

Vägledning – Flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) som tätskikt

Maria Carling, Karsten Håkansson, Josef Mácsik,
Agnes Mossakowska, Yvonne Rogbeck

Vägledning
Flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) som
tätskikt

Instruction manual
Fly ash stabilised sludge (FSS) as liner material

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

Q6-602

Abstract

This instruction manual is aimed for those who are planning closures of a landfill with fly ash stabilised sewage sludge 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.

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 flygkastabiliserat 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 (ammoniakavgång och damning).

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

Sökord: rötat avloppsslam, flygaska, tätskikt, deponi, vägledning

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 knowledge and engagement of the staff is of great importance in order to fulfil requirements.

Keywords: sewage sludge, fly ash, liner, waste site, instruction manual, pilot study

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 basera 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).

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	DEFINITIONER.....	1
1.2	MATERIALBESKRIVNING.....	2
1.3	AVGRÄNSNING.....	2
2	PROJEKTERINGSFÖRUTSÄTTNINGAR	3
2.1	MILJÖKRAV	3
2.2	JURIDISKA KRAV	5
2.3	TEKNISKA KRAV	5
2.4	MATERIAL TILL TÄTSKIKT	6
2.5	KONSTRUKTIV UTFORMNING.....	12
3	REDOVISNING I BYGGHANDLING	16
4	UTFÖRANDE.....	17
4.1	TRANSPORT OCH LAGRING	17
4.2	TILLVERKNING AV FSA.....	19
4.3	UTLÄGGNING AV FSA OCH ÖVRIGA SKIKT	21
4.4	ARBETSMILJÖ.....	23
4.5	VÅDERLEK	24
5	KVALITETSKRAV OCH KONTROLL	25
5.1	UTFÖRANDEKONTROLL/EGENKONTROLL	25
5.2	EFTERKONTROLL (FRIVILLIG)	26
5.3	RISKER/KONSEKVENSER.....	26
6	DRIFT OCH UNDERHÅLL.....	27
7	REFERENSER/HÄNVISNING.....	28

Bilagor

- A LABORATORIEUNDERSÖKNING OCH VIKTIGA PARAMETRAR**
- B EGENKONTROLL**
- C EXEMPEL PÅ UTFÖRDA OBJEKT – TEKNISKA VERKEN I LINKÖPING**
- D FAKTABLAD**

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 flygkastabiliserat 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 övertäckning 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: Flygkastabiliserat avloppsslam



Figur 1.1 Principsektion för sluttäckning av deponi.

Figure 1.1 Principle section for closure of landfill

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 rötat 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, avjämningskikt 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 Projekteringsförutsättningar

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 (2007).

Några aspekter av funktionen hos FSA-material är av särskild betydelse vid bedömning av miljöpåverkan och därmed möjligheterna att använda flygkastabiliserat 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 tätskiktetsmaterial 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 tät) 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. 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 lätttröliga 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 tätskiktetskravet 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 4500 ton (våtvikt) avloppsslam vid TS 30 % och 1500 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 inneboende 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 slänthlutningar. 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 SGI Information 19 (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 kompressionsegenskaper 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 översiktig 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 blir 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 materialparametrar, se tabell 2.1:

Tabell 2.1. Minimikrav på dokumentation av ingående material.

Parameter	Aska	Slam
Panntyp	x	
Bränsletyp	x	
Volymer (ton/år)	x	
Ursprung	x	x
Organiskt kol		x
Glödförlust ^x	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

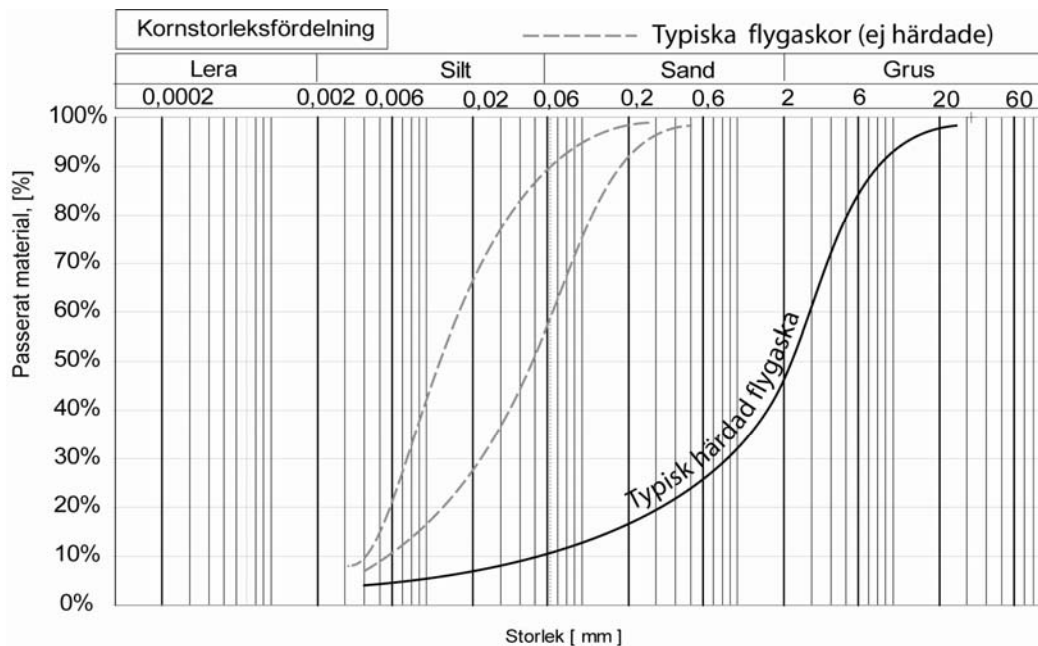
^x glödförlust anger både oförbränt och kemiskt bundet vatten

Även bequerelnivån knuten till cesiumhalten i askan bör kontrolleras innan fullskalig användning, (Möre och 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 flygaska blir mer grovkornig. Detta medför att flygaska inte kan finfördelas lika effektivt i blandning med avloppsslam och det finns en risk 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.

Tabell 2.2. Rekommenderade egenskaper hos råmaterial till FSA.

	Aska	Slam
pH	≥ 11	-
TS (%)	> 60	22-33
Elektrisk konduktivitet	> 1000 mS/m	-

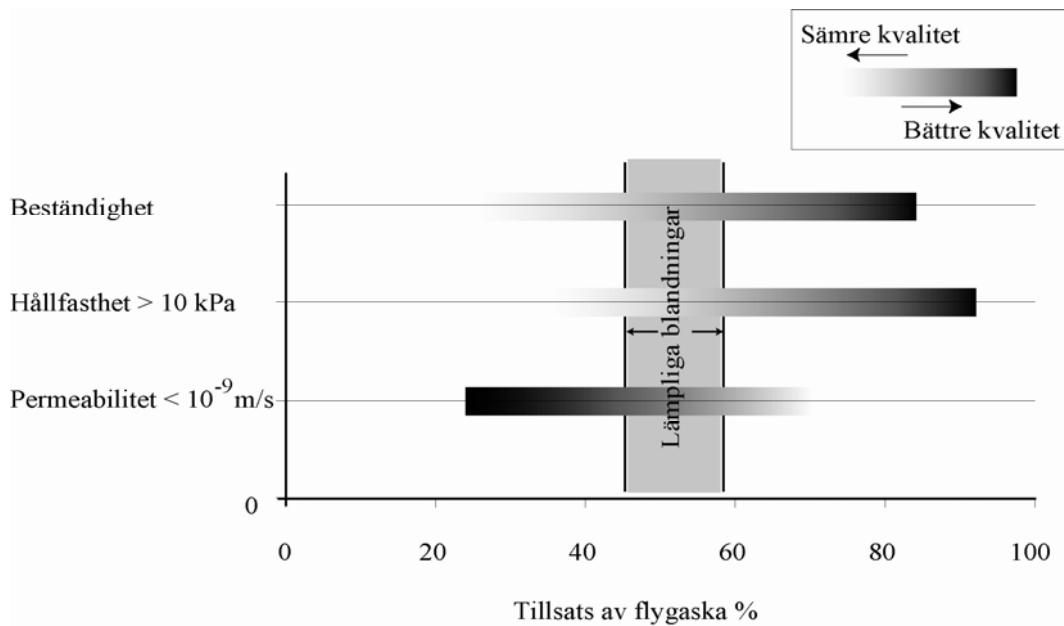


Figur 2.1 Exempel (principskiss) på typiska kornstorlekskurvor för flygaskor (ej härdade) och härdade flygaskor.

Figure 2.1 Example of typically grain size distributions for fly ashes (fresh/dry) and aged fly ashes .

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. Även inblandning av annan typ av aska (t ex bottenaska) kan vara aktuell för att erhålla en blandning med rätt egenskaper.



Figur 2.2 Blandningarnas lämplighet med hänsyn till hydraulisk konduktivitet, hållfasthet och beständighet, efter Mácsik, (2003).

Figure 2.2 Suitability of the mixtures with regard to hydraulic conductivity, strength and durability, after Mácsik, (2003).

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.

Tabell 2.3. Exempel på provserie som tillverkas för bedömning av FSA-materialets egenskaper.

Andel flygaska	Härningstid (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

Med utgångspunkt från resultaten från laboratorieundersökningarna väljs aktuell blandning ut, med 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 projektexempel med detaljerad beskrivning. Beroende på var i sluttäckningskonstruktionen materialet ska användas (ovan, i eller under tätskiktet) kan olika krav på miljöegenskaper såsom utlakning ställas.

Tabell 2.4 Exempel på mäktighet och material som kan ingå i en sluttäckning.

Tätskiktskonstruktion	Mäktighet, m	Exempel
Växtetableringsskikt	0,05	Komposterat slam
Skyddsskikt	> 1,5	anläggningsjord och med möjligt askskikt som rotpenetrationskydd
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	-	-

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. Material till avjämningskiktet 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 avjämningskiktet inte utgörs av något grovkornigt, dränerande material.

Avjämningskiktets 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 ytorna 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 laboratorieförsök 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 laboratorieförsök 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 avjämningskikt ovanpå avfallet med projekterad släntlutning
- Tillverkning av FSA material
- Utläggning av tätskikt, FSA-material
- Utläggning av överliggande dräneringskikt och skyddsskikt
- Utläggning av växtetableringskikt 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.



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.

Figure 4.1 Exampel of storage of sludge. The leaf base is ca 6 - 8 m, height ca 3 – 3,5 m and length ca 25 – 30 m, Dragmossen landfill.

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 kornstorlekssammansättning 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 nederbörds mängden 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

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 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 slutproduktens 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 beständighetssynpunkt 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 beständighetssynpunkt. 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 tätskiktsmaterial. 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 igensättning. Aluskopa kan användas för att förblanda slam och aska och därmed minska risken för igensättning. Vid förblandning förloras dock fördelen att materialen vägs in var för sig.

4.2.3 Stjärnsikt

Aska och slam förblandas med hjälp av skopa (hjullastare). Syftet med skopblandningen är att möjliggöra en noggrannare proportionering av råmaterialen än vad som är möjligt med enbart stjärnsikten. Därefter 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 slamm tas bort i förväg. Dagsproduktionen kan uppgå till omkring

150-180 ton/dag. En maskinist kan då utföra både förblandning med hjullastare, blandning med stjärnsikt 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 trumsikten 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 Stödvall

Runt området som ska sluttäckas kan i vissa fall en vall, s k stödvall, av friktionsmaterial byggas (se Figur 4.2). Behovet beror på FSA-materialets hållfasthetsegenskaper. Syftet med vällen 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. Stödvallden kan tas bort när angränsande område sluttäcks. Om vällens permeabilitet och tjocklek efter kompression motsvarar FSA-materialets kan vällen 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 överfarer 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-ytor 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 pglar.



Figur 4.2 Exempel: Utlagt FSA-, dränerings- och skyddsskikt, Lilla Nyby, Eskilstuna.

Figure 4.2 Example: Installed FSS-, drainage- and coverlayer, Lilla Nyby, Eskilstuna.

(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 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 4.3, 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.



Figur 4.3 Packning av utlagt FSA med bandgående fordon, SRV återvinning.

Figure 4.3 Compaction of installed FSS with caterpillar, SRV återvinning.

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 luktnekbrytning 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 finkornigt 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 torrspäckor 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 tätskiktetsmaterial. Sluttäckningen med flygkastabiliserat avloppsslam (FSA) som tätskiktetsmaterial 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 kunskaper 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, $\rho - \rho_d$. En stor variation i w , G och ρ eller ρ_d indikerar att materialet inte är homogent.

Information om flygaskans och avloppsslammets 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 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.*

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 materialskiljande 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, Carling et al. 2006 och Mácsik et al. 2007, visar att skiktets täthet ökar med tiden. 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.

7 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 tätskiktskonstruktionen 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 tätskiktmaterial. Värmeforsk rapport 837.

Möre H. och 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*

stabiliseringseffekten. Licentiatuppsats 2001:06. Luleå tekniska universitet, avdelningen för geoteknik, Luleå.

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

SGI Information 19, Rogbeck J m.fl. (2007). *Deponiers stabilitet, Vägledning för beräkning*, Statens geotekniska institut, Linköping.

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.

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

Bilagor

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.

Torr densitet

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

$$\rho_d = m_s/V$$

Torr densiteten uttrycks i enheten ton/m³.

Förhållandet mellan torr densitet och skrymdensitet kan uttryckas:

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

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

Typisk torr densitet hos laborietillverkade 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 tät 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 $i=1$.

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

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.

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 torr densitet 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 avloppsslammets. 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

Beräkningsexempel: I figur 1 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	m_s	m_w	FA/AS
FA	61%	850	527	323	50%
AS	285%	2000	520	1480	50%
FSA	172%	2850	1047	1803	

Kontrollera Vattenkvoten/*TS* varierar (beroende på nederbörd, vattentillsats etc.)

Ändra (se utdata 2) Utgå ifrån 2000 kg slam och justera tillsatsen av aska för att uppnå lämplig FSA-blandning, exempelvis FSA50

Utdata 1 Vattenkvoten hos FSA produkten vid blandning. Lagring kommer att sänka vattenvoten, genom bl.a. avdunstning, etc.

Utdata 2 Andelen Flygaska (FA) i FSA-blandningen ska ligga > 40 % (torr viktsprocent)

Figur 1. Beräkningsexempel, FSA40.

För att tillverka FSA50 (50 vikt-% flygaska, torrvikt) blandas 850 kg flygaska [*våtvikt*] med 2000 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 utfört laboratorieförsök och dimensionering. Ändras de ingående materialens vattenkvot ska nytt blandningsförhållande räknas fram.

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

Tabell 1. Avloppsslammets TS-halt. (exempel)

Datum	Flygsk a TS	Avloppssla m TS	FSA- kvalite t	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. Deponitäckningen utförs i celler. Ritningar, materialval och materialtjocklek redovisas.

Tabell 2. Tätskiktskonstruktionens ingående material och mäktighet.

<u>Tätskiktskonstruktion</u>	<u>Mäktighet, m</u>	<u>Kommentar</u>
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 3. 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, $\rho - \rho_d$. En stor variation i w , G och ρ eller ρ_d indikerar att materialet inte är homogent.

Tabell 4. Tätskiktets materialets densitet efter utläggning och eventuell packning.

Datum	Cell	Provpunkt	FSA- skrymdensitet	w	Torrdensite t	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 m^2 .

Tabell 5. Lysimeterundersökning. Lysimeterlådans yta är 0,12 m².

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

⁵ Eventuella analyser etc.

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

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

där A är lysimeterlådans yta i m², 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 liter/m² och år⁴.

Avvägning av deponins yta

Här dokumenteras avvägningen som görs efter det att avjämningsskiktet 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.

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

$$\frac{\text{Mängd vatten [liter]} * \text{antal dagar}}{\text{Lysimetryta [m}^2\text{]} / 365} = [\text{liter/m}^2 \text{ och år}] \text{ eller } [\text{mm/år}]$$

C Exempel på utförda objekt – Tekniska Verken i Linköping

Plats

Gärstad deponi, Tekniska Verken i Linköping

Beskrivning av projekt

Pilotförsök

Storlek

5500 m²

Tidpunkt för genomförande

September – oktober 2004

Täckningens utformning

Täckningens olika delar redovisas i tabell 1.

Tabell 1. Täckningens olika delar

Skikt	Måktighet	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 2.

Tabell 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)	$1,4 \cdot 10^{-10}$

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

Tabell 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

*laboratorievärde från egenkontroll, ej uppmätt i fält

Transport och lagring av material

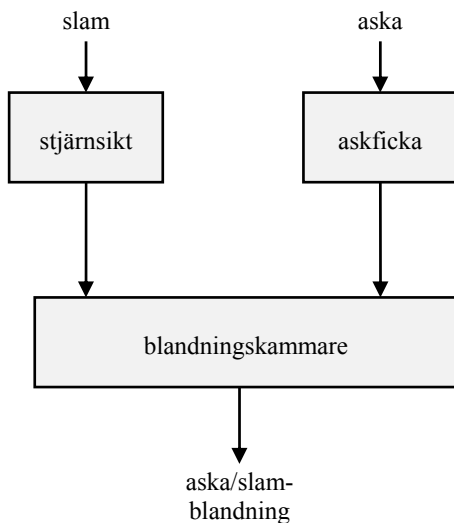
Den torra flygaskan (TS-halt 98%) kördes i bulkbil till en plats nära den blivande provytan. Askan lagrades där utomhus i ett par månader. Under lagringen var askan täckt med plast. Efter lagring hade TS-halten i askan sjunkit till 57 - 67 %.

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 asfaltsverk, speciellt ombyggt för ändamålet. Blandningen skedde enligt flödesschemat i figur 1.



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

Slammet matades via en stjärnsikt till ett transportband (figur 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 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 3. Även väderleken bidrog till att packningsarbetet endast kunde utföras med skopa.



Figur 3. Packning med skopa i slänt.

Efter att tätskiktet lagts färdigt, lades övriga skikt på (geotextil, dränlager och skyddslager). Utläggningen av skyddsskiktet försvarades 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 blandningsförloppet.

I tabell 4 sammanfattas resultaten från kvalitetskontrollen i fält.

Tabell 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 <math><5 \text{ l/m}^2</math> 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).

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 1. 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
Skikt tjocklek 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 %

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

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET

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

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35