial till tätskikt av FSA-material, se beräkningsexempel i bilaga B.

2.5.3 Materialskiljandeskikt

Materialskiljande skikt kan med fördel nyttjas mellan FSA-tätskiktet och dräneringsskiktet. Materialskiljande skiktets, geotextilens, sandens etc., primära funktion är att under de första åren, medan sättningar, kompression och materialomlagring pågår, utgöra spärr mot att grovmaterial tränger in i FSA-skiktet och att finmaterial tränger in i dräneringsskiktet.

2.5.4 Dräneringsskikt

Den hydrauliska gradienten över tätskiktet är en av de faktorer som påverkar perkolationen genom skiktet. Ett dränerande lager, i form av ett grovt material, mellan tätskiktet och skyddsskiktet minskar den hydrauliska gradienten och därmed infiltrationen. Exempel på lämpligt material till dräneringsskiktet är krossade produkter. Även olika typer av alternativa konstruktionsmaterial såsom slaggrus kan vara användbara.

2.5.5 Skyddsskikt

Skyddsskiktet, tillsammans med det överliggande växtetableringsskikt, syftar till att befrämja växtlighet, maximera avdunstning och att skydda tätskiktet mot yttre påverkan som kan försämra funktionen. Faktorer som kan påverka beständigheten och därmed funktionen är risken för erosion, uttorkning, frostpåverkan, rotpenetration, biokemisk påverkan och mekanisk påverkan. Både typ av material och skiktets mäktighet påverkar skyddsskiktets egenskaper. Ett väl packat skyddsskikt kan begränsa syretillgången till FSA-tätskiktet och påverkar därmed tätskiktets beständighet. Morän eller annat friktionsmaterial är ofta lämpliga material till skyddsskiktet. Även inblandning av material såsom

behandlad (förorenad) jord, rötslam, olika typer av askor och gjuterisand kan förekomma.

2.5.6 Växtetableringsskikt

Utläggning av växtetableringsskikt och sådd bidrar till att vald växtlighet etablerar sig snabbt. Växtetablering bidrar till att minska erosion på ytor samt att minska den hydrauliska belastningen på dräneringsskiktet. Här kan t.ex. komposterat rötslam användas.

3 Redovisning i bygghandling

En bygghandling bör tas fram som i en Teknisk beskrivning med tillhörande arbetsritningar redovisar den tänkta konstruktionen. Projekteringsförutsättningarna redovisas i den Tekniska beskrivningen. Kontrollplan kan ingå i den tekniska beskrivningen, alternativt utgöra ett separat dokument.

På arbetsritningar bör följande redovisas:

- Detaljplan
- Sektioner i längs- och tvärled
- Släntlutningar
- Genom laboratieförsök fastställda krav på samtliga ingående material (skjuvhållfasthet, friktionsvinkel, vattenkvot, kornfördelning mm)
- Detaljerad principsektion för täckskiktets uppbyggnad med tjocklekar på olika lager
- Särskilda delar av stor vikt för konstruktionen bör redovisas på detaljritning, t.ex. lysimetrar
- Arbetsbeskrivning innehållande arbetsordning och hur arbetet med utläggning, packning och dylikt ska ske.

En mängdförteckning upprättas normalt som underlag för en entreprenad. Den kan kombineras med material- och arbetsbeskrivning. Den upprättas normalt i AMA-systemet.

4 Utförande

I detta avsnitt beskrivs förslag på olika metodiker från transport och lagring av råmaterial till tillverkning och utläggning av FSA. Det ges förslag på kontrollkrav under och efter tillverknings- och utläggningsarbetet. Viktiga arbetsmiljöfrågor lyfts upp. Målsättningen med avsnittet är att kvalitetssäkra råmaterialen och slutprodukten och därmed garantera täthetsfunktionen hos sluttäckningskonstruktionen. Fullskalig användning ska alltid baseras på utförda laboratieförsök med de aktuella råmaterialen. Där det behövs utförs pilotförsök i mindre skala.

Följande arbetsgång förslås för utförandet:

- Utsättning av ytan som ska sluttäckas
- Utläggningen av avjämnningsskikt ovanpå avfallet med projekterad släntlutning
- Tillverkning av FSA material
- Utläggning av tätskikt, FSA-material
- Utläggning av överliggande dräneringsskikt och skyddsskikt
- Utläggning av växtetableringsskikt samt sådd

4.1 Transport och lagring

4.1.1 Transport

Finns det risk för lukt och damning bör transport av rötslam och flygaska från tillverkningsplats till deponi/blandningsstation ske i täckta behållare, åtminstone om transport sker på allmän väg.

4.1.2 Lagring

För att erhålla tillräckligt stora mängder råmaterial kan det bli aktuellt att lagra material. Generellt är det svårt att lagra råmaterial utan att egenskaperna påverkas. Nedan beskrivs olika aspekter att beakta vid lagring av slam och aska. Ett alternativ som kan fungera bättre än att lagra råmaterial är att lagra förblandat material.

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

Lagring av slam

Vid lagring av avloppsslam bör effektiv yta som påverkas av uttorkning, nederbörd och aerob påverkan minimeras. Ett sätt att lagra slammet visas i figur 4-1. Avloppsslam är ett tätt material och lagringstiden skall inte drastiskt förändra materialets TS. Avloppsslam kan lagras på plats i högar före blandning, luktproblem bör dock beaktas. Lagring under vinterförhållanden kan dock medföra frystorkning, vilket kan påverka även materialets tekniska egenskaper.

Lagring av flygaska

Flygaska uppstår i huvudsak under vinterhalvåret. För att få logistiken att fungera och för att erhålla tillräcklig mängd material, kan det därför bli nödvändigt att lagra aska under en viss tid. Lagring av flygaska kan medföra att flygaskans kornstorleksammansättning förändras. Härdning leder till att

flygaskan klumpar ihop till större aggregat. En annan viktig aspekt är att lagring vanligtvis medför att flygaskans TS-halt minskar på grund av nederbörd. Långvarig lagring av flygaska kan medföra att flygaskans pH och salthalt förändras, vilket kan förändra flygaskans och därmed FSA-blandningens geotekniska egenskaper och beständighet. En rekommendation för att minska effekterna av eventuell lagring är att lagra flygaska i silos eller att täcka över den lagrade flygaskan.

Idealet är att flygaska blandas med rötat avloppsslam kort tid efter att flygaskan har befuktats. Vatten tillsätts för att minimera damningsrisken. Vid lagring av befuktad flygaska medför härdning av flygaskan att materialet bildar större aggregat av partiklar och finmaterialhalten minskar. Därmed kan även FSA-materialets egenskaper förändras.

En annan rekommendation är att utföra tillverkning och utläggning av FSA under vår och höst, då det finns tillgång till färsk flygaska och behovet av lagring minskar. Fördelen med våren är att nederbördsmängden är normalt mindre än under hösten. Torrare flygaska till blandningen medför:

- Att FSA-materialets beständighet mot nedbrytning maximeras
- Att FSA-materialets geotekniska egenskaper som bärighet etc. förbättras
- Att damning vid hantering och blandning måste beaktas särskilt noga ur arbetsmiljösynpunkt



Figur 4-1. Exempel på lagring av slam. Limpans bas är ca 6–8 m, höjd ca 3–3,5 m och längd ca 25–30 m, Dragmossens deponi.

Ur transport- och lagringssynpunkt ställer torr flygaska särskilda krav då vindspridning sker extremt lätt med arbetsmiljö- och miljökonsekvenser som följd.

Lagring av förblandat material

Ett alternativt sätt att lagra flygaska och avloppsslam är att materialen direkt vid leverans förblandas med Aluskopa för att fördela flygaska och avloppsslam. Blandningen medför att flygaskan inte kan laka salter och bildning av härdade agglomerat försvåras genom att aska och slam finfördelas vid blandning. Efter lagring med vald blandningsteknik blandas det förblandade FSA-materialet innan utläggning. En effekt av förblandningen är att ändring av FSA-materialets TS inte påverkar blandningsförhållandet. TS skall kontrolleras innan utläggning eftersom FSA-materialets geotekniska egenskaper beror av TS-halten.

Kontroll av TS

Materialens TS-halt är viktig faktor som påverkar blandningsförhållandena och därmed slutprodukten täthet, geotekniska egenskaper och beständighet. Det är därför av stor vikt att materialen har rätt TS-halt under tillverkningsprocessen, dvs. att material nyttjas med likvärdig TS-halt som har undersökts vid laboratorieförsöken, eftersom dessa ligger till grund för bedömningen att nyttja materialet. Högre TS-halt hos avloppsslam innebär att mängden vatten i slammet är lägre. Vid samma våtvikt medför detta att andelen slam ökar jämfört med andelen flygaska. Lägre TS hos flygaskan, vilket kan ske om mer vatten tillsätts till flygaskan vid uttag eller om flygaskan lagras och nederbörd höjer askans innehåll av vatten, medför att samma våtvikt ger lägre andel flygaska. Ur hållfasthets-, kompressions- och beständighets-synpunkt är det viktigt att andelen flygaska, baserat på torrsvikt, är på jämn nivå inom intervallet 50–60 % flygaska. Variationen av TS-halt hos respektive material är därmed viktiga parametrar som påverkar blandningsförhållandet. Detta kan i sin tur påverka blandningskvaliteten och därmed materialets täthet och beständighet.

Lagring av respektive material utförs på ett sådant sätt att ändringar i TS-halt hos materialen under

lagring minimeras. Innan blandning kontrolleras TS hos respektive material. TS används sedan för att avgöra om materialets innehåll av vatten ligger inom det område som är godkänd för tillverkning av tätskikt ur geoteknisk och beständighets-synpunkt. TS används sedan för att bestämma våtviktsandelen så att önskad blandning erhålls.

4.2 Tillverkning av FSA

Tillverkning av FSA sker med blandningsförhållanden som utvärderas och bedöms i laboratorieförsök. De ingående materialens TS och andel baseras på laboratorieundersökning. Exempel på TS hos flygaska är ca 10–100 % och hos avloppsslam 24–33 %. Andelen avloppsslam och flygaska i FSA-blandningen bör ligga mellan 50–60 % baserat på torrsvikt. Samtliga värden är materialspecifika, dvs. ändras från fall till fall och ska bestämmas utifrån utförda laboratorieförsök.

Avloppsslam respektive flygaska kvalitetsgranskas med avseende på vattenkvot (TS-halt). Vattenkvoten är en viktig faktor som styr FSA-materialets hållfasthet och kompressionsbenägenhet. Lämpliga TS-intervall för avloppsslam och flygaska tas fram vid de inledande laboratorieundersökningarna för de aktuella materialen.

Allmänt gäller att på grund av slammets kletiga konsistens kan blandningsförfarandet bli problematiskt. Detta kan åtgärdas med hjälp av höjning av innehållet av flygaska och genom förblandning av flygaska och avloppsslam. Blandningstiden är avgörande för FSA-materialets homogenitet och konsistens. För kort blandningstid medför att blandningen blir inhomogen, med klumpar av avloppsslam täckta av ett lager av flygaska. För lång blandningstid medför att FSA-materialets konsistens blir kletig och svårhanterlig vid utläggning.

Det finns flertalet olika blandningsutrustning som kan anpassas för blandning av flygaska och avloppsslam. Nedan ges det några exempel på olika utrustningar. En och samma metod kan fungera olika väl för olika råmaterial. Det viktiga vid val av utrustning är att den kan ge en homogen blandning och att den har tillräcklig kapacitet.

OBS! FSA med dålig homogenitet, ej utblandade klumpar av aska och slam, och/eller med stor variation i TS ska inte nyttjas i tätskiktet.

4.2.1 Skopblandare

Blandning med exempelvis Aluskopa har en genomsnittlig kapacitet på ca 400 ton/dag. Det har bedömts att tre till fyra blandningar är nödvändiga för att få en homogen blandning som kan nyttjas som tätskiktmaterial. Kapaciteten att tillverka färdigt FSA-material är mellan 100–130 ton/dag. Flygaska och avloppsslam vägs in skopvis och blandas. Fördelen med metoden är att den ger bra blandningskvalitet och är driftsäker. Blandningsinsatsen kan utföras när det finns tillräckligt med material, Aluskopan kan däremellan nyttjas till andra arbetsinsatser.

4.2.2 Tvångsblandare

Blandning med tvångsblandare har en bedömd kapacitet mellan 100–300 ton/dag. Utrustningen nyttjas främst kampanjvis. Grävare med skopa behövs för inmatning av avloppsslam och flygaska i respektive inmatningsficka. Fördelarna med tvångsblandare är att respektive material vägs in kontinuerligt vid inmatning från respektive behållare. Inmatningsfickan för avloppsslam måste anpassas för att undvika igen-sättning. Aluskopa kan användas för att förblanda slam och aska och därmed minska risken för igen-sättning. Vid förblandning förloras dock fördelen att materialen vägs in var för sig.

4.2.3 Stjärnsikt

Aska och slam förblandas med hjälp av skopa (hjul-lastare). Syftet med skopblandningen är att möjlig-göra en noggrannare proportionering av råmaterialen än vad som är möjligt med enbart stjärnsikten. Där-efter körs blandningen genom en stjärnsikt. Genom stjärnsikten bearbetas det förblandade materialet ytterligare så att en homogen blandning erhålls. För att undvika rejekt kan siktbordet justeras och

eventuella större torra klumpar av slammet tas bort i förväg. Dagsproduktionen kan uppgå till omkring 150–180 ton/dag. En maskinist kan då utföra både förblandning med hjullastare, blandning med stjärn-sikt samt ilastning på hjullastare för transport till deponiytan.

4.2.4 Annan blandningsutrustning

Exempel på annan blandningsutrustning som kan fungera är *trumsikt*. Slam och aska matas i trum-sikten med hjälp av hjullastare. Blandningen körs genom trumsikten minst 2 ggr. Proportionering av råmaterial sker genom skopan.

Några andra allmänna rekommendationer:

- Förförsök är lämpliga för att testa att tänkt blandningsmetod fungerar praktiskt.
- Blandningstiden bör optimeras, så att homogen blandning uppnås utan att slammets vatten ”arbetas ut” vilket kan leda till kletig/lerig konsistens
- Utläggning av minst två delskikt rekommenderas, för att fördela eventuella inhomogeniteter och därmed erhålla en tätare konstruktion
- Blandning och utläggning bör ske under våren, då vädret förväntas vara någorlunda torrt och det finns större möjligheter att erhålla relativt färsk flygaska.
- Hantering av ammoniakavgång bör beaktas ur arbetsmiljösynpunkt. Gasvarnare på berörd personal

4.3 Utläggning av FSA och övriga skikt

4.3.1 Stödwall

Runt området som ska sluttäckas kan i vissa fall en vall, s.k. stödwall, av friktionsmaterial byggas (se figur 4-2). Behovet beror på FSA-materialets hållfasthetsegenskaper. Syftet med vallen är att ha en

mothållande kraft vid utläggning av FSA-skiktet. FSA har vanligtvis låg skjuvhållfasthet innan materialet komprimeras. Kompression av materialet ökar dess hållfasthet. FSA-skiktet komprimeras genom dränerings- och skyddsskiktets last. Vallens höjd ska vara i nivå med dräneringslagrets yta. StödvalLEN kan tas bort när angränsande område sluttäcks. Om vallens permeabilitet och tjocklek efter kompression motsvarar FSA-materialets kan vallen lämnas kvar.

4.3.2 Utläggning av FSA, dränerings- och skyddsskikten

På grund av den initialt låga skjuvhållfastheten klarar FSA-materialet normalt inte några större laster. Materialets låga skrymdensitet medför att materialet vid belastning packas och konsolideras. Belastning kan medföra en ökning av skrymdensiteten från 0,8–1,0 ton/m³ till 1,3 ton/m³. Därmed är det viktigt att hela ytan utsätts för samma överfarter om bandmaskin får köra direkt på utlagt FSA-material. I annat fall riskeras ojämna sättningar i FSA-materialet.

Sättning i FSA-skiktet kan härledas till den last som kommer från fordon (bandmaskin) och från dränerings- och skyddsskiktet. FSA-materialets

densitet kontrolleras efter utläggning med hjälp av exempelvis vattenvolymeter eller isotopmätning (t.ex. Troxler). Rekommendationen är att FSA-skiktet täcks direkt med dränerings- och skyddsskikt vilket medför bl.a. att uttorkning och eventuella luktproblem elimineras. Väderleken vid utläggning och packning har stor betydelse. Det är viktigt att begränsa exponering av FSA-tytor för uttorkning, bl.a. för att förhindra sprickbildning. Vid nederbörd blir FSA-materialet blött och kan få en lerig konsistens, vilket försvårar möjligheterna att packa materialet. Det kan bli aktuellt att bevattna ytan efter att dräneringsskikt är installerat, för att förhindra att aerob miljö ska kunna etableras i tätskiktet.

Två utläggningsstrategier har prövats med framgång, (1) FSA-materialet med tillhörande dränerings- och skyddsskikt läggs ut i strängar och FSA-skiktet packas med skopa, figur 4-2 och (2) utlagt FSA-material packas med bandmaskin och skopa innan dräneringsskikt och skyddsskikt läggs ut, figur 4-3. I båda fallen rekommenderas att den utlagda tjockleken kontrolleras mot utplacerade peggars.

(1) Utläggningen sker i vådor mot en stödvall. Metodiken har använts på Lilla Nyby, Eskilstuna och Dragmossens deponi, Älvkarleby. Vid utläggningen av FSA packas det utlagda skiktet med skopa. Våden av FSA täcks med geotextil som materialavskiljande skikt, innan dräneringsgrus läggs ut med tillhörande



Figur 4-2. Exempel: Utlagt FSA-, dränerings- och skyddsskikt, Lilla Nyby, Eskilstuna.



Figur 4-3. Packning av utlagt FSA med bandgående fordon, SRV återvinning.

geotextil. Vådens bredd anpassas till geotextilens bredd. Därefter läggs skyddsskiktet ut, men en 0,2–0,3 m remsa av geotextilen lämnas fritt. Nästa våd läggs ut efter att geotextilen vikts upp och gammalt och torkat FSA-material tagits bort. Därefter installeras tillhörande dränerings- och skyddsskikt, se figur 4-2, och proceduren upprepas. Fordon tillåts på ytan enbart efter att minst 1 m av dränerings-/skyddsskiktet är installerat.

(2) Utläggning sker med hjälp av grävmaskin som bladar ut materialet. Utläggning sker i två lager om ca 25 cm vardera, med packning emellan, Tekniska verken i Linköping, Gärstad. Packning av det utlagda FSA-materialet utförs dels genom att bandgående fordon kör på det utlagda FSA-materialet, dels genom packning med skopa, figur 4-3. På Tekniska verken i Linköping kördes på materialet på det första skiktet men inte på skikt 2. På branta partier (1:4) kan lutningen vara alltför kraftig även för larvgående maskiner och packning bör endast ske med hjälp av skopa. Utläggning av geotextil och dräneringsskikt sker från den färdigställda ytan. Möjligheterna att köra på materialet kan variera. Om bärigheten inte bedöms som tillräcklig för arbetsmaskinerna, måste utläggning av övriga skikt (dräneringsskikt och skyddsskikt) ske etappvis.

4.4 Arbetsmiljö

Arbetsmiljöproblem vid hantering av FSA-material är främst förknippade med ammoniakavgång och damning. Problemen är mycket väderberoende.

Vid blandning av flygaska och slam bildas ammoniak. Ammoniakavgången kan variera beroende på de ingående materialen och bör undersökas innan fullskalig blandning. I samband med nederbörd är avgången störst. Om möjligt bör tillsats av vatten undvikas eftersom vatten i kombination med högt pH bidrar till ammoniakbildning. Vattnets (regnvattnets eller det tillsatta vattnets) pH höjs när det kommer i kontakt med aska. Blandning under regn bör därför undvikas. Ammoniakavgången från FSA-material är också temperaturberoende, vilket innebär arbetet med blandning och utläggning bör utföras under vår och höst då utomhustemperaturen är lägre än på sommaren. Det hygieniska gränsvärdet för NH_3 är 18 mg/m^3 för en arbetsdag (nivågränsvärde) och 35 mg/m^3 för 5 minuters exponering (takgränsvärde) AV 2005:17. Rekommendationen är att personalen använder gasvarnare. Möjligheterna att ta hand om ammoniaken genom kondensering samt s.k. luktnedbrytning bör övervägas. För både

angreppssätten finns etablerade metoder i bl.a. Tyskland vid täckning av restmaterial från saltutvinning (Oeler muntlig uppgift 2004 och Pedersen muntlig uppgift 2004).

Torr flygaska kan utgöra arbetsmiljöproblem genom damning. Befuktning av askan kan minska damningen. Blandningsmaskiner ska utrustas med partikel- och luftfilter.. Då filtren åldras kan fin-kornigt damm ta sig igenom och det är därför viktigt att rätt sorts filter används samt att filtren byts regelbundet.

4.5 Väderlek

Väderleken är en viktig faktor för hur väl blandning och utläggning av FSA-skiktet fungerar. Eftersom TS-halten har betydelse för materialets packningsgrad och hållfasthet är materialet känsligt för både regn och uttorkning. Regn skapar problem, bl.a. för att TS-halt i råmaterial och blandning förändras och materialet blir mer svårhanterligt. Både utläggning och eventuell packning kan försvåras vid regnigt väder.

En rekommendation är att blandning och utläggning om möjligt bör ske i maj eller juni, eftersom vädret då kan förväntas vara någorlunda torrt. Dessutom finns det under denna period av året större möjligheter att erhålla relativt färsk aska.

Man bör undvika att låta tätskiktet ligga exponerat under någon längre tid, eftersom det kan medföra torrsprickor i ytskiktet. Dräneringslagret bör påföras inom någon vecka efter utlagt tätskikt.

Väderleken har också betydelse för eventuella arbetsmiljöproblem (ammoniavgång och damning).

5 Kvalitetskrav och kontroll

Tätskiktets funktion är att den ska begränsa mängden vatten som infiltrerar ner till avfallet. Det innebär att det ställs höga krav på täthet, hållfasthet och beständighet på tätskiktsmaterialet. Sluttäckningen med flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) som tätskiktsmaterial ställer speciella krav på val av material, på blandning och utläggning.

Förutom den kvalitetskontroll som görs på råmaterial och blandning rekommenderas att man verifierar att tätheten är tillräcklig (dvs. att funktionskraven är uppfyllda), t.ex. genom lysimeter eller indirekt genom att jämföra uppnådd torrdensitet och hydraulisk konduktivitet vid CRS-försök vid motsvarande densitet.

Personalens kunskande och engagemang är mycket viktigt för att tätskiktets kvalitet ska kunna säkerställas. Det är därför av stor betydelse att personal som arbetar med tillverkning och utläggning utbildas och att egenkontroll utförs. Det är av vikt att vid utbildningstillfället förklara funktionen hos sluttäckningen, och vilka krav som ska ställas på material och utförande.

En del i kvalitetssäkringen är en noggrann dokumentation av hur arbetet genomförs, t.ex. genom dagbok och foton. Dokumentationen omfattar t.ex. var eventuella skarvar finns, antal skikt, hur utläggning och packning gått till och väderlek. Eventuella fältprotokoll sparas. Exempel på dokumentation av egenkontroll finns i bilaga B. I bilaga D görs en sammanställning av lokala variationer i FSA kvalitet, sluttäckningsutformning och sluttäckningskonstruktion.

Dokumentation kring råmaterialen (se avsnitt 2.3.2) sparas tillsammans med övrig dokumentation kring blandning, utläggning, packning och uppföljning.

5.1 Utförandekontroll/egenkontroll

Utförandekontrollen omfattar kontroll av de ingående materialens TS/w, FSA-materialets homogenitet och TS samt den färdiga produktens skrym- och torrdensitet efter utläggning. Det är viktigt att de kravspecifikationer som tas fram genom de inledande laboratorieundersökningarna följs och dokumenteras. Exempel på egenkontroll redovisas i bilaga B. Det är viktigt att i fältprotokoll dokumentera utförandet, driftstopp, eventuella avvikelser, väderlek, samt att fotografera utförandet.

Homogenitet: mäts med hjälp av hur stora variationer som förekommer hos materialens vattenkvot, w, (torrhalt, TS-halt), glödningsförlust, G och skrym- och torrdensitet, ρ - ρ_d . En stor variation i w, G och ρ eller ρ_d indikerar att materialet inte är homogent.

Information om flygaskans och avloppsslammet TS hämtas in från leverantören. Om materialen lagras under längre tid är det viktigt att utföra ny bestämning av TS. *Typisk kontrollnivå är 1 prov per 100 m³ utlagt material.*

Kontroll av FSA-materialets homogenitet genom okulär bedömning av blandnings-kvalitén. Aska och slam bearbetas vid blandning så att synliga klumpar av slam och aska är homogeniserad. *Med skopblandare uppnås homogenitet efter ca tre till fyra blandningsomgångar. Motsvarande homogenitet uppnås vid tvångsblandare.*

Kontroll av TS-halt i färdigblandat FSA-material samt av torrdensiteten på utlagt (och packat) material. *Typisk kontrollnivå är 1 prov per 100 m³ utlagt material. Kontrollen kan vara tätare vid inkörningsperioder och när störning av produktion förekommer.*

OBS! Viktigt att vid utläggning inte lämna utlagt FSA-material utan täckning av materi alskiljande skikt och dräneringsskikt för att undvika förändring av FSA-materialets TS-halt.

5.2 Efterkontroll (frivillig)

Sluttäckningens uppnådda effekt kan kontrolleras med hjälp av lysimetrar. En rekommendation är att installera lysimetrar, förslagsvis på en yta som utses som provyta. Tömning av lysimetrarna görs efter att dräneringsskiktet är utlagt. Därefter töms lysimetrarna en gång per år, eller vid behov. Fördelen med att använda sig av en provyta är att den ger möjlighet till återkoppling och uppföljning samt att kontakterna med miljömyndigheter underlättas.

Efter sluttäckningens färdigställande görs en avvägning av deponiytan.

5.3 Risker/konsekvenser

Fullskalig användning av FSA ska alltid föregås av laboratorieundersökning och pilotförsök. Damning på grund av torr flygaska, eller dålig lukt från avloppsslammet och/eller ammonium avgång från FSA-blandningen är problem som kan uppmärksammas vid laboratorieundersökning och pilotförsök. Material som orsakar damning och/eller lukt kan påverka omgivning och recipient.

Lagring av aska och slam innan utläggning kan försämra kvaliteten av aska-slamblandningen. Vid lagring kan t.ex. TS-halten påverkas. Utförda analyser vid en av pilotstudierna visade att flygaskans TS-halt sjönk något medan TS-halten i det lagrade slammet i stället var högre. Faktiska mätningar av skjuvhållfasthet och hydraulisk konduktivitet gav emellertid jämförbara resultat jämfört med laboratorieblandade prover på färskt material. Vid lagring påverkas också pH vilket kan innebära en ökad hastighet av nedbrytning av organiskt material. Översiktliga beräkningar av beständighet beräknat på mätningar av förändringar i TS-halter, och syrediffusion i olika typer av material indikerar en snabbare nedbrytning i det lagrade materialet (Carling *et al.*, 2006).

Dålig homogenitet, dvs. klumpar av oblandat slam och aska, kan medföra att tätskiktet inte klarar täthetskravet på 50 mm/år. Tidigare undersökningar visar att skiktets täthet ökar med tiden (Carling *et al.*, 2006; Mácsik *et al.*, 2007). Perkolerande vatten genom tätskiktet medför dock att salter kan lakas

ut i större utsträckning, vilket i sin tur kan äventyra det nedbrytbara organiska materialets beständighet och därmed även tätskiktets funktion.

6 Drift och underhåll

Sluttäckningar med FSA i tätskiktet ska underhållas på sedvanligt sätt.

Om mätutrustning installerats i täckningen som en del i kvalitetskontrollen (t.ex. lysimetrar) görs regelbunden kontroll och avläsning av dessa, främst under de första åren efter sluttäckningens färdigställande. Installerad mätutrustning skall finnas utmärkt på ritning över deponiytan. Stora sättningar i avfallet medför alltid en större påfrestning på tätskiktet, oberoende val av tätskiktsmaterial och konstruktion. Därför ska sättningar alltid åtgärdas och skadat tätskikt repareras. Tätskikt med FSA är förhållandevis enkel att reparera och ansluta till omgivande tätskikt.

Referenser/hänvisning

Bjurström H. 2006: Syntes av delprogrammet ”Miljöriktig användning av askor” för 2002–2005. Värmeforsk rapport 972.

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

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.

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

Mácsik J., Maurice C., Mossakowska A., Eklund C. & Erlandsson Å. 2007: Uppföljning – Kontroll av tätskiktets konstruktionen på Dragmossens deponi. Värmeforsk rapport.

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

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.

Möre H. & Hubbard L-M. 2005: Kommentarer och vägledning till föreskrifter och allmänna råd om hantering av aska som är kontaminerad med cesium-137. SSI Rapport. 2005:07 (www.ssi.se).

Naturvårdsverket 2006: Mottagningskriterier för avfall till deponi. Handbok 2007:1 med allmänna råd till Naturvårdsverkets föreskrifter om deponering, kriterier och förfaranden för mottagning av avfall vid anläggning för deponering av avfall (2004:10).

Naturvårdsverket 2004: Deponering av avfall. Handbok 2004:2 med allmänna råd till förordningen (2001:512) om deponering av avfall och till 15 kap. 34§ miljöbalken (1998:808).

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

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

Pousette K. 2001: *Stabilisering av torv – Olika faktorerers inverkan på stabiliserings-effekten*. Licentiatuppsats 2001:06. Luleå tekniska universitet, avdelningen för geoteknik, Luleå.

Rogbeck J, Bengtsson P-E, Larsson R, Rogbeck Y & Westberg G. 2007: *Deponiers stabilitet, Vägledning för beräkning*, Statens geotekniska institut, Linköping. SGI Information 19.

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

Statistiska centralbyrån 2004: Utsläpp till vatten och slamproduktion 2002. Kommunala reningsverk, skogsindustri samt viss kustindustri. Sveriges officiella statistik. Statistiska Meddelanden MI22 SM0401.

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

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

Sällfors G. 1999: *Geoteknik-Jordmateriallära-Jordmekanik*. Vasastadens bokbinderi AB, Göteborg.

Bilaga A: Laboratorieundersökning och viktiga parametrar

Allmänt

Geotekniska egenskaper hos FSA material beror av de ingående materialens, askans och rötat avloppsslams, egenskaper. Nedan ges exempel på geoteknisk rutinundersökning för att utreda FSA-materialets lämplighet som tätskiktmaterial. Undersökningen kan utföras av geotekniskt laboratorium.

TS/vattenkvot

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

$$w = m_w/m_s$$

Torrsubstansen (TS-halt), TS, är förhållandet mellan materialets torra massa, m_s , och materialets totala massa, m :

$$TS = m_s/m$$

Vattenhalt eller fukthalt, F är förhållandet mellan vattnets massa, m_w , och materialets totala massa, m :

$$F = m_w/m$$

Vattenkvot är ett geotekniskt begrepp. Inom processindustrin används istället begreppet TS-halt. Sambandet mellan vattenkvot och TS-halt är:

$$TS = 1/(1+w)$$

Typisk TS-halt hos laboratorietillverkade prover av FSA-blandning är 40–55 % TS.

Skrymdensitet

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

$$\rho = m/V$$

Skrymdensiteten uttrycks i enheten ton/m³.

Skrymdensiteten ökar med ökande mängd flygaska.

Typisk skrymdensitet hos laboratorietillverkade FSA-prover är 1,2–1,3 ton/m³.

Torrdensitet

Torrdensiteten, ρ_d , definieras som förhållandet mellan det fasta materialets massa, m_s , och materialets totala volym, V :

$$\rho_d = m_s/V$$

Torrdensiteten uttrycks i enheten ton/m³.

Förhållandet mellan torrdensitet och skrymdensitet kan uttryckas:

$$\rho_d = \rho / (1+w)$$

När materialet blir bättre packat ökar successivt materialets torrdensitet. En bättre packad blandning leder normalt till att den hydrauliska konduktiviteten minskar.

Typisk torrdensitet hos laboratorietillverkade FSA-prover är ca 0,5 ton/m³.

Kornstorleksfördelning

Kornstorleksfördelningen beskriver fördelningen mellan olika fraktioner i materialet och bestäms genom siktning och sedimentationsanalys. Kornstorleksfördelningen påverkar bl.a. materialets packningsegenskaper.

Kompression

Kompressionen (ϵ) uttrycker hur mycket materialet komprimerats efter viss tids belastning.

Typiska värden för kompressionen hos FSA-material efter 30 dygns konsolidering är 8–14 %.

Hydraulisk konduktivitet

Permeabilitet är ett mått på hur fort en vätska eller gas kan tränga igenom ett material. Hur tätt eller genomsläppligt ett material är för vatten beskrivs av den hydrauliska konduktiviteten, som är en viktig parameter för ett material som ska användas som tätskikt. Strömningshastigheten bestäms av den hydrauliska gradienten och den hydrauliska konduktiviteten hos materialet. Hydraulisk konduktivitet definieras av Darcys lag som strömningshastigheten vid den hydrauliska gradienten $i=1$.

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{K \cdot h}{l} = K \cdot i \text{ där}$$

Q = genomströmmande vattenmängd per tidsenhet, m³/s

A = tvärsnittsarea, m²

v = skenbar medelströmningshastighet, m/s

K = hydraulisk konduktivitet, m/s

h = skillnad i hydraulisk tryckhöjd på sträckan l , mvp

l = längd i strömningsriktningen med tryckskillnaden h , m

i = hydraulisk gradient, dimensionslös

Ovanstående innebär för ett tätskikt med den hydrauliska konduktiviteten 10^{-9} m/s och gradienten 1 (d.v.s. inget vattentryck över tätskiktet), så blir flödet genom tätskiktet 32 l/år, och vattnets genomsnittliga strömningshastighet genom tätskiktet 3 cm/år.

Den hydrauliska konduktiviteten kan mätas på flera olika sätt i lab, t.ex. genom celltryckspermeameter eller via CRS-försök. För FSA-material är det i första hand CRS-försök som är aktuellt. CRS-försök (Constant Rate of Strain) innebär att ett prov med cylindrisk form deformeras med konstant hastighet. Metoden används i första hand för att bestämma kompressionsegenskaper. Den hydrauliska konduktiviteten kan bestämmas indirekt, och beräknas genom sambandet (Sällfors, 1975):

$$K = \frac{\gamma_w H^2}{2u_b} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \text{där}$$

K = hydraulisk konduktivitet, m/s

γ_w = vattnets tunghet, 10 kN/m³

H = aktuell provhöjd

u_b = aktuellt portryck vid provets odränerade yta, kPa

$\frac{d\varepsilon}{dt}$ = deformationshastigheten, -/s

Typiska värden på den hydrauliska konduktiviteten hos FSA-material, mätt genom CRS-försök, är 10^{-10} – 10^{-9} m/s.

Odränerad skjuvhållfasthet

Den odränerade skjuvhållfastheten beskriver materialets hållfasthet och hållfasthetsutveckling efter kompression (belastning). Hur mycket materialet deformeras vid belastning beror på dess kompressionsegenskaper. Även materialets vatteninnehåll är av betydelse. För stabiliserade material, som flygkastabiliserat avloppsslam, är det intressant att följa hållfasthetstillväxten med tiden.

Den odränerade skjuvhållfastheten bestäms t.ex. genom enaxligt tryckförsök. Provet utsätts för en enaxlig vertikal tryckspänning. Tryckhållfastheten utvärderas direkt ur påförd last och belastad yta. Den odränerade skjuvhållfastheten, τ_{fu} , kan beräknas utifrån erhållet värde för tryckhållfastheten. För lerprover gäller i allmänhet att den odränerade skjuvhållfastheten är halva tryckhållfastheten. Detta beräkningssätt används normalt även för FSA-material. Försöken utförs enligt svensk standard SS 02 71 28-”Geotekniska provmetoder- Skjuvhållfasthet-enaxligt tryckförsök, UU-försök – kohesionsjord”.

Resultat från olika undersökningar visar att det finns stora variationer i den odränerade skjuvhållfastheten mellan olika blandningar och olika typer av flygaska.

Den odränerade skjuvhållfastheten efter 1 dygns härdning kan vara låg, < 10 kPa. Den odränerade skjuvhållfastheten efter 30 dygns härdning ligger i allmänhet mellan 15–40 kPa. För detaljerad information avseende typiska hållfasthetsvärden, se bilaga C.

Bilaga B: Egenkontroll

Inledning

Bakgrund

Tätskiktets funktion är att den ska begränsa mängden vatten som infiltrerar avfallet till mindre än 50 mm/år. Det ställs höga krav på täthet, hållfasthet och beständighet på tätskiktetsmaterial. Sluttäckningen med flygkastabiliserad avloppsslam (FSA) som tätskiktetsmaterial ställer speciella krav på val av material, på blandning och utläggning.

Syfte

Syftet med denna bilaga är att säkra tätskiktets funktion genom att kontrollera och dokumentera FSA-materialets kvalitet.

Metod/tillvägagångssätt

Funktionen kan säkras genom att de ingående materialens, FSA-produktens och utläggningens kvalitet följs upp och dokumenteras.

Utförandekontrollen omfattar kontroll av de ingående materialens TS/w, FSA-materialets homogenitet och TS samt den färdiga produktens skrym- och torrdensitet efter utläggning. Det är viktigt att de kravspecifikationer som tas fram genom laboratorieundersökning följs och dokumenteras. Det är grundläggande att i fälthandbok dokumentera utförandet, driftstopp, eventuella avvikelser, väderlek, samt att fotografera utförandet.

FSA respektive Avloppsslam och flygaska

Avloppsslammets och flygaskans TS-halt är viktig parameter som nyttjas vid bestämning av blandningsmängder. FSA-blandningen som eftersträvas är FSA40–FSA60, dvs. med 40–60 % innehåll av flygaska (TS vikt%). Exakt blandningsproportion och flygaskan respektive avloppsslammets lämplighet bestäms genom laboratieförsök och dimensionering.

Flygaska

Flygaskans TS kan variera mellan olika sändningar beroende på mängden vatten som tillsätts vid uttag. Lagring, speciellt under nederbördsrika perioder, sänker materialets TS. Stor variation i TS kan därmed förekomma. Kontroll av TS bör utföras på samlingsprover. Vid uttag av prov för bestämning av TS bör prov tas i ytskiktet, i mitten och i botten på den lagrade flygaskan. Varje prov bör bestå av tre till fem delprover. Typiska TS-värden varierar mellan 50–90 %.

Avloppsslam

Avloppsslammets *TS* kan variera mellan olika sändningar. Lagring, speciellt under nederbördsrika perioder kan sänka materialets *TS*. Kontroll av *TS* bör utföras på samlingsprover. Vid uttag av prov för bestämning av *TS* bör prov tas i ytskiktet, i mitten och i botten på det lagrade avloppsslammet. Varje prov bör bestå av tre till fem delprover. Typiskt *TS*-värde på slam är mellan 22–33 %.

Tillverkning av FSA

Vid tillverkning av FSA används de ingående materialens *TS*-halter för att få rätt kvalitet på FSA-materialet. Kvalitetskravet är att rätt andel flygaska (torrvikt) ska ingå i blandningen.

Parametrar	Förkortning
Torrsubstans ¹ , %	TS
Fukthalt ² , %	F
Torrsubstansens vikt, g	m_s
Vattnets vikt, g	m_w
Materialets våtvikt ³ , g	m
Vattenkvot ⁴ , %	w

¹ $TS = m_s/m$, där m är materialets våtvikt och m_s är torrsubstansens vikt.

² $F = m_w/m$, där m är materialets våtvikt och m_w är vattnets vikt. ($F = 1 - TS$)

³ $m = m_s + m_w$

⁴ $w = m_w/m_s$ ($w = (1/TS) - 1$ dvs. $TS = 1/(1 + w)$)

Beräkningsexempel: I figur B1 görs två beräkningsexempel. Flygaskans *TS* är 62 %, vilket ger att vattenkvoten, *w* är 61 %. Avloppsslammets *TS* är 26 % (*w* lika med 285 %).

Omvandling av TS till vattenkvot (w)					
Indata	TS %	w	F		
Flygaska (FA)	62 %	61 %	38 %		
Avloppsslam (AS)	26 %	285 %	74 %		
	w	m	ms	mw	FA/AS
FA	61 %	850	527	323	50 %
AS	285 %	2000	520	1480	50 %
FSA	172 %	2850	1047	1803	
Kontrollera	Vattenkvoten varierar (beroende på nederbörd, vattentillsats etc.)				
Ändra (se utdata 2)	Utgå ifrån 2000 kg slam och justera tillsatsen av aska för att uppnå FSA50				
Utdata 1	Vattenkvoten hos FSA produkten.				
Utdata 2	Andelen Flygaska (FA) / avloppsslam (AS) - FA/AS bör ligga runt 50/50				

Figur B1. Beräkningsexempel, FSA50.

För att tillverka FSA50 (50 vikt-% flygaska, torrvikt) blandas 850 kg flygaska [*våtvikt*] med 2 000 kg avloppsslam [*våtvikt*], figur 3-1. FSA-materialets vattenkvot, *w*, direkt efter tillverkning är ca 172 % ($= m_w/m_s$).

OBS! Kvaliteten som eftersträvas bestäms efter utförd laboratorieförsök och dimensionering. Ändras de ingående materialens vattenkvot ska nytt blandningsförhållande räknas fram.

Tabell B1. Avloppsslammets TS-halt. (exempel).

Datum	Flygaska TS	Avloppsslam TS	FSA- kvalitet	FSA TS	FSA TS	Kontrollant
2006-xx-yy	62 %	26 %	FSA50	37 % &	40 % £	XY

& Beräkning enligt figur 3-2.

£ Kontroll i fält.

Utläggning och kontroll

Utläggning

Tätskiktet består av en sandwichkonstruktion, sammansatt av avjämningskikt, tätskikt, dräneringskikt, skyddsskikt och växtetableringskikt. De ingående material med mäktighet redovisas, se tabell 3-1. Deponi-täckningen utförs i celler. Ritningar, materialval och materialtjocklek redovisas.

Tabell B2. Tätskiktskonstruktionens ingående material och mäktighet.

Tätskiktskonstruktion	Mäktighet, m	Kommentar
Växtetableringskikt		
Skyddsskikt		
Dräneringskikt		
Tätskikt		
Avjämningskikt		
Avfall	–	

Det utlagda FSA-materialets TS kontrolleras i 1–2 punkter per 100 m³. Notera att FSA materialets TS bör ligga mellan 36–50 % (w mellan 100–180 %). Låg TS hos materialet medför låg hållfasthet och bärighet. Stor variation hos FSA-materialets TS medför i sin tur att kompressionsegenskaperna hos materialet varierar. Ojämn kompression kan medföra att svackor med vattenansamling kan bildas.

Tabell B3. Tätskiktskonstruktionens ingående material och mäktighet.

Datum	Cell	Våd Provpunkt	FSA- tjocklek	FSA TS	Kontrollant
2005-xx-yy	A	1.1	0,55 m	45 %	PP

Kontroll av FSA-materialets homogenitet genom okulär bedömning av blandningskvalitén. Aska och slam bearbetas vid blandning så att synliga klumpar av slam och aska är homogeniserad. *Med skopblandare uppnås homogenitet efter ca tre till fyra blandningsomgångar. Motsvarande homogenitet uppnås vid tvångsblandare.*

Homogenitet: mäts med hjälp av hur stora variationer som förekommer hos materialens vattenkvot, w, (torrhalt, TS-halt), glödningsförlust, G och skrym- och torrdensitet, ρ - ρ_d . En stor variation i w, G och ρ eller ρ_d indikerar att materialet inte är homogent.

Tabell B4. Tätskiktets materialets densitet efter utläggning och eventuell packning.

Datum	Cell	Provpunkt	FSA-skrymdensitet	w	Torrdensitet	Kontrollant
2005-xx-yy	A	1.1	0,55 m	45 %	45 %	PP

Installation och kontroll av lysimetrar

Lysimetrarnas placering mäts in. Ange datum för installation, kontrollmätning och beräknad permeabilitet vid varje mätning. Bifoga karta över lysimetrarnas placering. Lysimeterlådans yta anges i m².

Tabell B5. Lysimeterundersökning. Lysimeterlådans yta är 0,12 m².

Datum		Lysimeter-nummer	Mängd vatten [liter]	Täthet [mm/år] ⁵	Kommentarer ^{\$}
Start	Slut				
2005-11-01	2006-05-03	1	1	1/(0,12*0,5) $\approx$ 17	pH, konduktivitet, DOC

^{\$} Eventuella analyser etc.

⁵ Ekvationen för beräkning av tätheten uttryckt i mm infiltrerat vatten per år.

$$\frac{\text{mängd vatten [liter]}}{\text{Lysimeter yta [m}^2\text{]}} \cdot \frac{\text{antal dagar}}{365} = [\text{liter/m}^2 \text{ och år}] \text{ eller } [\text{mm/år}]$$

Övriga kommentarer: Beräkning av tätskiktets täthet baserat på mängd vatten som samlas upp görs genom följande ekvation:

$$Täthet = \frac{V}{A \cdot \Delta t} \text{ [mm/år]}$$

där A är lysimeterlådans yta i m^2 , Δt är tiden mellan den aktuella tömningen t_{start} och den senaste tömningen t_{slut} uttryckt i år och V är volymen vatten i liter som samlades upp i lysimetern under mätperioden. Tätheten uttrycks som mm/år eller $\text{liter/m}^2 \text{ och år}^4$.

Avvägning av deponins yta

Här dokumenteras avvägningen som görs efter det att avjämningskiktet har installerats. Inmätt höjd och lutningar kontrolleras mot det projekterade. Eventuella avvikelser åtgärdas innan resten av tätskiktet installeras.

Bedömning av erhållna resultat

Resultat från bl.a. kontroll av lysimeter redovisas och en bedömning av erhållna resultat redogörs. Detta görs årligen.

Bilaga C1: Exempel på utförda objekt – Tekniska Verken i Linköping

Plats

Gärstad deponi, Tekniska Verken i Linköping

Beskrivning av projekt

Pilotförsök

Storlek

5 500 m²

Tidpunkt för genomförande

September–oktober 2004

Täckningens utformning

Täckningens olika delar redovisas i tabell C1-1.

Tabell C1-1. Täckningens olika delar.

Skikt	Mäktighet	Material
Växtetableringsskikt	–	
Skyddslager	1,3 m	Oljeskadad jord (behandlad), metallförorenad jord samt ospecificerade schaktmassor
Dräneringslager	0,2 m	Slaggrus/bergkross
Tätskikt	0,5 m	Slam/flygaska (50%/50%)
Avjämningslager	varierande	Slaggrus
AVFALL		Rökgasreningsrest

Över tätskiktet lades ett materialskiljande slikt i form av geotextil. Som dräneringslager användes bergkross på en delyta och slaggrus på en delyta. Som jämförelse användes också en delyta utan dräneringslager. Provytan består av en flack del (lutning 1:20) och en brantare del (lutning 1:3).

Råmaterial – blandningsrecept

Råmaterialen till FSA-tätskiktet utgjordes av rötslam från Tekniska Verken samt flygaska från rostereldning av kol/gummi (Tekniska Verken panna KV1 P1).

Med utgångspunkt från resultat från laboratorieundersökningar valdes blandningen 50 % flygaska + 50 % rötslam.

Ett urval av resultaten från de inledande laboratorieundersökningarna presenteras i tabell C1-2 (nästa sida).

Tabell C1-2. Resultat från inledande laboratorieundersökningar.

50 % flygaska + 50 % rötslam	
Torrdensitet (t/m ³)	0,49
TS-halt (%)	40
Skjuvhållfasthet dag 1 (kPa)	18
Skjuvhållfasthet dag 30 (kPa)	24
Hydraulisk konduktivitet (m/s)	1,4 · 10 ⁻¹⁰

Uppmätta kvalitetsparametrar på råmaterialen som användes i fält redovisas i tabell C1-3.

Tabell C1-3. Uppmätta kvalitetsparametrar i råmaterial och blandning till FSA-tätskikt vid Tekniska Verken i Linköping.

	pH	TS (%)
Rötslam	–	27–37
Flygaska	12*	57–67
FSA-blandning (fält)	9,2	39–50

* laborativvärde från egenkontroll, ej uppmätt i fält.

Transport och lagring av material

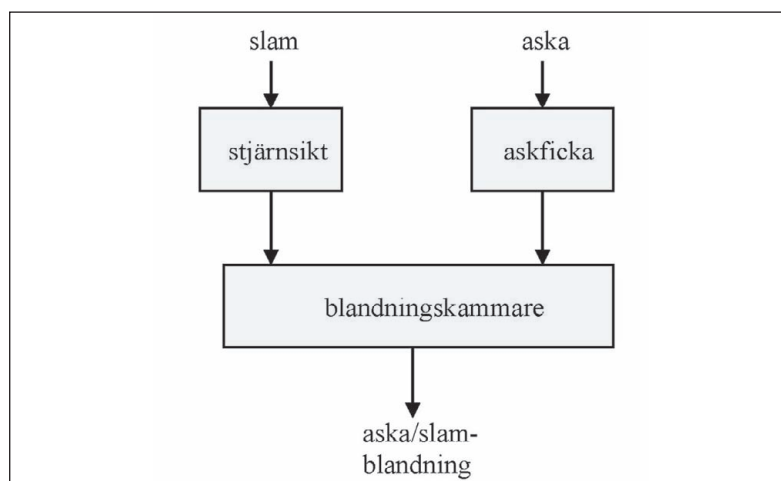
Den torra flygaskan (TS-halt 98 %) kördes i bulkbil till en plats nära den blivande provytan. Askan lagrades där utomhus i ett par månader. Under lagringen var askan täckt med plast. Efter lagring hade TS-halten i askan sjunkit till 57–67 %.

Även slam lagrades under ett par månader (sommartid) utomhus i två högar. TS-halten i slammet varierade efter lagringen mellan 27–37 %.

Utförande

Blandning

Den utrustning som användes vid Tekniska Verken var ett modifierat asfaltverk, speciellt ombyggt för ändamålet. Blandningen skedde enligt flödesschemat i figur C1-1.



Figur C1-1. Flödesschema för blandning vid Tekniska Verken i Linköping.

Slammet matades via en stjärnsikt till ett transportband (figur C1-2). Askan matades direkt via en askficka till ett annat transportband. Transportbandet ledde till en blandningsstation där omblandning av råmaterialen skedde med hjälp av skovlar. Dosering av råmaterial skedde grovt genom en kontinuerlig vägning av råmaterialen och manuell justering av transportbandens hastighet. I slutet av blandningsperioden hade man problem med att askfickan satte igen och då gjordes förblandning med skopa och materialet matades via stjärnsikten på ett gemensamt transportband till blandningsstationen.



Figur C1-2. Utmatning av slam från stjärnsikten till transportbandet.

Utläggning och packning

Den färdiga materialblandningen transporterades med dumper från blandningsstationen och tippades på provytan. På provytan användes en grävmaskin som bladade ut materialet. Under första delen av anläggningsperioden kunde grävmaskinen köra på materialet, men under senare delen var bärigheten inte tillräcklig (delvis beroende på ihållande regn). Utläggningen skedde i två lager om ca 25 cm vardera, med packning emellan. Packning skedde dels med bandgående grävmaskin, dels med skopa. På provytans branta parti var lutningen alltför kraftig för maskinen och packning skedde endast med skopa, se figur C1-3. Även väderleken bidrog till att packningsarbetet endast kunde utföras med skopa.



Figur C1-3. Packning med skopa i slänt.

Efter att tätskiktet lagts färdigt, lades övriga skikt på (geotextil, dränlager och skyddslager). Utläggningen av skyddsskiktet försvårades av att bärigheten var begränsad och endast larvgående maskiner kunde användas. Grövre massor användes till att bygga transportvägar ut på ytan för dumprarna.

Arbetsmiljö

Lukt av ammoniak uppstod inom en radie av ca 3 m från blandningskammaren. Lukttröskeln för ammoniak ligger i samma storleksordning som hygieniska gränsvärdet för en arbetsdag (lukttröskel 7–22 mg/m³; nivågränsvärde för en arbetsdag 18 mg/m³). Damning från torr flygaska förekom vid vissa vädersituationer.

Kvalitetssäkring

Med utgångspunkt från resultaten vid de inledande laboratorieundersökningarna ställdes krav på torrdensitet på packad yta. Kravet på lägsta torrdensitet valdes ut utifrån uppnådd hydraulisk konduktivitet (10^{-10} m/s alternativt 10^{-9} m/s) vid CRS-försök. Torrdensiteten i det packade tätskiktet undersöktes med hjälp av isotopmätning. Vid ca 76 % av mätpunkterna uppfylldes materialkravet >0,54 t/m³ (motsvarande den hydrauliska konduktiviteten 10^{-9} m/s vid de inledande CRS-försöken).

En enkel kvalitetskontroll skedde också genom att TS-halten i den färdiga blandningen mättes regelbundet under blandningsförfarandet.

I tabell C1-4 sammanfattas resultaten från kvalitetskontrollen i fält.

Tabell C1-4. TS-halt i färdig blandning och torrdensitet på packat tätskikt.

FSA-blandning	
TS (%)	39–50
TS (%), medel	43
Torrdensitet (t/m ³)	0,41–0,71
Torrdensitet (t/m ³), medel	0,57

Uppföljning

Då provytan anlades installerades också olika typer av mätutrustning för att möjliggöra uppföljning av provytans funktion. För närvarande (april 2007) pågår ett längre uppföljningsprojekt, som kommer att slutredovisas i december 2008.

De preliminära resultaten från uppföljningen visar att tätskiktet är tätt. Under delyta där dräneringslager finns, uppgår den infiltrerade mängden vatten till <5 l/m² och år. Två stickprov från tätskiktet ett år efter utläggning visade på en hydraulisk konduktivitet på $2 \cdot 10^{-9}$ m/s, beräknat utifrån CRS-försök. Sättningsmätningar har visat på små rörelser i tätskiktet.

Under 2005 utfördes gasmätningar i täckningens olika skikt. Slutsatsen från dessa mätningar tillsammans med uppmätta pH för färsk och åldrad blandning är att det sannolikt pågår en omsättning av det organiska materialet på provytan. Detta studeras nu vidare i uppföljningsprojektet.

Referenser

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. (*även som Värmeforsk-rapport 948, RVF-rapport 06:04*)

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

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

Värmeforsk-projekt Q6-607/VA-Forsk-projekt 26-109: Fortsatt uppföljning av provytor med tätskikt av slam/aska-blandning (pågående projekt, utförs av Geo Innova, Tekniska Verken i Linköping och SRV återvinning).

Bilaga C2: Exempel på utförda objekt – SRV återvinning i Huddinge

Plats

Sofielunds återvinningsanläggning, SRV återvinning i Huddinge

Beskrivning av projekt

Pilotförsök

Storlek

Ca 1000 m²

Tidpunkt för genomförande

Juni 2005

Täckningens utformning

Täckningens olika delar redovisas i tabell C2-1.

Tabell C2-1. Täckningens olika delar.

Skikt	Mäktighet	Material
Växtetableringsskikt	–	
Skyddslager	0,5 m	ospecificerade schaktmassor
Dräneringslager	0,3 m	bergkross 4–8 mm
Tätskikt	0,4 m	Slam/flygaska/bottenaska (15 %/40 %/45 %)
Avjämningslager	ca 1 m	Sorterad bottenaska fr avfallsförbränning
AVFALL		Sorterat grovavfall från hushåll och företag (icke farligt avfall)

Över tätskiktet lades ett materialskiljande skikt i form av geotextil.

Provytan består av en flack del (lutning 1:40) och en brantare del (lutning 1:4).

Råmaterial – blandningsrecept

Råmaterialen till FSA-tätskiktet utgjordes av rötslam från Himmerfjärdsverket (Stockholm Vatten) samt flygaska och bottenaska från bubblande fluidbäddpanna med förbränning av RT-flis (Fortum Värme, Nynäshamn).

Vid de inledande laboratorieundersökningarna visade prov med enbart blandning av flygaska och rötslam på alltför dålig hållfasthet. Kompletterande försök med inblandning av bottenaska gjordes då. Med utgångspunkt från resultat från laboratorieundersökningar valdes blandningen 40% flygaska + 45 % bottenaska + 15 % rötslam.

Ett urval av resultaten från de inledande laboratorieundersökningarna presenteras i tabell C2-2.

Tabell C2-2. Resultat från inledande laboratorieundersökningar.

	40 % flygaska + 45 % bottenaska + 15 % slam
Torr densitet (t/m ³)	0,8
TS-halt (%)	57
Skjuvhållfasthet dag 1 (kPa)	9,9
Skjuvhållfasthet dag 30 (kPa)	25
Hydraulisk konduktivitet (m/s)	1•10 ⁻⁹

Uppmätta kvalitetsparametrar på råmaterialen som användes i fält redovisas i tabell C2-3.

Tabell C2-3. Uppmätta kvalitetsparametrar i råmaterial och blandning till FSA-tätskikt vid SRV återvinning i Huddinge.

	pH	TS (%)
Rötslam	–	22–25
Flygaska/bottenaska	12,4*	87–90
FSA-blandning (fält)	10,2	47–64

*endast flygaska

Transport och lagring av material

Den obefuktade flygaskan kördes i bulkbil till en silo vid den betongblanderstation som finns inom Sofielunds återvinningsanläggning. Bottenaskan (bäddaska) levererades i lastväxlarcontainer och tippades på lagringsyta i anslutning till blandarstationen. Vid fem olika tillfällen (med ca en veckas mellanrum) gjordes en förblandning av flygaska och bäddaska i blandarstationen samtidigt som befuktning skedde. Syftet var i första hand att dammbinda flygaskan. Blandningen skedde i betongblanderstationen (sluten satsblandare) med automatisk invägning av respektive material. Blandningstiden uppgick till 0,5–1 minut. Det förblandade materialet (befuktad askblandning) lagrades därefter på lagringsyta i anslutning till blandarstationen.

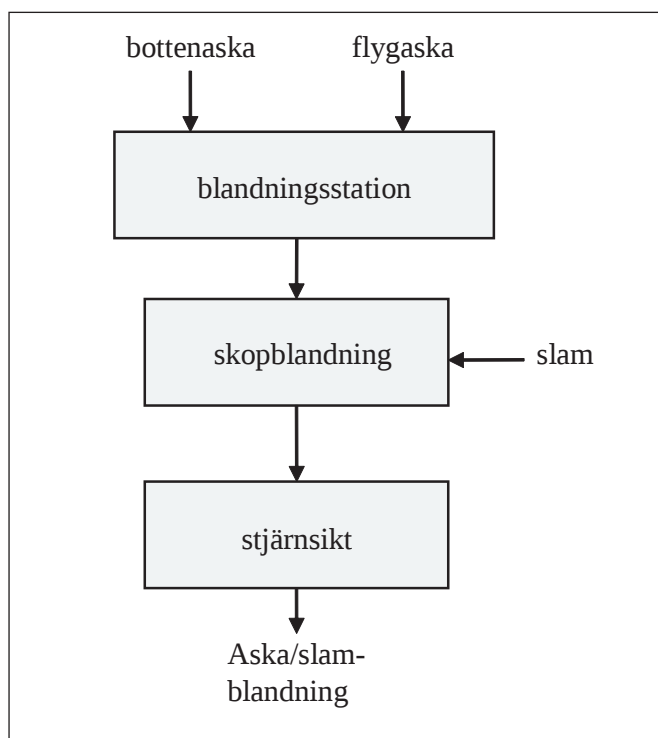
Slammet transporterades på lastbilsekipage med totalt tre lastväxlarflak. Slammet tippades på hårdgjort yta i närheten av blandarstationen.

Utförande

Blandning

Blandningsförfarandet vid SRV återvinning illustreras av flödesschemat i figur C2-1.

Bottenaska och flygaska blandades först i en särskild blandningsstation (enligt beskrivning på nästa sida). Askblandningen lagrades därefter i hög. Slam och askblandning grovblandades sedan med skopa med hjälp av lastmaskin, varefter hela blandningen kördes en gång genom en stjärnsikt, se figur C2-2. Rejektet återfördes till sikten. Proportioneringen av de två askorna skedde genom invägning, medan proportionerna vid inblandning av slam skedde med hjälp av skopa. Inledningsvis blandades två skopor slam och en skopa askblandning. Efter okulär besiktning ändrades proportionerna till 2,5:1, vilket gav en något ”blötare” blandning. Blandningen fungerade i stort sett väl och gav ett relativt homogent material, men med inslag av ”asköverdragna slamkuler”. Vid utläggning och packning smetades dessa slamkuler ut. Efter blandning kördes materialet direkt upp till provytan för utläggning och packning.



Figur C2-1. Flödesschema för blandning vid SRV återvinning.



Figur C2-2. Blandning av aska och slam i stjärnsikt vid SRV återvinning.

Utläggning och packning

Det färdigblandade materialet transporterades med lastbil från området med blandningsstationen och stjärnsikt till provytan. På provytan blandade en grävmaskin ut materialet i två lager om ca 20 cm vardera, med packning emellan. Materialet hade tillräcklig bärighet för att kunna köras på med grävare med larvfötter.

Packning skedde dels genom att maskinen körde över materialet, dels med hjälp av skopa. I slänten fungerade packning med larver endast bitvis eftersom banden sattes igen av material som häftade vid, med slirning som följd. Däremot fungerade packning med skopa bra. På den övre plana ytan provades även släntvältning (dragen av lastmaskin), men försöket avbröts då lastmaskinen gjorde djupa spår i ytan.

Då tätskiktet lagts ut, lades geotextil, dränlager samt skyddslager på. Utläggningen av dräneringsmaterialet fick inledningsvis göras från kanten, eftersom ytan med tätskikt inte bar lastbilen med dränsiktmaterial. För att lägga ut dränmaterial i slänten fick del av skyddsskiktet läggas ut ovanpå dränsiktet på provytans plana del, och användas som väg för dumpern att köra in material på.



Figur C2-3. Utläggning av FSA-blandning.

Arbetsmiljö

Lukt av ammoniak uppstod vid blandningen och gav upphov till obehag hos personalen. Mätningar med diffusionsprovtagare uppvisade halter av mellan 6 och 27 mg/m³ vid blandningsutrustningen, hygieniskt gränsvärde för en arbetsdags exponering är 18 mg/m³ och 35 mg/m³ för 5 minuters exponering. Metoder att eliminera ammoniak är väl kända.

Kvalitetssäkring

Med utgångspunkt från resultaten vid de inledande laboratorieundersökningarna ställdes krav på torrdensitet på packad yta. Kravet på lägsta torrdensitet valdes ut utifrån uppnådd hydraulisk konduktivitet (10⁻¹⁰ m/s alternativt 10⁻⁹ m/s) vid CRS-försök. Torrdensiteten i det packade tätskiktet undersöktes med hjälp av isotopmätning. Vid samtliga mätpunkter uppfylldes materialkravet >0,79 t/m³ (motsvarande den hydrauliska konduktiviteten 10⁻⁹ m/s vid de inledande CRS-försöken).

En enkel kvalitetskontroll skedde också genom att TS-halten i den färdiga blandningen mättes regelbundet under blandningsförfarandet.

I tabell C2-4 sammanfattas resultaten från kvalitetskontrollen i fält.

Tabell C2-4. TS-halt i färdig blandning och torrdensitet på packat tätskikt.

FSA-blandning	
TS (%)	47–64
TS (%), medel	56
Torrdensitet (t/m ³)	0,80–1,1
Torrdensitet (t/m ³), medel	0,92

Uppföljning

Då provytan anlades installerades också olika typer av mätutrustning för att möjliggöra uppföljning av provytans funktion. För närvarande (april 2007) pågår ett längre uppföljningsprojekt, som kommer att slutredovisas i december 2008.

De preliminära resultaten från uppföljningen visar att tätskiktet är tätt och att den infiltrerade mängden vatten uppgår till <5 l/m² och år.

Under 2005 utfördes gasmätningar i täckningens olika skikt. Resultaten är något svårtolkade, men troligen sker viss nedbrytning av det organiska materialet i tätskiktet. Detta studeras nu vidare i uppföljningsprojektet. Även mätning av eventuella sättningar kommer att utföras.

Referenser

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. (*även som Värmeforsk-rapport 948, RVF-rapport 06:04*)

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

Sundberg J. & Nilsson U. (2001): Användning av avloppsslam som tätning för deponier. Förstudie. RVF-rapport 01:17.

Värmeforsk-projekt Q6-607/VA-Forsk-projekt 26-109: Fortsatt uppföljning av provytor med tätskikt av slam/aska-blandning (pågående projekt, utförs av Geo Innova, Tekniska Verken i Linköping och SRV återvinning

Bilaga C3: Exempel på utförda objekt – Dragmossen, Älvkarleby

Plats

Dragmossens deponi, Älvkarleby kommun.

Beskrivning av projekt

Pilotförsök.

Storlek

2 400 m².

Tidpunkt för genomförande

Provytan installerades under maj 2004, utförd av Econova. Under 2006 utförde Econova ytterligare sluttäckning av ett ca 10 000 m² stort område med FSA i anslutning till provytan.

Täckningens utformning

Täckningens olika delar redovisas i tabell C3-1.

Tabell C3-1. Täckningens olika delar.

Skikt	Mäktighet	Material
Växtetableringsskikt	0,2 m	Kompostjord
Skyddslager	1,0 m	Återvunnen jord och fibermull
Skyddslager	0,5 m	Återvunnen jord (morän)
Dräneringslager	0,1 m	Slaggrus/Sand
Tätskikt	0,55 m	FSA45 resp. FSA50 ^{&}
Avjämningslager	Varierande (0,5–1,5 m)	flygaska
AVFALL		Hushållsavfall

[&] FSA45 – 45 % flygaska på TS vikt.

FSA50 – 50 % flygaska på TS vikt.

Som dräneringslager användes sand på en delyta (cell 4) och slaggrus på resten av provytan. Som jämförelse användes också en delyta utan dränsikt.

Provytan består av har en släntlutning mellan 1:10 och 1:24.

Råmaterial – blandningsrecept

Råmaterialen till FSA-tätskiktet utgjordes av rötat avloppsslam från Bromma, Stockholm Vatten AB och flygaska från biobränsle (Mälarenergi Västerås) samt flygaska från torv och trä förbränning (Vattenfall AB, Värme Uppsala).

Uppmätta kvalitetsparametrar på råmaterialen som användes i fält redovisas i tabell C3-2.

Tabell C3-2. Uppmätta kvalitetsparametrar i råmaterial och blandning till FSA-tätskikt på Dragmossens deponi, Älvkarleby.

	pH	TS (%)
Rötat avloppsslam	–	28–37 (31)
Flygaska, Mälarenergi	12*	68–94 (86)
Flygaska, Vattenfall	12*	72–90 (78)
FSA, Mälarenergi (fält vid utläggning)	9,2*	40–46 (43)
FSA, Vattenfall (fält vid utläggning)	9,2*	35–52 (46)

* laboratorievärde från egenkontroll, ej uppmätt i fält.

Medelvärde anges i parantes.

Med utgångspunkt från resultat från laboratorieundersökningar valdes blandningen 45–50 % flygaska + 50–55 % rötat avloppsslam.

Ett urval av resultaten från de inledande laboratorieundersökningarna presenteras i tabell C3-3.

Tabell C3-3. Resultat från inledande laboratorieundersökningar.

	45–50 % flygaska + 50–55 % avloppsslam
Torr densitet (t/m ³)	0,5–0,6
TS-halt (%)	40–50
Skjuvhållfasthet dag 1 (kPa)	8–13
Skjuvhållfasthet dag 30 (kPa)	19–20
Hydraulisk konduktivitet (m/s)	5*10 ⁻¹⁰

Transport och lagring av material

Flygaskorna kördes i bulkbil till Dragmossens deponi från Västerås respektive Uppsala. Flygaskorna nyttjades inom några dagar efter avlastning. Flygaskorna skyddades inte under denna lagringstid. Flygaskorna TS redovisas i tabell C3-2.

Det rötade avloppsslammet från Bromma lagrades under ett par veckor utomhus i två högar. TS-halten i slammet varierade efter lagringen mellan 28–37 %, se tabell C3-2.

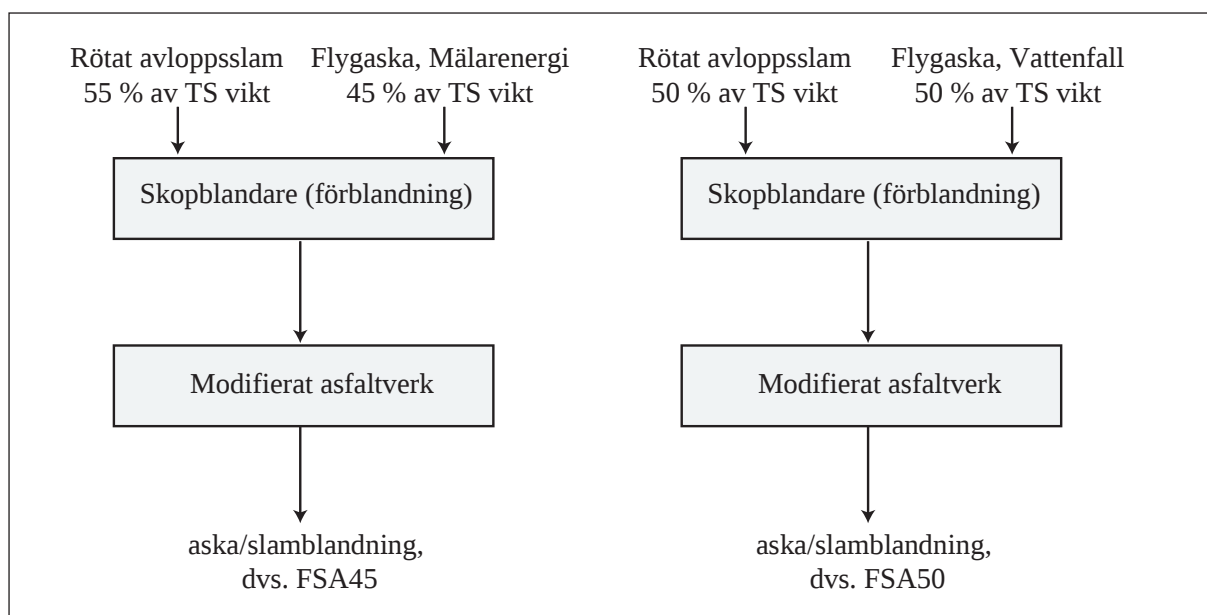
Utförande

Blandning

Den utrustning som användes på Dragmossens deponi var en skopblandare och ett modifierat asfaltverk, speciellt ombyggt för ändamålet.

Dosering av råmaterial skedde först med skopa och genom kontinuerlig vägning av råmaterialen i skopan och avstämning mot respektive materials TS-halt. Blandningsförhållandet var 50 % TS flygaska och 50 % TS rötat avloppsslam. Det fördoserade materialet förblandades sedan med hjälp av skopblandare och lastades in på transportband för slutlig blandning i det modifierade asfaltverket. Blandningen skedde enligt flödes-schemat i figur C3-1 (se nästa sida).

Transportbandet ledde till en blandningsstation där omblandning av det förblandade materialet skedde med hjälp av skovlar. Förblandningen utfördes eftersom blandningen från slam- och askfickorna var problematisk pga. igensättning.



Figur C3-1. Flödesschema för blandningar på Dragmossens deponi, Älvkarleby.



Figur C3-2. Exempel: Utlagt avjämningskikt, FSA-, dränerings- och skyddslager, Dragmossen, Älvkarleby.

Utläggning och packning

Tätskiktsmaterialet av flygaskastabiliserat 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), figur C3-2. 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.

Kvalitetssäkring

Med utgångspunkt från resultaten vid de inledande laboratorieundersökningarna ställdes krav på TS på ingående material och FSA, se tabell C3-2. Kontrollen av torrdensitet utfördes för att få information om blandningens homogenitet. Målsättningen var att efter kompression uppnå en torrdensitet (torr skrymdensitet) på ca 0,65 ton/m³. Kompressionen orsakades av lasten från skyddsskiktet.

Torrdensiteten i tätskiktet undersöktes med hjälp av vattenvolymeter. I tabell C3-4 sammanfattas resultaten från kvalitetskontrollen i fält.

Tabell C3-4. TS-halt i färdig blandning och torrdensitet på packat tätskikt.

FSA-blandning	
TS (%)	42–48
Torrdensitet (t/m ³)	0,47–0,57

Uppföljning

Då provytan anlades, installerades även vatten och gaslysimetrar för att följa upp de olika provvyternas funktion och beständighet. Uppföljningsarbetet redovisas i Mácsik *et al.* (2007).

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. Den största delen av kompressionen sker under de första månaderna efter att skyddsskiktet blev installerat. 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. Vidare visar undersökningen att lakvattnet från FSA-materialet har oförändrad konduktivitet, pH och DOC efter drygt 2 år. Baserat på erfarenheter från undersökning av homogena blandningar i fält uppskattas att L/S (liquid/solid) kvot 10 uppnås efter flera hundra år.

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.

Referenser

- Mácsik J., Maurice C., Mossakowska A. & Eklund C. 200x. *Uppföljning – Kontroll av tätskiktskonstruktionen på Dragmossens deponi*. (Värmeforsk/RVF/Svenskt Vatten Utveckling rapportserie) (pågående arbete).
- Mácsik J., Maurice C., Mossakowska A. & Eklund C. 2006. *Pilotförsök med stabiliserat avloppsslam (FSA) som tätskikt*. (Värmeforsk/RVF/VA-Forsk rapportserie)
- Wikman K., Berg M., Svensson M. & Ecke H. 2005. *Nedbrytningshastigheten för tätskikt uppbyggda av slam och aska* (Värmeforskrapport)
- Edén R. 2005. *Reducering av luktproblem vid blandning av avloppsslam och flygaska*. KTH Kemiteknik, Examensarbete, Högskoleingenjörsutbildningen.
- Mácsik J., Rogbeck Y., Svedberg B., Uhlander O. & Mossakowska A. 2003. *Underlag för genomförande av pilotförsök med stabiliserat avloppsslam som tätskiktsmaterial*. (Värmeforsk/RVF/VA-Forsk rapportserie)
- Stockholm Vatten AB 2001a. *Slam i mark och anläggningsbyggande, avvattnat vattenverks- och avloppsslam*. Rapport 1, jan 2001
- Stockholm Vatten AB 2001b. *Slam i mark och anläggningsbyggande; utredning: Tätskikt i deponier*. Rapport 21, augusti 2001
- Cronquist S. 2002. *Alternativa material i Stockholms län – askstabilisering av avloppsslam*. TRITA-LWR Master Thesis 02-01. KTH, Stockholm

Bilaga C4: Exempel på utförda objekt – Lilla Nyby, Eskilstuna

Plats

Lilla Nyby deponi, Eskilstuna Energi och Miljö AB

Beskrivning av projekt

Sluttäckning

Storlek

> 10 000 m²

Tidpunkt för genomförande

Arbetet med sluttäckningen startades under oktober 2005 och fram till augusti 2006 sluttäcktes ca 10 000 m² med FSA som tätskikt. Sluttäckningen av ytterligare ca 10 000 m² pågår för närvarande.

Täckningens utformning

Täckningens olika delar redovisas i tabell C4-1.

Tabell C4-1. Täckningens olika delar.

Skikt	Mäktighet	Material
Växtetableringsskikt	0,2 m	Rötat och stabiliserats slam och anläggningsjord
Skyddslager	> 1,1 m	Jord och avloppsslam med askskikt som rotpenetrationsskydd
Dräneringslager	0,2 m	Bergkross
Tätskikt	0,6 m	Flygaskastabiliserat avloppsslam FSA50 (50 %/50 %)
Avjämningslager	0,3–1	Aska och bottensand
AVFALL		Hushållsavfall

Över tät- och dräneringslagret lades ett materialskiljande skikt i form av geotextil. Ett rotpenetrationsskikt på ca 0,05 m bestående av flygaska lades ut mitt i skyddslagret. Provytan består av en flack area (lutning 1:20) och en slänt (lutning 1:10).

Råmaterial - blandningsrecept

Råmaterialen till FSA-tätskiktet utgjordes av rötslam från och bioflygaska från bubblande bädd från Eskilstuna Miljö och Energi AB.

Uppmätta kvalitetsparametrar på råmaterialen som användes i fält redovisas i tabell C4-2 (nästa sida).

Tabell C4-2. Uppmätta kvalitetsparametrar i råmaterial och blandning till FSA-tätskikt vid Lilla Nyby, Eskilstuna.

	pH	TS (%)
Rötslam	–	26–30
Flygaska	12*	61–66
FSA-blandning (efter blandning)	–	36–40
FSA-blandning (vid utläggning)	–	39–49

* laborativvärde från egenkontroll, ej uppmätt i fält.

Med utgångspunkt från resultat från laborativundersökningar valdes blandningen 50 % flygaska + 50 % rötslam.

Ett urval av resultaten från de inledande laborativundersökningarna presenteras i tabell C4-3.

Tabell C4-3. Resultat från inledande laborativundersökningar.

	50 % flygaska + 50 % rötslam
Torr densitet (t/m ³)	0,44
TS-halt (%)	36
Skjuvhållfasthet dag 1 (kPa)	4
Skjuvhållfasthet dag 30 (kPa)	24
Hydraulisk konduktivitet (m/s)	1 • 10 ⁻¹⁰ – 3,5 • 10 ⁻¹⁰

Transport och lagring av material

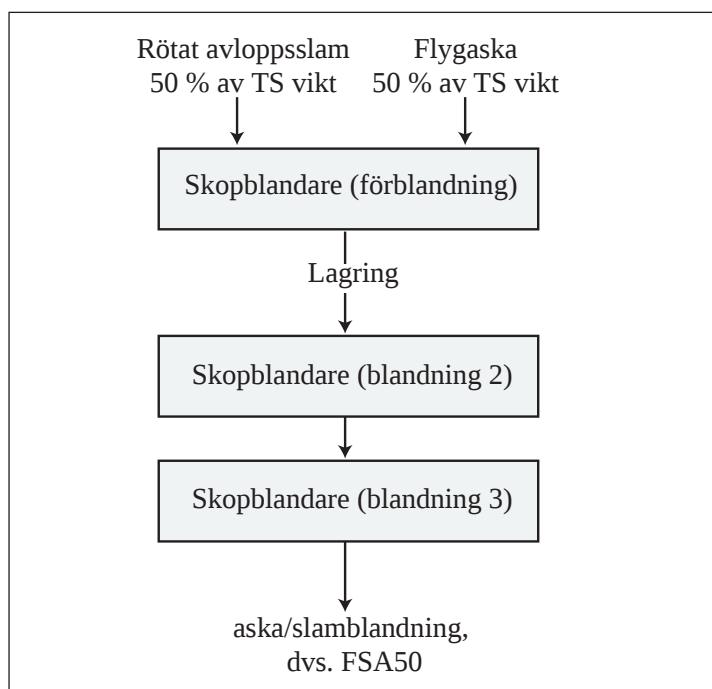
Rötat avloppsslam lagrades i strängar före blandning. Platsen för lagring var ca 300 m från den aktuella utan som sluttäcktes. Avloppsslammet TS var mellan 26 %–30 %

Fuktig flygaska, med TS-halt ca 62 % körs i bulkbil till Lilla Nyby, där flygaskan lastades av intill avloppsslammet. Flygaskan lagras inte separat utan förblandas med avloppsslammet med skopblandare. Dosering av råmaterial skedde genom en kontinuerlig vägning av råmaterialen och avstämning mot materialets TS-halt. Blandningsförhållandet var 50 % TS flygaska och 50 % TS rötat avloppsslam. Det förblandade materialet lagrades sedan i upp till flera veckor. Blandningens TS låg mellan 36–40 %.

Utförande

Blandning

Det förblandade materialet blandades sedan med skopblandare i två omgångar. Efter den sista blandningsomgången transporterades aska/slamblandningen (FSA50) för att läggas ut som tätskikt.



Figur C4-1. Flödesschema för blandning vid Lilla Nyby, Eskilstuna.

Utläggning och packning

Den färdiga materialblandningen transporterades med dumper från blandningsområdet och tippades ut. På grund av den initiala låga hållfastheten gjordes bedömningen att FSA-materialet inte klarade några större laster som t.ex. en grävmaskin. Utläggingsstrategin var att FSA lades ut som tättskikt i våd mot en stödvall. Vådens bredd var 5 m och skiktets tjocklek var 0,6 m. Vid utläggningen av FSA packades det utlagda skiktet med skopa. Våden av FSA täcktes med geotextil som materialavskiljande skikt, innan dräneringsgrus lades ut med tillhörande geotextil. Vådens bredd var ca 0,3 m bredare än geotextilmattans bredd. Därefter lades dräneringslager ut (krossat berg med en fraktion på 20–100 mm) med tillhörande geotextil. På geotextilen lades skyddslagret ut, men en 0,2–0,3 m remsa av geotextilen lämnades fritt. Nästa våd lades ut efter att geotextilen veks upp, gammalt och torkat FSA-material i kanterna togs bort innan nästa våd installerades. Fordon tilläts på ytan enbart efter att minst 1 m av dränerings-/skyddslagret var installerat.



Figur C4-2. Exempel: Utlagt FSA-skikt, dränerings- och skyddslagret, Lilla Nyby, Eskilstuna.

Kvalitetssäkring

Med utgångspunkt från resultaten vid de inledande laboratorieundersökningarna ställdes krav på TS och torrdensitet på packad yta. Kravet på materialets TS var att denna skulle vara mellan 39 och 50 %. Kravet på torrdensiteten var att denna skulle vara mellan ca 0,4–0,5 ton/m³, detta innan materialet komprimerades. Torrdensiteten i tätskiktet undersöktes med hjälp av vattenvolymeter. En torrdensitet på 0,54 ton/m³ ger en hydraulisk konduktivitet på ca 10⁻⁹ m/s vid inledande CRS-försök med materialet.

Kvalitetskontroll skedde genom att TS-halten i den färdiga blandningen mättes regelbundet under blandningsförfarandet.

I tabell C4-4 sammanfattas resultaten från kvalitetskontrollen i fält.

Tabell 4. TS-halt i färdig blandning och torrdensitet på packat tätskikt.

	FSA-blandning Nov 2005	FSA-blandning Juni 2006	FSA-blandning Aug–Sept 2006
TS (%)	37–57	43–49	39–48
TS (%), medel	49	46	43
Torrdensitet (t/m ³)	0,4–0,67		
Torrdensitet (t/m ³), medel	0,49		

Uppföljning

Då ytan anlades installerades också olika typer av mätutrustning för att möjliggöra uppföljning av tätskiktets konstruktionens funktion. Ett uppföljningsprojekt pågår.

Resultaten från uppföljningen visade att tätskiktet är tätt. Den infiltrerade mängden vatten är < 5 l/m² och år. Tre kolyprov togs med borrbandvagn från tätskiktet ca 0,6 år efter utläggning. Laboratorieundersökning av upptagna prover visade att FSA-skiktets hydrauliska konduktivitet var mellan 2,5•10⁻¹⁰ m/s–2•10⁻⁹ m/s, beräknat utifrån CRS-försök. Efter kompression varierade materialets torrdensitet mellan 0,6 och 0,7 ton/m³.

Kommentar

Arbetet med sluttäckning av Lilla Nyby, uppföljning av erhållna resultat och metodutveckling pågår.

Referenser

Eskilstuna Energi och Miljö AB.

Mácsik J., Svedberg B., Lenströmer S. & Nilsson T. 2004. FACE: *Flygaska i geotekniska anläggningar – Etapp 1: Inventering och tillämplighet.*

Lenströmer, S. 2002. Avloppsslam som tätskikt på avfallsdeponier. Master Thesis, Luleå tekniska universitet, Civilingenjörsprogrammet, Samhällsbyggnadsteknik/2002:284.

Bilaga D: Faktablad

Bakgrund

Nedan görs en sammanställning av lokala variationer i FSA kvalitet, sluttäckningsutformning och sluttäckningskonstruktion. I sammanställningen ingår följande deponier:

1. Tekniska verken i Linköping, Gärstad
2. SRV återvinning i Huddinge, Sofielund
3. Älvkarleby kommun, Dragmossen
4. Eskilstuna Energi och Miljö, Lilla Nyby.

Faktablad

I tabellen nedan redovisas data för densitet, vattenkvot, odränerad skjuvhållfasthet (τ_{fu}), hydraulisk konduktivitet (k) i laboratoriemiljö, täthet uppmätt i fält, FSA-kvalitet, FSA-skiktets tjocklek och släntlutningar.

Tabell D1. Uppmätta värden för de fyra deponierna.

Mätparameter	Deponi			
	1	2	3	4
TS rötslam [%]	27–37	22–25	28–37	26–30
TS aska [%]	57–67	87–90	68–94	61–66
TS FSA (fält) [%]	39–50	47–64	35–52	39–49
Torrdensitet (FSA) [kg/m ³]	0,49	0,8	0,5–0,6	0,44
τ_{fu} 1 dag [kPa]	18	9,9	8–13	4
τ_{fu} 28 dagar [kPa]	24	25	19–20	24
k (lab) [m/s]	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$3,5 \cdot 10^{-10}$ – 10^{-10}
Täthet [mm/år]	5–12	<10	0–27 ^{&}	< 20
FSA ^{\$}	FSA50	FSA40–45*	FSA45–50	FSA50
Skikttjocklek vid utläggning [mm]	500	400	550	600
Släntlutning	1:20–1:3	1:40–1:4	1:24–1:10	1:20–1:5

^{\$} Exempelvis FSA55, med 55 % aska och 45 % rötat avloppsslam (procent av torrsvikt).

[&] Två år efter utläggning.

* rötslam 15 %, flygaska 40 % och bottenaska 45 %.



Box 47607 117 94 Stockholm

Tfn 08 506 002 00

Fax 08 506 002 10

E-post svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se