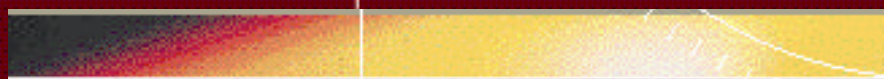


FACE

Flygaska i geotekniska anläggningar

Etapp 1: Inventering/Tillämplighet

Josef Mácsik, Bo Svedberg, Stina Lenströmer och Thomas Nilsson



FACE

**Flygaska i geotekniska anläggningar Etapp 1:
Inventering / Tillämplighet**

FACE

**Fly Ash in Civil Engineering Stage 1:
Inventory/ Application**

Josef Mácsik, Bo Svedberg, Stina Lenströmer och Thomas Nilsson

Q4-107

VÄRMEFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM · Tel 08-677 25 80
Augusti 2004
ISSN 0282-3772

Förord

Föreliggande projekt utfördes i samarbete mellan Scandiaconsult (SCC) och SCC-VIATEK i syfte att karakterisera flygaskor och ta fram underlag inför vidare arbeten, där flygaskors tekniska egenskaper är av vikt, dvs vid genomförande av pilotförsök/full-skaleförsök av vägkonstruktioner, vid framtagning av nya ”produkter” som fiberaska etc.

Arbetet genomfördes av Scandiaconsult med kompetens inom miljögeoteknik. Inventering av producenter av flygaska utfördes av Henrik Bjurström, Ångpanneföreningen. Laboratoriearbeten och sammanställning av resultaten utfördes Aino Maijala (SCC-VIATEK). Laktionsförsöken utfördes av Britt Aurell (SGI).

Projektet har finansierats av Värmeforsk och SCC. Projektets referensgrupp och styrgrupp bestod av Claes Ribbing (Värmeforsk), Åsa Lindgren (Vägverket), Per-Erik Persson (Mälarenergi AB).

Claes Ribbing
VÄRMEFORSK Service AB

Abstract

The project presented below is the first phase of a broader project named FACE “Fly Ash in Civil Engineering”. The objective of the project is to identify environmentally friendly products based on fly ash to be used in geotechnical applications such as roadbases. In this phase of the project, named ”Inventory / Applicability”, different fly ashes have been grouped according to their technical properties and potential applications. The objective of grouping different fly ashes is to identify key-properties in order to make future investigations less extensive and also to make it easier to assess potential applications in the future.

Results of the investigation indicate that fly ash can be divided into three main groups A, B and C. Results indicate that by determining a limited set of properties potential applications can be identified. Properties such as void ratio and strength will give a good indication of appropriate applications. Potential examples of applications for group B and C fly ashes are renovation of gravel roads, stabilisation of hazardous waste (fly ash from household waste), and stabilisation of clay soils and of contaminated soils.

In other corresponding projects, in Sweden and Finland, the excellent curing properties of some fly ash have been used in renovation of gravel roads. Future research is however needed in order to increase knowledge of fly ashes and their technical properties.



Sammanfattning

Det projekt som avrapporteras här ingår som första etapp i ramprojektet *FACE*, (*Fly Ash in Civil Engineering*). Målsättningen med *FACE* är att ta fram produkter baserade på flygaskor för geotekniska anläggningar med huvudsaklig inriktning mot vägbyggnad.

I denna etapp av projektet "Inventering / Tillämplighet" har olika flygaskor grupperats efter deras tekniska egenskaper och potentiella användningsområden. Målsättningen är att grupperingen är att ska peka ut styrande parametrar och därmed göra det enklare att undersöka och bedöma flygaskors tillämplighet framgent. Sammanlagt har nio olika biobrännslerbaserade flygaskor, från värmeverk och pappersindustri med olika brännsllepannor och brännslen som bas, undersökts. Flygaskorna som undersöktes var färsk och torra med undantag av två deponifygaskor. Undersökningen har avsett egenskaper som kornstorleksfördelning, ursprunglig vattenkvot, glödförlust, packningsegenskaper, härdningsegenskaper (hållfasthetsutveckling med tiden). Resultaten indikerar att de undersökta flygaskorna kan delas in i tre huvudgrupper.

Till den första gruppen, *Grupp A*, hör flygaskor som har sämre härdningsegenskaper och behöver tillsats av bindemedel, exempelvis andra askor med högre härdningskapacitet och eller cement (portlandcement, Merit 5000 etc.). Flygaskor som har lagrats på deponi och har lågt innehåll av osläckt kalk hör till denna grupp. Dessa flygaskor är olämpliga att nyttjas utan stabilisering i konstruktioner som kan påverkas av perkolerande vatten och av tjäle. Efter stabilisering av färsk och torr flygaska och bindemedelstillsats t ex cement kan askor i denna grupp t ex användas som förstärkningslager i vägar och körytor.

Grupp B består av flygaskor med medelhöga till höga halter av osläckt kalk och bra hållfasthetsutveckling. Dessa flygaskor kan nyttjas utan tillsats av cement. Tillsats av cement kan medföra sämre packningsegenskaper och därmed lägre hållfasthet. Flygaskornas beständighet mot perkolerande vatten och tjäle är bra, men kan förbättras med tillsats av exempelvis cement. Exempel på användningsområden är allt från tätskikt i t ex deponier, förbättring av grusvägar som förstärknings-, bärlager eller blandat med grus, jordstabilisering (jmf KC-pelare och masstabilisering).

Grupp C består av flygaskor med hög hållfasthet. Dessa flygaskor kan nyttjas utan tillsats av cement, men tillsats av cement kan medföra högre hållfasthetsvärden och bra beständighet mot perkolerande vatten och tjäle. Behovet av tillsats av bindemedel bör utredas för respektive flygaska. Exempel på användningsområden motsvarar grupp B och dessutom t ex för stabilisering av farligt avfall eller andra förorenade massor.

Projektet visar att en karakterisering av begränsat antal parametrar hos flygaskorna bör kunna ligga som grund för identifiering av lämpligt användningsområde. Parametrar som den härdade flygaskans portal och hållfasthet ger en god indikation om lämpligt användningsområde. Undersökningarna har också visat att den optimala vattenkvoten vid packning är lägre än den vattenkvot (tillsats av vatten) som behövs för att uppnå maximal hållfasthetsutveckling för

askor i grupp B och C. Vidare kan konstateras att torrförvaring av flygaskor är viktig för att kunna nyttja undersökta flygaskor utan tillsats av bindemedel.

I flera fristående projekt har flygaskornas goda härdningsegenskaper nyttjats vid renovering av grusvägar. Denna användning av flygaskor tar stora mängder material i anspråk. Samtidigt är dock tillgången på färska flygaskor begränsad. Pågående projekt undersöker å andra sidan möjligheten att använda mindre än 15% tillsats av färsk flygaska till grusmaterial vid renovering av grusvägar. Det är även viktigt att utreda hur tillsats av en mindre mängd vatten, 15 - 30 %, till en färsk flygaska minskar materialets härdningskapacitet med tiden och studera lagringsmöjligheter.

I detta projekt har primärt flygaskornas tekniska egenskaper undersökts. I och med högt ställda miljökrav bör flygaskor framgent undersökas vad gäller innehåll och möjlighet att ämnen frigörs från konstruktionerna. Det fortsatta arbetet bör inriktas på en fördjupning för bättre förståelse av flygaskors tekniska egenskaper, och speciellt mot fält-/pilotstudier för att där söka verifiera de bedömningar som gjorts i laboratoriemiljö.

Summary

The project presented below is the first phase of a broader project named FACE “Fly Ash in Civil Engineering”. The objective of the project is to identify environmentally friendly products based on fly ash to be used in geotechnical applications such as road bases etc.

In this phase of the project, named “Inventory / Applicability”, different fly ashes have been grouped according to their technical properties and potential applications. The objective of grouping fly ashes is to identify key-properties in order to make future investigations less extensive and also to make it easier to assess potential applications in the future.

A total of nine different fly ashes from incineration of bio fuels (Heating Plants and Forest Industry Boilers) were investigated. The investigated fly ashes were all fresh and dry apart from two which originated from landfill. Properties such as grain-size distribution, water-content, void-ratio, loss on ignition, compaction properties, increase of shear strength, have been investigated. Analyses of the results indicate that fly ashes can be divided into three main groups A, B and C, where:

Group A fly ashes have poor curing properties and need stabilisation agents such as other fly ashes with higher curing capacity or cement (Portlandcement, Merit 5000 etc.). Fly ash which has been stored in landfill and has a low content of quick lime is also part of this group. These fly ashes are not appropriate for use without addition of stabilising agent if they are to be used in applications where percolating water and frost-thaw cycles occur. After stabilisation with fresh fly ash and cement, fly ashes from this group can be used in sub-base in roads.

Group B fly ashes have medium-high to high content of quick lime and good development of shear strength. These fly ashes can be used without being stabilised with cement. In fact, adding cement can reduce properties of compaction thus reducing the strength of a construction. The frost-thaw durability of these fly ashes is also expected to be good but can be further improved by addition of cement. Potential civil engineering use of fly ashes from this group are as liners in landfills, sub-base and base course in secondary roads such as gravel roads or low trafficked paved roads or as stabilising agent in soils (compare to LC-columns or mass stabilisation).

Group C fly ashes have high shear strength. These fly ashes can be used without adding cement. Cement can, however, increase shear strength and frost-thaw durability. The need of a stabilising agent should be investigated for each fly ash separately. Potential examples of applications correspond to group B and furthermore they can, for example, be used for stabilising of hazardous waste (such as fly ashes originating from household waste) or contaminated soils.

This project indicates that determination of a limited set of properties of a fly ash can identification potential applications. Properties such as void ratio and shear strength give a good indication of appropriate application. The investigation have furthermore shown, for fly ashes in group B and C, that the optimum water content for compaction is lower than the

water content needed to achieve a maximum development of strength. It is also obvious that dry storage of fly ashes is important to enable use without need of adding stabilising agents.

In other corresponding projects, in Sweden and Finland, the excellent curing properties of fly ashes have been used in order to renovate gravel roads. These applications use large volumes of fly ashes. At the same time the supplies are limited, especially in comparison with the supplies of traditional materials. On the other hand, now ongoing projects indicate that no more than 15% of fresh fly ash applied to the bearing course is adequate to give the road better performance. It is therefore important to investigate how added water (15-30%) reduces the curing properties with time and to study future storage and handling of fly ashes.

In this project technical properties have been the main concern. Future research is, however, needed to further increase the knowledge of fly ashes and their technical properties. It is especially important to enable pilot studies in full scale in order to evaluate assessments made in laboratories. It is also important to assess the environmental impact regarding emissions of substances and environmental aspects in a broader sense, such as management of natural resources etc.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND.....	1
1.2	SYFTE	2
1.3	GENOMFÖRANDE	2
2	MATERIALURVAL	3
2.1	PROVTAGNING	3
3	UNDERSÖKTA PARAMETRAR	5
3.1	GEOTEKNISKA EGENSKAPER	5
3.2	MILJÖTEKNISKA EGENSKAPER.....	8
4	RESULTAT OCH ANALYS, STEG 1	9
4.1	VATTENKVOT.....	9
4.2	GLÖDGNINGSFÖRLUST.....	9
4.3	PH, HALT AV AKTIVT $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ OCH VÄRMEUTVECKLING VID BLANDNINGEN	10
4.4	KORNSTORLEKSFÖRDELNING.....	10
4.5	PACKNINGSEGENSKAPER.....	11
4.6	TOTALINNEHÅLL AV OORGANISKA ÄMNEN.....	14
4.7	LAKNINGSUUNDERSÖKNING	19
4.8	DISKUSSION.....	19
5	RESULTAT OCH ANALYS, STEG 2	26
5.1	KONTROLL.....	27
5.2	STABILISERAD FLYGASKA	27
6	GRUPPERING	32
6.1	GRUPPERING EFTER TEKNISKA EGENSKAPER	32
6.2	BEDÖMNING AV ANVÄNDNINGSSOMRÅDEN	34
7	FORTSÄTTA ARBETEN	35
8	REFERENSER	37

Bilagor

- A SAMMANSTÄLLNING ÖVER PRODUCENTER AV FLYGASKA
- B GRANULOMETRISK SAMMANSÄTTNING
- C KOLONNFÖRSÖK
- D VÄRMEFORSKSEMINARIUM "MILJÖRIKTIG ANVÄNDNING AV ASKOR",
UPPSALA 21-22 OKTOBER 2003

1 INLEDNING

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

- Återanvända material.
- Återvinna material i andra processer för att minska åtgången av andra råvaror och resurser.
- Minska naturresursbehovet.

1.1 Bakgrund

Problemställning

Det finns stora problem beträffande bärigheten på sträckor på asfalterade vägar och grusvägar. Många vägar stängs av under tjällossningen p g a den dåliga bärigheten längs vissa sträckor. Genom att nyttja flygaska som förstärkningslager vid dessa ”problemsträckor” kan tjälskadorna minimeras och vägarna hållas öppna under tjällossningen [1]. Därmed minskar behovet av reparationer samtidigt som tillgängligheten ökar under tjällossning.

Värdering ur miljö och teknisk synpunkt

Flygaska är ett ur tekniskt synpunkt bra och beprövat vägbyggnadsmaterial. Forskningsresultat från bl.a. finska undersökningar på förstärkningslager bestående av flygaska visar att flygaska är ur teknisk, miljömässig och ekonomisk synpunkt ett bra materialval [1] och [2].

Omgivning vs applikation

Det förefaller naturligt att en värdering av ett material i en konstruktion bör baseras på ett bredare perspektiv och inte begränsa sig till en jämförelse av material utan värdera konstruktionen som helhet. Emissionerna från konstruktionen är vidare beroende av dess placering i omgivningen. Effekten på omgivningen i sin tur beror av lokaliseringen.

Lösning

Genom att nyttja flygaska innovativt t ex som bär-, förstärknings- och isolerande lager i vägbyggnadskonstruktioner kan dessa optimeras så att materialet ger ett mervärde som är större än bara volymen och dessutom ger minskat framtida underhållsbehov. Vägar, parkeringsplatser etc. kan byggas med mindre åtgång av naturresurser med tillhörande miljövinster och ekonomisk nytta.

Projektet ”FACE” övergripande syfte är att ta fram nyttoprodukter för geotekniska applikationer baserade på flygaska. Det långsiktiga målet är att ta fram produkter med tillämpningsinriktade varudeklarationer speciellt anpassade för byggprocessen.

1.2 Syfte

Denna etapp av projektet ”Inventering / Tillämplighet” syftar till att undersöka möjligheten att gruppera flygaskor efter tekniska egenskaper och potentiella användningsområden. Målsättningen med en gruppering är att ska peka ut styrande parametrar och därmed göra det enklare att undersöka och bedöma flygaskors tillämplighet framgent.

1.3 Genomförande

Projektet har delats in i två steg. I det första steget undersöktes flygaskorna utan bindemedel. I det andra steget undersöktes ett urval av flygaskorna med bindemedel (cement, Merit 5000 och osläckt kalk). Nedan redogörs kortfattat för genomförandet av detta projekt.

- Urval av askor

Undersökningen utfördes genom en inventering och val av typiska flygaskor, baserat på panntyp, bränsle, volymer etc. Företagen, som är med i FACE-projektet och får sina flygaskor undersökta, har sedan själva tagit ut flygaskan, antingen direkt från processen eller från deponi.

- Undersökta parametrar

Undersökningen av flygaskorna har omfattat grundläggande geotekniska egenskaper och vissa miljötekniska egenskaper.

- Resultat och analys

I projektets Steg 1 utfördes en grundläggande karakterisering av flygaskornas (nio stycken) tekniska egenskaper. Innan Steg 2 startade valdes det ut fyra flygaskor för vidare undersökning. I Steg 2 undersöktes flygaskornas tekniska egenskaper efter stabilisering med bindemedel, (cement, Merit 5000 och osläckt kalk). Tidigare erfarenheter tyder på att tillsats av bindemedel ökar flygaskors beständighet mot tjäle.

- Gruppering och förslag på fortsatta arbeten

Baserat på resultat utfördes sedan gruppering av de undersökta flygaskorna. Till grupperingen hänfördes också en bedömning av flygaskors lämplighet i olika applikationer och flygaskorna efter användningsområde i geotekniska applikationer. Avslutningsvis ges förslag på fortsatta arbeten.

2 MATERIALURVAL

Inventering av producerade volymer samt förutsättningar som påverkar flygaskans kvalitet (hantering, lagring, bränslesort, förbränningsteknik etc.). Materialurvalet utfördes på ca 30 st flygaskor. Denna inventering var viktig eftersom flygaskornas tekniska egenskaper och deras avsättning styrs av dessa parametrar. Inventeringen utfördes av ÅF och presenteras i bilaga A. Baserat på resultaten från inventeringen har nio flygaskor valts ut i samarbete med Claes Ribbing, Svenska Energiaskor. Följande producenters flygaskor undersöktes i projektet:

1. Holmen Paper, Braviken, BV
2. Sydkraft Östvärme, Händelöverket, HV
3. Tekniska Verken i Linköping AB, TVL
4. Sydkraft Mälärvärme AB, Åbyverket, ÅV
5. Stora Enso Fors AB, SEF
6. Mälarenergi AB, Västerås, ME
7. Vattenfall Värme Uppsala AB, VVU
8. Sandviken Energi AB, Björksätra, SEAB
9. Fortum Värme Stockholm AB, Värtan FV

Det är centralt att representativa prover tas ut, att detta utförs på ett metodiskt och repeterbart sätt samt att provtagningsförfarandet dokumenteras. SCC har utarbetat en beskrivning av provtagningsmetodik med syfte att respektive anläggning själv skall kunna ombesörja provtagning och transport av material för laboratorieundersökningar. Det är viktigt att redan i ett tidigt skede dokumentera eventuella inhomogeniteter hos flygaskorna.

2.1 PROVTAGNING

Företagen, som är med i FACE-projektet och får sina flygaskor undersökta, har själv tagit ut flygaskan, antingen direkt från processen eller från deponi. I tabell 2.1 redovisas vilka anläggningar som flygaskorna kommer ifrån, vilket bränsle som används, typ av panna, flygaskornas kvalitet/behandling och hur flygaskorna tagits ut. Eftersom flygaskornas härdningsegenskap är en viktig faktor var målsättningen att provuttagen skulle ske av torr flygaska. Tillsättning av vatten till en färsk flygaska med efterföljande lagring försämrar flygaskans kvarvarande härdningsegenskaper avsevärt med tiden.

Tabell 2.1 Bakgrundsinformation om flygaskorna.

Table 2.1 Fly ash background data.

Företag	Anläggning	Bränsle	Panna	Material
Holmen Paper AB	Braviken pappersbruk, Norrköping	1/3 återvunnet trä 1/3 slam från pappersbruket 1/3 bark	Roster	Torr färsk flygaska från panna.
Sydkraft Östvärme AB	Händelöverket , Norrköping	Trä och gummiklipp	CFB, P13	Torr färsk flygaska från panna. Kalkstenstillsats i flygaskan.
Tekniska Verken i Linköping AB	TVL	50 vikt % kol 10 vikt % trä 40 vikt % gummi	Vanderroster kolpanna	25 vikt % vatten tillsatt före transport till deponi. Askan producerades under vintersäsongen 2001/2002. Prov togs ut från deponi under hösten 2002 (steg 1) och våren 2003 (steg 2).
Sydkraft Mälardalen Värme AB	Åbyverket , Örebro	80 vikt % Torv 20 vikt % sågspån från trä	CFB	Flygaska. 25 vikt % vatten tillsatt före transport till deponi. Askan producerades under vintersäsongen 2001/2002. Prov togs från deponi hösten 2002.
Stora Enso Fors AB	Stora Enso Fors	Biobränslen + en mindre mängd blandslam	CFB Ahlström	Torr flygaska
Mälarenergi AB	Kraftvärmeverket i Västerås	Spillprodukter från skogsavverkning i form av grenar och toppar	CFB	Torr flygaska
Vattenfall Värme Uppsala AB	Uppsala	Torv, trä	Pulver	Torr flygaska
Sandviken Energi AB	KVV Björksätra	60 vikt % stycketorv 40 vikt % sågspån	BFB panna Kaerner 20 MW	Torr flygaska
AB Fortum Värme samägt med Stockholms stad	Värta	5-12% olivkärnor resterande kol	PFBC (ABB)	Torr flygaska, förorenad med dolomit från bäddsand

Anläggningens/företagens namn med **fet stil** refererar till den beteckning som används senare i rapporten.

3 UNDERSÖKTA PARAMETRAR

På laboratorium utfördes en grundläggande klassificeringsundersökning på de nio flygaskorna. Syftet var att bedöma flygaskornas grundläggande geotekniska egenskaper, där bland annat härdning utan bindemedel ingick. Resultaten kommer också att användas som utgångs- och jämförelsevärden vid senare undersökningar.

3.1 Geotekniska egenskaper

Undersökningen av flygaskorna utfördes i två steg, där i steg 1 undersöktes flygaskornas grundläggande geotekniska egenskaper. I steg två undersöktes cementstabiliserade provers grundläggande geotekniska egenskaper. Följande parametrar undersöktes i steg 1 och 2:

- Vattenkvot
- Glödgningsförlust
- Halt av aktivt (fritt) kalk, pH och värmeutveckling vid blandningen
- Kornstorleksfördelning
- Packningsegenskaper
- Hållfasthet
- Permeabilitet
- Beständighet mot frys- och tningscykler

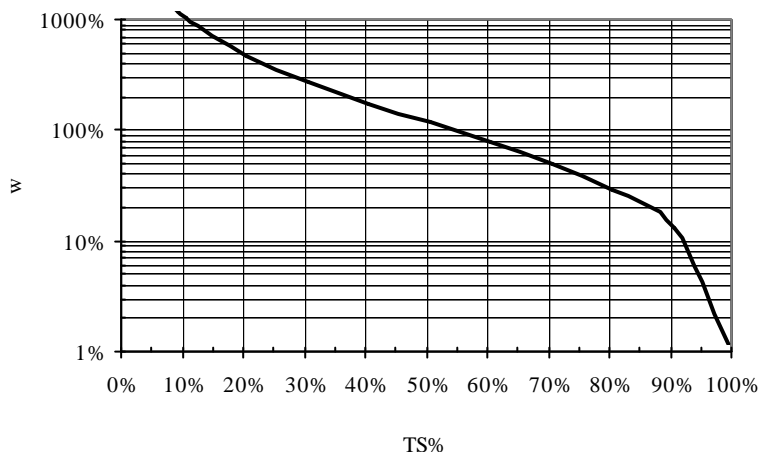
Flygaskornas hållfasthet etc. kontrollerades utan tillsats av bindemedel för att kontrollera materialens härdningsegenskaper. Hållfasthetsegenskaperna undersöktes efter 14 dygns härdning. Parallellt med denna tekniska undersökning begärdes totalinnehåll av metaller på de undersökta flygaskorna från askleverantörerna. Indata är av stort värde för bedömning av flygaskornas härdningspotential. Undersökningarna, vad gäller permeabilitet, hållfasthet och proctorförsök utfördes enligt följande standarder:

- Undersökningarna görs enligt GLO-85 (Geotekniskt laboratorio-ohjeet, Suomen Geotekninen yhdistys 1985; Guidelines for laboratory tests, published by the Association for Geotechnics in Finland) eller enligt gällande SFS/ISO/ASTM – standarder. En del av testerna har modifierats i SGT-laboratoriet (Viatak, Finland) för att undersöka alternativa material, som t.ex. askor.

I steg 2 valdes fyra flygaskor ut för fortsatt studie av hur flygaskornas egenskaper påverkas av tillsats av bindemedel. Vid försöken har portlandcement nyttjats som bindemedel. I steg 2 har stabiliserade provers hållfasthetsutveckling, vattenperkolationens och frys- och tningscyklers påverkan på hållfasthet, optimal vattenkvot, permeabilitet och lakbarhet av oorganiska ämnen undersökts. Hållfasthetsutvecklingen mellan 1 timme och 90 dagar undersöktes. Flygaskornas innehåll av oorganiska ämnen undersöktes ej i projektet, men värden från respektive producent presenteras i rapporten. Syftet med den sistnämnda presentationen är att kunna jämföra flygaskorna med varandra.

3.1.1 Torrsubstans vs vattenkvot och vattenhalt

Vattenkvot, w , är en viktig faktor vid bedömning av ett materials geotekniska egenskaper. Inom tillverkningsprocessen används torrsubstanshalt, TS , istället för vattenkvot. För att underlätta förståelsen redovisas här förhållandet mellan materialets TS i % och dess vattenkvot i %, $w = (1 - TS)/TS$ och $TS = 1/(1+w)$, figur 3.1. Materialets totala vikt (m) består av torrsubstansens vikt (TS) och vattnets vikt (m_w), dvs. $TS + m_w = m$. Vattenhalten är m_w/m . Ett materials TS bestäms genom att torka materialet på 105 °C grader under 24 timmar.



Figur 5.1 Förhållandet mellan vattenkvot och TS.

Figure 5.1 Correlation between water content and dry solid

3.1.2 Glödgningsförlust

Proverna torkas först vid 105°C. Sedan glödgas dessa vid 550°C i två timmar alternativt vid 800°C i en timme. Vid glödning i 550°C anses att organiskt material och kristallbundet vatten glödgas bort och det är den temperatur som används enligt svensk standard 02 81 13 "Bestämning av glödgningsrest i vatten, slam och sediment". Mellan 550°C och 800°C glödgas även andra ämnen bort som t ex karbonater och hydratbundet vatten. För jord rekommenderas i SGF:s laboratoriehandledning glödning vid 800°C i en timme, medan svensk standard 02 71 05 "Organisk halt i jord - Glödgningsförlustmetoden" anger temperaturen 950°C i en timme.

Det finns flera standarder för att bestämma glödgningsförlust. Glödningstemperaturen vid de undersökningar som utfördes i SCC-VIATEKS-laboratorium var 800°C. Vid denna temperatur avgår inte enbart organiskt material via förbränning utan en stor del av det kristallina vatten som finns i materialet samt lättflyktiga ämnen (vid ca 800°C) som exempelvis en del av svavel-, kalium- och natriuminnehållet i askorna. Detta medför att de resultat som presenteras i denna rapport inte kan översättas som organiskt innehåll.

3.1.3 pH, halt av aktivt CaO/Ca(OH)₂ och värmeutveckling vid blandningen

Bestämning av aktivt (fritt) CaO gjordes enligt metod baserad på ASTM C 25-83 (Standard Methods of Chemical Analysis of Limestone, quicklime and hydrated lime. Available lime index.). I rapporten betecknas aktivt CaO som *CaO (akt)*. pH mättes med standard pH elektrod. Härdningstemperaturen mättes hos tillverkade prov. Proverna förvarades vis 18 °C.

3.1.4 Packningsegenskaper

Vid Proctorpackning bestäms en jords maximala torrdensitet (ρ_d^{\max}) och den optimala vattenkvoten w_{opt} . Den optimala vattenkvoten är den vattenkvot vid vilken materialet packas bäst. Principen vid laborierpackning med Proctormetoden är att jorden packas med hjälp av fallvikt som får falla fritt på den jordvolym som ska packas. Härvid tillförs jordvolymen ett visst packningsarbete. Packningsarbetet anpassas så att det överensstämmer ungefär med det arbete som packningsmaskiner åstadkommer vid packning av jordfyllnad. Packningen sker i fem lager i en stålcylder. Då det femte lagret har färdigpackats bör cylindern vara fylld. Vid proctorpackning packas proverna vid olika vattenkvoter. Resultaten från de olika packningsförsöken ritas in i ett diagram med torrdensitet och optimal vattenkvot.

3.1.5 Odränerad skjuvhållfasthet, t_{fu} , och portal

Odränerad skjuvhållfasthet bestämdes med enaxliga tryckförsök på laborier-tillverkade provkroppar, som tillverkas vid nära optimal vattenkvot. Proverna packas med samma arbete som vid Proctorpackning, för att uppnå önskad torrdensitet. Packningen utfördes på samma sätt för provkroppar som undersöktes efter permeabilitetstest och efter frys- tiningförsök.

Provkropparnas skjuvhållfasthet beror av ett materials portal e , dvs materialets porositet n .

$$e = V_p/V_s; \quad \text{dvs} \quad n = V_p/V = 1 - r_d/r_s$$

där r_d är materialets torrdensitet r_s är materialets kompaktdensitet.

3.1.6 Permeabilitet

Permeabilitetstesten genomförs med 'flexible wall' permeameter enligt NT Technical report 254/1994 (Bestämning av permeabilitet hos restprodukter och jord, in situ och på laboratorium).

3.1.7 Beständighet mot frys- och tiningcykler

Provkropparna som undersöktes härda först under 28 dygn. Därefter placeras provkroppen på en kapillär matta där det kan adsorbera vatten under 4 timmar. Därefter placeras provkroppen i frysskåp med - 18 °C, där det förvaras i 16 timmar. Provkroppen roteras sedan 180 grader innan den placeras på kapillärmattan i 4 timmar vid rumstemperatur. Denna

cykel upprepas 12 gånger innan provkroppens hållfasthet undersöks med hjälp enaxligt tryckförsök [1]. Metoden är framtagen av Technical Research Centre of Finland (VTT).

3.1.8 Kornstorleksfördelning

Kornstorleksfördelningen utfördes med hjälp av torr och våtsiktning och sedimentationsanalys utfördes med Aerometer test.

3.2 Miljötekniska egenskaper

Lakningsförsöken utfördes på SGI:s laboratorium. Provkroppar tillverkades och härdades under 28 dygn innan dessa krossades till kornstorlek på 10 mm inför lakning. Lakningen utfördes enligt kolonntest prEN 15477. Proverna som lakades var tillverkade av två flygaskor med tillsats av portlandcement och Merit 5000 som bindemedel. Det senare bindemedlet är processad masugnsslagg från Oxelösund.

Följande tre stabiliserade blandningar har undersökts:

- Flygaska från Stora Enso Fors AB stabiliserades med 5 % TS portlandcement, FCK-29
- Flygaska från Stora Enso Fors AB stabiliserades med 2,5 % av TS portlandcement och 2,5 % av TS Merit 5000, FCK-30.
- Flygaska från Mälarenergi stabiliserad med 2,5 % av TS portlandcement och 2,5 % av TS Merit 5000, FCK-33.

Lakvatten från försöken analyserades av Analytica AB, enligt deras nomenklatur V3A-N.

3.2.1 Metallanalyser

Metallanalyser på flygaskor har inte utförts i detta projekt. Information om flygaskornas oorganiska innehåll har inhämtats från respektive anläggning. De utförda analysernas omfattning skiljer sig mellan olika anläggningar. Resultaten återges i rapporten med syfte att underlätta jämförande studier mellan olika flygaskor.

4 RESULTAT OCH ANALYS, STEG 1.

I projektets steg 1 utfördes en grundläggande karakterisering av flygaskornas (nio stycken) tekniska egenskaper. Syftet med steg ett var att dels karakterisera flygaskorna och dels att baserat på resultat välja ut fyra flygaskor för vidare undersökning i steg 2.

4.1 Vattenkvot

Flygaskornas vattenkvot låg under 1,5 % i samtliga fall, med undantag av flygaskorna från Tekniska Verken, Linköping (TVL) 78,3 % och Åbyverket, Sydkraft Mälärvärme AB (ÅV) 65,8 %, tabell 4.1. I dessa fall nyttjades aska som har befuktats för transport till deponi. Askorna från Braviken (BV) och Händelöverket (HV) har en vattenkvot på 1,5 respektive 1,1 %. Flygaskorna från Stora Enso Fors AB (SEF), Mälarenergi (ME), Vattenfall Värme Uppsala (VVU), Sandviken Energi AB (SEAB) och Fortum Värtan (FV) hade en vattenkvot mellan 0,1 och 0,4 %. En sammanställning av de undersökta askornas vattenkvot kan ses i tabell 4.1.

Tabell 4.1 Flygaskornas ursprungliga vattenkvot (w) och anläggningens panntyp.
Table 4.1 Original water content (w) and combustion type.

	Askor (Anläggning/företag)	w [%]	Panntyp
BV	Braviken pappersbruk	1,5	Roster
HV	Händelöverket	1,1	CFB
TVL	Tekniska Verken, Linköping	78,3	Roster
ÅV	Åbyverket	65,8	CFB
SEF	StoraEnso Fors AB	0,4	CFB
ME	Mälarenergi	0,1	CFB
VVU	Vattenfall Värme, Uppsala	0,3	Pulver
SEAB	Sandviken Energi AB	0,4	BFB
FV	Fortum Värtan	0,1	PFBC

4.2 Glödgningsförlust

Det är stor skillnad mellan de olika askornas glödgningsförlust. Flygaskorna från Händelöverket och Mälarenergi har de lägsta glödgningsförlusterna, 4,2 respektive 4,5%.

Tabell 4.2 En sammanställning av flygaskornas glödgningsförlust (G).
Table 4.2 Fly ash specification of loss on ignition (G).

	Flygaskor (Anläggning/företag)	G [%], 800 °C	G [%], 550 °C	TOC, %
BV	Braviken pappersbruk	13,3		
HV	Händelöverket	4,2		1,4
TVL	Tekniska Verken, Linköping	30,3		
ÅV	Åbyverket	10,5		
SEF	StoraEnso Fors AB	7,1	0,15	
ME	Mälarenergi	4,5		
VVU	Vattenfall Värme, Uppsala	7,6		
SEAB	Sandviken Energi AB	8,4		
FV	Fortum Värtan	11,0		

Flygaskan från Tekniska Verken, Linköping har en glödgningsförlust på 30,3% och är därmed den aska som har den högsta glödgningsförlusten, tabell 4.2. Flygaskan togs ut från deponi och kan därmed vara ”kontaminerad” med bottenaska. De övriga flygaskornas glödgningsförlust ligger mellan ca 7-13 %.

4.3 pH, halt av aktivt CaO/Ca(OH)₂ och värmeutveckling vid blandningen

pH ligger mellan 12,5 och 12,8 för samtliga askor utom flygaskan från Sandviken Energi som har ett pH på 11,9 och flygaskan från Tekniska Verken, Linköping, vars pH är 9,0. I fallet TVL flygaskan kan det förhållandevis låga pH-värdet förklaras med att askan har hög vattenkvot (78 %) och låg Ca(OH)₂-halt (1,1 %), tabell 4.3.

Tabell 4.3 Flygaskornas pH, CaO (akt)-halt och värmeutveckling vid härdning.
Table 4.3 Fly ash pH, CaO-content and heat development during curing.

Askor (Anläggning/företag)	pH	CaO (akt) [% TS]	Värmeutveckling [°C]
BV Braviken pappersbruk	12,6	5,2	~35
HV Händelöverket	12,7	12,2	~37
TVL Tekniska Verken, Linköping	9,0	1,1*	-
ÅV Åbyverket	12,6	10,0*	-
SEF StoraEnso Fors AB	12,8	12,4	~90
ME Mälarenergi	12,6	4,6	~35
VVU Vattenfall Värme, Uppsala	12,8	9,9	~45
SEAB Sandviken Energi AB	11,9	1,7	~20
FV Fortum Värtan	12,5	1,8	-

* Ca(OH)₂

- Ingen noterad värmeutveckling

Flygaskorna från Sandviken Energi AB och Fortum Värtan har de lägsta CaO (akt)-halterna, 1,7 respektive 1,8 % TS. därefter följer flygaskorna från Mälarenergi och Braviken vars CaO (akt)-halt är 4,6 respektive 5,2 %TS. Flygaskan från Vattenfall Värme Uppsala har en CaO (akt)-halt på 9,9 % TS. Högst andel CaO (akt)-halt har flygaskorna från Stora Enso Fors och Händelöverket, 12,4 och 12,2 % TS. För flygaskorna från TVL och Åbyverket, som är våtlagrade (har vattenkvot på 78,3 resp. 65,8 %) har Ca(OH)₂-halten bestämts, vilken var 1,1 respektive 10 %TS.

Värmeutvecklingen vid blandningen var 20°C för flygaskan från Sandviken Energi, 35°C för flygaskorna från Braviken och Mälarenergi och 37°C för flygaskan från Händelöverket. Avsevärt högre värmeutveckling observerades för flygaskorna från Stora Enso Fors AB och Vattenfall Värme, 90 respektive 45°C.

4.4 Kornstorleksfördelning

Kornstorleksfördelningen har bestämts genom siktning. Resultaten redovisas i bilaga B.

Braviken. Flygaskan från Braviken består till största delen av sandfraktion, ca 80 vikt %. Ca 20 vikt % består av siltfraktion. Graderingstalet är 9, vilket innebär att flygaskan är mellangraderad.

Händelöverket. Flygaskan från Händelöverket utgörs främst av siltfraktion, ca 90 vikt %, medan de resterande 10 vikt % är sandfraktion. Graderingstalet är 6, vilket innebär att flygaskan är mellangraderad.

Tekniska Verken, Linköping. Flygaskan från Tekniska Verken, Linköping består till ca 80 vikt % av silt- och ca 20 vikt % av sandfraktion. Graderingstalet är 5, vilket innebär att det ligger på gränsen mellan att vara ensgraderad eller mellangraderad. Det räknas dock som mellangraderad.

Åbyverket. Flygaskan från Åbyverket består till ca 55 vikt % av grusfraktion, ca 30 vikt % sandfraktion och ca 15 vikt % siltfraktion. Graderingstalet är 157, vilket innebär att flygaskan är månggraderad.

Stora Enso Fors. Flygaskan från Stora Enso Fors består till ca 80 vikt % av siltfraktion och ca 20 vikt % sandfraktion. Graderingstalet är 6 vilket innebär att flygaskan är mellangraderad.

Mälarenergi. Flygaskan från Mälarenergi består till ca 70 vikt % av siltfraktion och ca 30 sandfraktion. Graderingstalet är ca 7, vilket innebär att flygaskan är mellangraderad.

Vattenfall Värme, Uppsala. Flygaskan från Vattenfall Värme består till ca 3 vikt % av lerfraktion, 68 vikt % siltfraktion och 30 vikt % sandfraktion. Graderingstalet är 5, vilket innebär att det ligger på gränsen mellan att vara ensgraderad eller mellangraderad. Det räknas dock som mellangraderad.

Sandviken Energi. Flygaskan från Sandviken Energi består till 2 vikt % av lerfraktion, ca 69 vikt % siltfraktion och 29 vikt % sandfraktion. Graderingstalet är ca 5, vilket innebär att det ligger på gränsen mellan att vara ensgraderad eller mellangraderad. Det räknas dock som mellangraderad.

Värtan. Flygaskan från Fortum Värme består till ca 58 vikt % siltfraktion och 42 vikt % sandfraktion. Graderingstalet är ca 3, vilket innebär att flygaskan är ensgraderad.

4.5 Packningsegenskaper

Flygaskornas packningsegenskaper, som torrdensitet, optimal vattenkvot och hållfasthet har undersökts med hjälp av proctorpackning. Här anges även antalet slag per skikt vid packning, närmare bestämt antalet slag/skikt som krävs för att uppnå 93 % packningsgrad. Utifrån figur 4.1 gjordes det en bedömning av de olika flygaskornas lägsta teoretiskt möjliga kompaktensitet. Tidigare undersökningar av kompaktensiteten hos flygaskor från pappersindustrin visar en variation mellan 2,4 – 2,85 kg/m³ [3].

Braviken. Flygaskans ursprungliga vattenkvot är 1,5 %. Materialet kan ej packas i torrt tillstånd. Uppnådd torrdensitet vid en vattenkvot på 23 % är 817 kg/m³. Genom att höja vattenkvoten (tillsätta mer vatten) kan materialets torrdensitet efter packning höjas. Den högsta torrdensiteten hos flygaskan uppnås vid en vattenkvot på 55 %. Vid optimal vattenkvot ligger flygaskans torrdensitet på 885 kg/m³. För att uppnå 93 % packningsgrad krävs ca 16 slag/skikt och då är hållfastheten ca 3 MPa. Hållfastheten sjunker till 2,3 MPa vid 89 % packningsgrad. När flygaskan befuktas och erhåller en vattenkvot på 62 % är hållfastheten 2,5 MPa. Brott sker vid ca 1,6, 2,0 och 1,8 % axiell kompression, vid 92 och 89 % packningsgrad och 62 % vattenkvot. Materialets lägsta teoretiskt möjliga kompaktdensitet bedöms ligga runt 1750 kg/m³.

Händelöverket. Flygaskans ursprungliga vattenkvot är 1,1 %. Materialet kan ej packas i torrt tillstånd. Uppnådd torrdensitet vid en vattenkvot på 20 % är 1461 kg/m³. Genom att höja vattenkvoten (tillsätta mer vatten) kan materialets torrdensitet efter packning höjas. Den högsta torrdensiteten hos flygaskan uppnås vid en vattenkvot på 30 %. Vid optimal vattenkvot ligger flygaskans torrdensitet på 1510 kg/m³. För att uppnå 93 % packningsgrad krävs ca 13 slag/skikt och då är hållfastheten ca 3,3 MPa. Hållfastheten sjunker till 3,1 MPa vid 90 % packningsgrad och ökar till 4,5 MPa vid 95 % packningsgrad. Brott sker vid ca 1,8 % axiell kompression, vid 93, 95 och 90 % packningsgrad. Materialets lägsta teoretiskt möjliga kompaktdensitet bedöms ligga runt 2800 kg/m³.

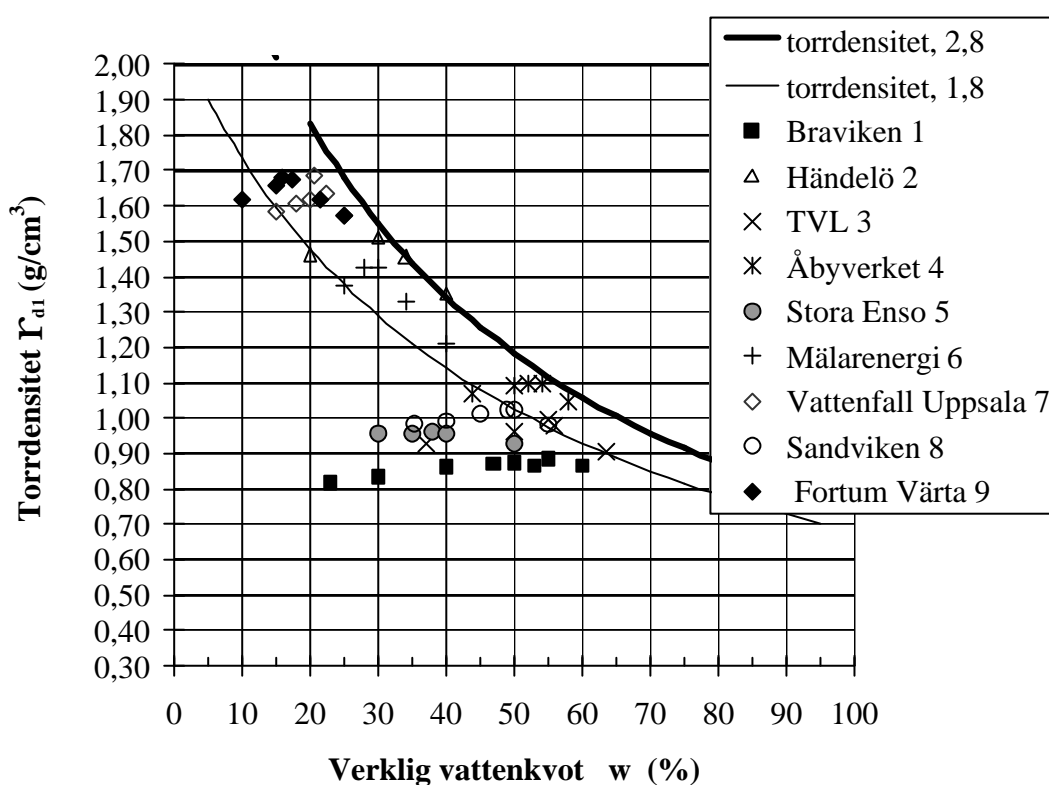
Tekniska Verken, Linköping. Flygaskans ursprungliga vattenkvot är 78,3 %. Uppnådd torrdensitet vid en vattenkvot på 37 % är 930 kg/m³. Genom att minska vattenkvoten (torka flygaskan) kan materialets torrdensitet efter packning höjas. Den högsta torrdensiteten hos flygaskan uppnås vid en vattenkvot på 56 %. Vid optimal vattenkvot ligger flygaskans torrdensitet på 980 kg/m³. För att uppnå 93 % packningsgrad krävs ca 16 slag/skikt och då är hållfastheten ca 0,8 MPa. Hållfastheten sjunker till 0,7 MPa vid 90 % packningsgrad. Brott sker vid ca 2,7 % axiell kompression, vid 93 och 90 % packningsgrad. Materialets lägsta teoretiskt möjliga kompaktdensitet bedöms ligga runt 2250 kg/m³.

Åbyverket. Flygaskans ursprungliga vattenkvot är 65,8 %. Uppnådd torrdensitet vid en vattenkvot på 44 % är 1069 kg/m³. Genom att minska vattenkvoten (torka flygaskan) kan materialets torrdensitet efter packning höjas. Den högsta torrdensiteten hos flygaskan uppnås vid en vattenkvot på 53 %. Vid optimal vattenkvot ligger flygaskans torrdensitet på 1100 kg/m³. För att uppnå 93 % packningsgrad krävs ca 13 slag/skikt och då är hållfastheten ca 0,7 MPa. Brott sker vid ca 1,3 % axiell kompression, vid 90 och 93% packningsgrad. Vid 95 % packningsgrad sker brott vid ca 1,5 % axiell kompression. Materialets lägsta teoretiskt möjliga kompaktdensitet bedöms ligga runt 2700 kg/m³.

Stora Enso Fors. Flygaskans ursprungliga vattenkvot är 0,4 %. Materialet kan ej packas i torrt tillstånd. Uppnådd torrdensitet vid en vattenkvot på 30 % är 958 kg/m³. Genom att höja vattenkvoten (tillsätta mer vatten) kan materialets torrdensitet efter packning höjas. Den högsta torrdensiteten hos flygaskan uppnås vid en vattenkvot på 38 %. Vid optimal vattenkvot ligger flygaskans torrdensitet på 960 kg/m³. För att uppnå 93 % packningsgrad krävs ca 16

slag/skikt och då är hållfastheten ca 4,5 MPa. Brott sker vid ca 0,6 och 0,9 % axiell kompression, vid 93 och 91 % packningsgrad. Materialets lägsta teoretiskt möjliga kompakt densitet bedöms ligga runt 1800 kg/m³.

Mälarenergi. Flygaskans ursprungliga vattenkvot är 0,1 %. Materialet kan ej packas i torrt tillstånd. Uppnådd torr densitet vid en vattenkvot på 25 % är 1375 kg/m³. Genom att höja vattenkvoten (tillsätta mer vatten) kan materialets torr densitet efter packning höjas. Den högsta torr densiteten hos flygaskan uppnås vid en vattenkvot på 28 %. Vid optimal vattenkvot ligger flygaskans torr densitet på 1425 kg/m³. För att uppnå 94 % packningsgrad krävs ca 16 slag/skikt och då är hållfastheten ca 12,2 MPa. Brott sker vid ca 0,5 och 1,2 % axiell kompression, vid 91 och 94 % packningsgrad. Materialets lägsta teoretiskt möjliga kompakt densitet bedöms ligga runt 2450 kg/m³.



Figur 4.1 Packningskurvor för respektive flygaska.

Figure 4.1 Dry density – water content relationship for different fly ash.

Vattenfall Värme Uppsala. Flygaskans ursprungliga vattenkvot är 0,3 %. Materialet kan ej packas i torrt tillstånd. Uppnådd torr densitet vid en vattenkvot på 15 % är 1585 kg/m³. Genom att höja vattenkvoten (tillsätta mer vatten) kan materialets torr densitet efter packning höjas. Den högsta torr densiteten hos flygaskan uppnås vid en vattenkvot på 20,6 %. Vid optimal vattenkvot ligger flygaskans torr densitet på 1684 kg/m³. För att uppnå 93 % packningsgrad krävs ca 10 slag/skikt och då är hållfastheten ca 2 MPa. Brott sker vid ca 1,0 och 1,1 % axiell kompression, vid 93 och 91 % packningsgrad. Materialets kompakt densitet bedöms ligga runt 2650 kg/m³.

Sandviken Energi. Flygaskans ursprungliga vattenkvot är 0,4 %. Materialet kan ej packas i torrt tillstånd. Uppnådd torrdenstet vid en vattenkvot på 36 % är 980 kg/m³. Genom att höja vattenkvoten (tillsätta mer vatten) kan materialets torrdenstet efter packning höjas. Den högsta torrdensteten hos flygaskan uppnås vid en vattenkvot på 49 %. Vid optimal vattenkvot ligger flygaskans torrdenstet på 1025 kg/m³. För att uppnå 93 % packningsgrad krävs ca 15 slag/skikt och då är hållfastheten ca 1,4 MPa. Brott sker vid ca 2,2 och 2,5 % axiell kompression, vid 91 och 93 % packningsgrad. Materialets kompaktdensitet bedöms ligga runt 2150 kg/m³.

Värtan. Flygaskans ursprungliga vattenkvot är 0,1 %. Materialet kan ej packas i torrt tillstånd. Uppnådd torrdenstet vid en vattenkvot på 10 % är 1615 kg/m³. Genom att höja vattenkvoten (tillsätta mer vatten) kan materialets torrdenstet efter packning höjas. Den högsta torrdensteten hos flygaskan uppnås vid en vattenkvot på 16 %. Vid optimal vattenkvot ligger flygaskans torrdenstet på 1680 kg/m³. För att uppnå 92 % packningsgrad krävs ca 8 slag/skikt och då är hållfastheten ca 8 MPa. Brott sker vid ca 0,7 och 1,3 % axiell kompression, vid 94 och 92 % packningsgrad. Materialets kompaktdensitet bedöms ligga runt 2600 kg/m³.

4.6 Totalinnehåll av oorganiska ämnen

Nedan följer en kort beskrivning av insamlad data från respektive verk/asktillverkare. Analyserna från de olika asktillverkarna följer inte samma norm. Dessa värden återges dock i syfte att lyfta fram vikten av att undersökningar av flygaska ska följa samma norm. Viss jämförelse mellan halterna hos de olika flygaskorna kan göras.

I Braviken pappersbruk, en rosterpanna där bränslet är återvunnet trämaterial, slam från pappersbruket och bark.

Tabell 4.4 Totalhalter av oorganiska ämnen i flygaska från Braviken pappersbruk, Holmen Paper.

Table 4.4 Total constituent analyses on fly ash from Braviken, Holmen Paper.

Ämne	Enhet	Halt	Ämne	Enhet	Halt
TS	%	69,8	Fe	mg/kg TS	7630
Askhalt	% av TS	75,6	K	mg/kg TS	9520
Al	mg/kg TS	51800	Mn	mg/kg TS	2190
Ca	mg/kg TS	181800	Na	mg/kg TS	5460
Cd	mg/kg TS	9	Ni	mg/kg TS	44
Co	mg/kg TS	6	Pb	mg/kg TS	760
Cr	mg/kg TS	63	Zn	mg/kg TS	1950
Cu	mg/kg TS	470			

2 Händelöverket, en CFB-panna där bränslet är trämaterial och gummiklipp.

Tabell 4.5 Totalhalter av oorganiska ämnen i flygaska från Händelöverket.
Table 4.5 Total constituent analyses on fly ash from Händelöverket.

Ämne	Enhet	Halt	Ämne	Enhet	Halt
TS	%	100,1	Cr	mg/kg TS	114
SiO ₂	% TS	18,8	Cu	mg/kg TS	542
Al ₂ O ₃	% TS	1,99	Hg	mg/kg TS	0,166
CaO	% TS	25	La	mg/kg TS	9,95
Fe ₂ O ₃	% TS	30,5	Mo	mg/kg TS	<6
K ₂ O	% TS	1,5	Nb	mg/kg TS	<6
MgO	% TS	1,05	Ni	mg/kg TS	46
MnO ₂	% TS	0,327	Pb	mg/kg TS	138
Na ₂ O	% TS	0,76	S	mg/kg TS	29000
P ₂ O ₅	% TS	0,445	Sb	mg/kg TS	8,61
TiO ₂	% TS	0,123	Sc	mg/kg TS	<1
Summa TS	% TS	80,5	Sn	mg/kg TS	<20
LOI	% TS	16,4	Sr	mg/kg TS	226
As	mg/kg TS	51,7	V	mg/kg TS	46,2
Ba	mg/kg TS	392	W	mg/kg TS	85,1
Be	mg/kg TS	0,848	Y	mg/kg TS	6,83
Cd	mg/kg TS	6,01	Zn	mg/kg TS	26200
Co	mg/kg TS	181	Zr	mg/kg TS	57,1

3 Tekniska Verken, Linköping,

Bränslet som nyttjas är en blandning av 50 % kol, 40 % gummi och 10 % trä. Flygaskans vattenkvot var 54,1 %, glödförlust 24,3 %. Flygaskan som undersöktes var ett samlingsprov från säsong 2002 – 2003.

Tabell 4.6 Totalhalter av oorganiska ämnen i flygaska från TVL.
Table 4.6 Total constituent analyses on fly ash from TVL.

Ämne	Enhet	Halt
TOC	mg/kg TS	14000
As	mg/kg TS	23
Ba	mg/kg TS	660
Cd	mg/kg TS	8,20
Co	mg/kg TS	250
Cr	mg/kg TS	51
Cu	mg/kg TS	280
Hg	mg/kg TS	0,54
Mo	mg/kg TS	5,4
Ni	mg/kg TS	63
Pb	mg/kg TS	570
Sb	mg/kg TS	54
Se	mg/kg TS	15
Zn	mg/kg TS	47800

4 Åbyverket,

I tabellen redovisade värden är års medelvärden på Åbyverkets aska från P5.

Tabell 4.6 Totalhalter av oorganiska ämnen i flygaska från Åbyverket.
Table 4.6 Total constituent analyses on fly ash from Åbyverket.

Ämne	Enhet	Halt	Ämne	Enhet	Halt
Ca	% av TS	19,5	As	mg/kg TS	38
Na	% av TS	1,1	Cr	mg/kg TS	81
K	% av TS	2,1	Cu	mg/kg TS	171,4
S	% av TS	3,6	Pb	mg/kg TS	98,7
Hg	mg/kg TS	0,5	Cd	mg/kg TS	7,4

5 StoraEnso Fors AB, en CFB-panna där bränslet är bark, flis, bränslepellets och en mindre mängd slam med innehåll av bl.a. lera och krita. Slammängden tillsätts efter ett visst recept för att få en flygaska som brinner ihop på ca 24 timmar.

Tabell 4.7 Totalhalter av oorganiska ämnen i flygaska från Stora Enso Fors AB.
Table 4.7 Total constituent analyses on fly ash from Stora Enso Fors AB.

Ämne	Enhet	Halt	Ämne	Enhet	Halt
TS	%	100,6	Cr	mg/kg TS	86,9
SiO ₂	% TS	33,9	Cu	mg/kg TS	97,7
Al ₂ O ₃	% TS	23,4	Hg	mg/kg TS	0,12
CaO	% TS	25,6	La	mg/kg TS	24,4
Fe ₂ O ₃	% TS	2,31	Mo	mg/kg TS	<6
K ₂ O	% TS	3,87	Nb	mg/kg TS	14,7
MgO	% TS	1,77	Ni	mg/kg TS	33,8
MnO ₂	% TS	0,507	Pb	mg/kg TS	61,5
Na ₂ O	% TS	1,39	S	mg/kg TS	6410
P ₂ O ₅	% TS	1,68	Sc	mg/kg TS	4,47
TiO ₂	% TS	0,484	Sn	mg/kg TS	<20
Summa TS	% TS	94,9	Sr	mg/kg TS	571
LOI	% TS	2,6	V	mg/kg TS	46,9
As	mg/kg TS	6,44	W	mg/kg TS	<60
Ba	mg/kg TS	844	Y	mg/kg TS	14,4
Be	mg/kg TS	1,14	Zn	mg/kg TS	737
Cd	mg/kg TS	4,21	Zr	mg/kg TS	439
Co	mg/kg TS	9,15			

6 Mälarenergi, Västerås en CFB-panna där bränslet är spillprodukter från skogsavverkning i form av grenar och toppar. Mängden tillgängligt för lakning redovisas inom parentes i tabell 4.8.

Tabell 4.8 Totalhalter av oorganiska ämnen i flygaska från Mälarenergi AB.
Table 4.8 Total constituent analyses on fly ash from Mälarenergi AB.

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

Värdena inom parantes är mätosäkerhet

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

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

Tabell 4.9 Totalhalter av oorganiska ämnen i flygaska från Vattenfall Värme Uppsala.
Table 4.9 Total constituent analyses on fly ash from Vattenfall Värme Uppsala.

Analys	Halt	Flygaska 2000-02-17	Flygaska 2000-03-21	Flygaska 2000-03-25
LOI	%	10,3	10,0	9,8
As	mg/kg TS	19,9	18,8	6,83
Ba	mg/kg TS	573	778	691
Be	mg/kg TS	2,55	2,73	1,85
Cd	mg/kg TS	1,36	1,67	<0,121
Co	mg/kg TS	9,67	19,4	12,9
Cr	mg/kg TS	39,2	46,8	47,2
Cu	mg/kg TS	37,0	32,8	35,2
Hg	mg/kg TS	0,490	0,331	0,474
La	mg/kg TS	36,9	39,7	53,7
Mo	mg/kg TS	14,7	13,6	14,8
Nb	mg/kg TS	<0,609	<5,69	7,45
Ni	mg/kg TS	29,1	24,4	23,7
Pb	mg/kg TS	32,6	22,7	28,5
Sc	mg/kg TS	5,29	5,06	6,73
Sn	mg/kg TS	<24,4	<22,8	<22,2
Sr	mg/kg TS	290	323	301
V	mg/kg TS	52,5	44,7	49,6
W	mg/kg TS	<60,9	<56,9	<55,4
Y	mg/kg TS	42,4	55,5	47,8
Zn	mg/kg TS	140	293	121
Zr	mg/kg TS	46,5	59,8	50,3

8 Sandviken Energi AB (referens: Lakning och karakterisering av bibränsleaska från Sandviken Energi AB, B. Lind, 2002-06-07) önskar utnyttja den aska som uppstår som restprodukt vid värmeproduktionen som fyllnadsmaterial i vägar och upplag. För värmeproduktionen används inhemska bränslen i form av stycketorv, flis, spån och biopellets. Råvaran till den aktuella bioaskan är ca 60 % torv och 40 % träspån. Inget returträ ingår i bränslet. Den aktuella askan består av en blandning av flygaska och bottenaska där flygaskan är helt dominerande, uppskattad till ca 95 %. Askblandningen är finkornig, huvudsakligen silt och sand. Flygaskan produceras i två 20 MW BFB hetvattenpannor.

Tabell 4.10 Totalhalter av oorganiska ämnen i flygaska från Sandviken Energi AB.
Table 4.10 Total constituent analyses on fly ash from Sandviken Energi AB.

Ämne	Enhet	Halt	Ämne	Enhet	Halt
TS	%	92,6	Cr	mg/kg TS	72,0
SiO ₂	% TS	16,04	Cu	mg/kg TS	163
Al ₂ O ₃	% TS	5,51	Hg	mg/kg TS	0,442
CaO	% TS	15,01	La	mg/kg TS	203
Fe ₂ O ₃	% TS	8,53	Mo	mg/kg TS	25,0
K ₂ O	% TS	1,88	Nb	mg/kg TS	15,6
MgO	% TS	1,29	Ni	mg/kg TS	44,7
MnO ₂	% TS	0,433	Pb	mg/kg TS	47,5
Na ₂ O	% TS	0,764	S	mg/kg TS	6370
P ₂ O ₅	% TS	0,559	Sc	mg/kg TS	21,1
TiO ₂	% TS	0,185	Sn	mg/kg TS	<20
Summa TS	% TS	85,6	Sr	mg/kg TS	466
LOI	% TS	11,6	V	mg/kg TS	99,2
As	mg/kg TS	27,4	W	mg/kg TS	<60
Ba	mg/kg TS	785	Y	mg/kg TS	210
Be	mg/kg TS	4,69	Zn	mg/kg TS	323
Cd	mg/kg TS	4,30	Zr	mg/kg TS	188
Co	mg/kg TS	17,3			

9 Fortum värme Stockholm AB, Värta

Flygaskan nyttjas idag för stabilisering av flygaska från avfallsförbränning. Tack vare flygaskans härdningsegenskaper och höga hållfasthet har askleverantören full avsättning för sin flygaska. Analys saknas.

Tabell 4.11 Totalhalter av oorganiska ämnen i flygaska från Fortum värme Stockholm AB, Värta.
Table 4.11 Total constituent analyses on fly ash from Fortum värme Stockholm AB, Värta.

Ämne	Enhet	Halt	Ämne	Enhet	Halt
Svavel	vikt-%	1,76	MgO	vikt-%	14,4
Cl	vikt-%	0,04	CaO	vikt-%	20,5
Al ₂ O ₃	vikt-%	11,37	Na ₂ O	vikt-%	1,03
SiO ₂	vikt-%	24,5	K ₂ O	vikt-%	1,14
Fe ₂ O ₃	vikt-%	4,61	P ₂ O ₅	vikt-%	0,50
TiO ₂	vikt-%	0,44	BaO	vikt-%	0,13
MnO	vikt-%	0,16			

4.7 Lakningsundersökning

Provkroppar med flygaskor från Stora Enso Fors (SEF) och Mälarenergi AB tillverkades. Två provkroppar med flygaska från SEF (5) tillverkades, en med stabiliserad med 5 % portlandcement (PCe) och en stabiliserad med 2,5 % PCe och 2,5 % Merit 5000 (Merit). En provkropp tillverkades med flygaska från ME (6) som var stabiliserad med 2,5 % PCe och 2,5 % (M). Provkropparna lakades av SGI och lakvattnets innehåll av metaller undersöktes av ANALYTICA AB. Resultaten redovisas i bilaga C.

Undersökningen visar att lakning av metaller är låg. Den kumulativa urlakningen, efter $L/S = 10$ ligger på mindre än 1 mg/kg TS. Med hänsyn till att $L/S = 10$ uppnås efter en mycket lång tid bedöms metallurlakningen som minimal. Undantaget är Ca, K, Na Ba och S. Dessa ämnen uppvisar större lakbarhet.

Det bör noteras att urlakning av Ca och Ba inte uppvisar en avstannande tendens, bilaga. Urlakning av bl. a. Cr är något förhöjd vid lakning i laboratorium. Det bör noteras att lakningen inte tar hänsyn till att exempelvis pH förändras i profilen. Vid kolonnförsök analyseras det vatten som har perkolerat kolonnen med flygaska. Undersökning utförd i Finland visar att pH sänks i profilen från ca 12 till ca 6,5 – 7,0 några cm under askskiktet [1]. pH-sänkningen medför att metaller fälls ut eftersom mobiliteten hos dessa är minst vid pH ca 7. En annan viktig faktor är att för att uppnå $L/S = 10$ tar det mellan 10 – 1000 år beroende på vägkonstruktion.

4.8 Diskussion

I detta avsnitt finns en sammanställning av resultat från steg 1. Syftet med denna sammanställning var att möjliggöra val av flygaskor till det fortsatta arbetet i steg 2.

4.8.1 Sammanställning

I tabell 4.12 görs en sammanställning av viktiga materialparametrar. Syftet med sammanställningen var att baserat på erhållna resultat välja ut fyra flygaskor för den fortsatta undersökningen i steg 2. Målsättningen var att gruppera flygaskorna efter typ av panna, typ av bränsle och tekniska egenskaper. I Steg 1 undersöktes självhärddningsegenskaper efter 14 dygns härdning, dvs flygaskorna undersöktes utan tillsats av bindemedel. Erfarenheter från andra undersökningar, [1] och [2] visar att flygaskornas beständighet mot tjälpåverkan ökar vid tillsats av cement. I Steg 2 undersöktes valda flygaskors tekniska egenskaper med tillsats av cement, kalk och/eller Merit 5000. Nedan görs en sammanställning av flygaskornas bedömda möjlighet att nyttjas som material i en vägkonstruktion ur geoteknisk synpunkt.

Aska 1, Braviken – Flygaskans CaO (akt)-halt ligger på ca 5,2 %. Lämpligt som vägbyggnadsmaterial, det behövs bindemedel (exempelvis cement) för att förbättra materialets hållfasthet och beständighet mot exempelvis tjäle.

Aska 2, Händelöverket – Hög CaO (akt)-halt som ligger på ca 12,2 %. Materialet kan lämpa sig som bindemedelskomponent. Även lämpligt som vägbyggnadsmaterial (stabiliserat byggnadsskikt) förutsatt att materialet tål frys- och tiningscyklar utan en markant nedsättning av hållfastheten. Troligtvis behövs det små mängder av bindemedeltillsats. Stabiliseringsprocessen är långsam och kan fortgå även efter 90 dagar.

Aska 3, Tekniska Verken, Linköping – Passar som vägbyggnadsmaterial, men det behövs en tillsats av relativt mycket bindemedel. Askan är en deponiaska, med hög vattenkvot. TVL askan har lagrats vått under en längre tid, 2 – 12 månader. Den höga vattenkvoten, ca 78 %, medför att materialets härdningskapacitet är förbrukad. Askan togs ut från deponi, pH i materialet var förhållandevis låg. Materialet har högre glödförlust (oförbränt) än övriga flygaskor. Trots att flygaskan är en deponiaska är den sammansatt av fraktionen sand och mindre, dvs har låg härdningskapacitet. För vidare arbete rekommenderas färsk flygaska. Den torra flygaskans egenskaper har ej undersökts i detta projekt.

Tabell 4.12 Sammanställning av uppmätta parametrar. Det gråa fältet representerar de flygaskor som ska undersökas vidare i den fortsatta studien.

Table 4.12 Specification of measured parameters. Grey area represents fly ash which were investigated in step 2 of the studie.

	w [%]	G [%]	pH	CaO (akt), [%]	Torrtdensitet [kg/m ³]	w _{opt} , [%]	CaO (akt)/ w [%]	T [°C]	Enaxligt tryckförsök, [MPa] efter 14 dygn
BV (1)	1,5	13,3	12,6	5,2	885	55	3,47	35	3
HV (2)	1,1	4,2	12,7	12,2	1510	30	11,09	37	4,1
TVL (3)	78,3	30,3	9	1,1	980	56	0,014	-	0,8
ÅV (4)	65,8	10,5	12,6	10	1100	52	0,152	-	1
SEF (5)	0,4	7,1	12,8	12,4	960	38	31	90	4,5
ME (6)	0,1	4,5	12,6	4,6	1425	28	46	35	12,2
VVU (7)	0,3	7,6	12,8	9,9	1684	20,6	33	45	2
SEAB (8)	0,4	8,4	11,9	1,7	1025	49	4,25	20	1,4
FV (9)	0,1	11	12,5	1,8	1680	16	18	-	8,1

Aska 4, Åbyverket – Passar som vägbyggnadsmaterial, men det kommer att behövas relativt mycket bindemedel för att öka hållfasthet och frostbeständighet. Även denna flygaska är en deponiaska och har lagrats vått. Kornstorleksmässigt är den sammansatt av > 50 grusfraktion. Bindemedel som kan vara aktuella är färsk flygaska med hög härdningsegenskap och eller cement. Torr flygaska från Åbyverket har med stor sannolikhet härdningsegenskaper, som kan minska behovet av tillsats av bindemedel.

Aska 5, Stora Enso Fors – Likvärdig med flygaska 2 (HV), dvs. hög CaO (akt)-halt etc. Flygaskan ger hög värmebildning vid inblandning av vatten, vilket medför att materialet blir svårt att blanda. Kan vara ett bra material att nyttja tillsammans med någon annan flygaska som har lägre CaO-halt eller som är släckt.

Aska 6, Mälarenergi – Ett bra material, både som bindemedel och som vägbyggnadsmaterial. Det är möjligt att det behövs bindemedeltillsats för att nå högre hållfasthet och beständighet mot tjäle.

Aska 7, Vattenfall Värme Uppsala – Liknar flygaskorna 2 (HV) och 5 (SEF). Materialet uppvisar dock förhållandevis låg hållfasthet (2 MPa), trots hög CaO (akt)-halt. Det är möjligt att med tillsats av bindemedel få högre hållfasthet och ökad beständighet mot tjäle. Extra tillsats av vatten efter packning kan medföra extra hållfasthetsutveckling.

Aska 8, Sandviken Energi – Låg CaO (akt)-halt medför att flygaskan inte är reaktiv. Flygaskan kan dock nyttjas som vägbyggnadsmaterial men då måste bindemedel tillsättas.

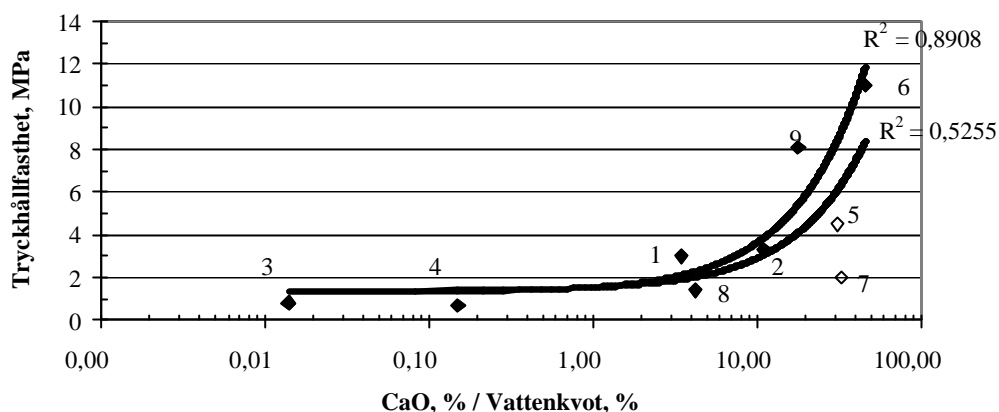
Aska 9, Värtan – Materialets höga hållfasthet och låga CaO (akt)-halt tyder på att det är andra ämnen Al, Si Mg, Ca etc som bidrar till hållfasthetsutvecklingen. Flygaskans vattenkvot är ca 0,1 %. Flygaskan har förhållandevis hög hållfasthet och hög torrdensitet. Materialet kan testas som bindemedel och som vägbyggnadsmaterial.

4.8.2 Bedömning

I figur 4.2 framgår att för de flesta flygaskorna, med undantag av flygaskorna från Stora Enso Fors AB (5) och Vattenfall Värme Uppsala (7) finns det ett samband mellan hållfasthet hos materialen vs. CaO (akt)-halt dividerad med ursprunglig vattenkvot (CaO (akt)/w). Att askorna 5 och 7 inte följer detta samband skulle kunna förklaras med att den tillsatta mängden vatten vid packning inte räckte till för att uppnå optimal hållfasthet och den värmeutveckling som sker vid härdning se tabell 4.12. Båda askorna borde uppvisa högre hållfasthet eftersom dessa askors innehåll av CaO (akt) är höga, 12,8 % respektive 9,9 %. Det finns naturligtvis ett stort antal osäkerhetsfaktorer i detta antagande. Förbränningstemperatur, panntyp, bränslesort, halt av glödrest etc. varierar mellan de olika askleverantörerna. Även tidigare undersökningar utförda på flygaskor från pappersindustrin indikerar att ett samband råder mellan hållfasthet vs. CaO (akt)/w. Det bör noteras att det finns inget entydigt samband mellan flygaskornas siktkurva, se bilaga B och packningsegenskaper. Detta kan till delar förklaras med kornform, ytladdning och specifik yta varierar hos de olika flygaskorna.

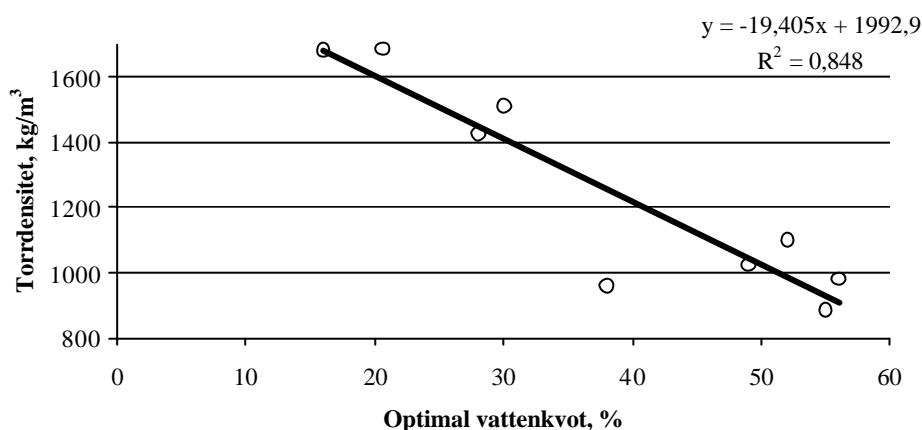
Följande slutsatser kan dras utifrån erhållna resultat från undersökningen:

- Flygaskans ursprungliga vattenkvot påverkar hållfastheten. Redan vid en vattenkvot på några % reduceras hållfastheten. Vattenkvot på 60 % –70 % ger låga hållfasthetsvärden.
- Det finns ett visst samband mellan hållfasthet och CaO (akt)-halt i materialet. CaO (akt)-halt på ca 2 % kan ge förhållandevis hög hållfasthet, förutsatt att askans ursprungliga vattenkvot är låg.
- Det finns ett klart samband mellan optimal vattenkvot (w_{opt}) och maximal torrdensitet, figur 4.3. Flygaskor med höga w_{opt} har låg torrdensitet.
- Det finns inget direkt samband mellan hållfasthet och torrdensitet.



Figur 4.2. Tryckhållfasthet efter 14 dygn vs. CaO (akt)-halt/ursprunglig vattenkvot. Vattenkvot på 60 – 70 %, dvs våtlagring ger låga hållfasthetsvärden.

Figure 4.2. Shear strength after 14 days of curing vs. CaO-content/original water content (w). w 60 – 70 %, gives poor shear strength.



Figur 4.3 Sambandet mellan torrdensitet och optimal vattenkvot hos flygaskorna.

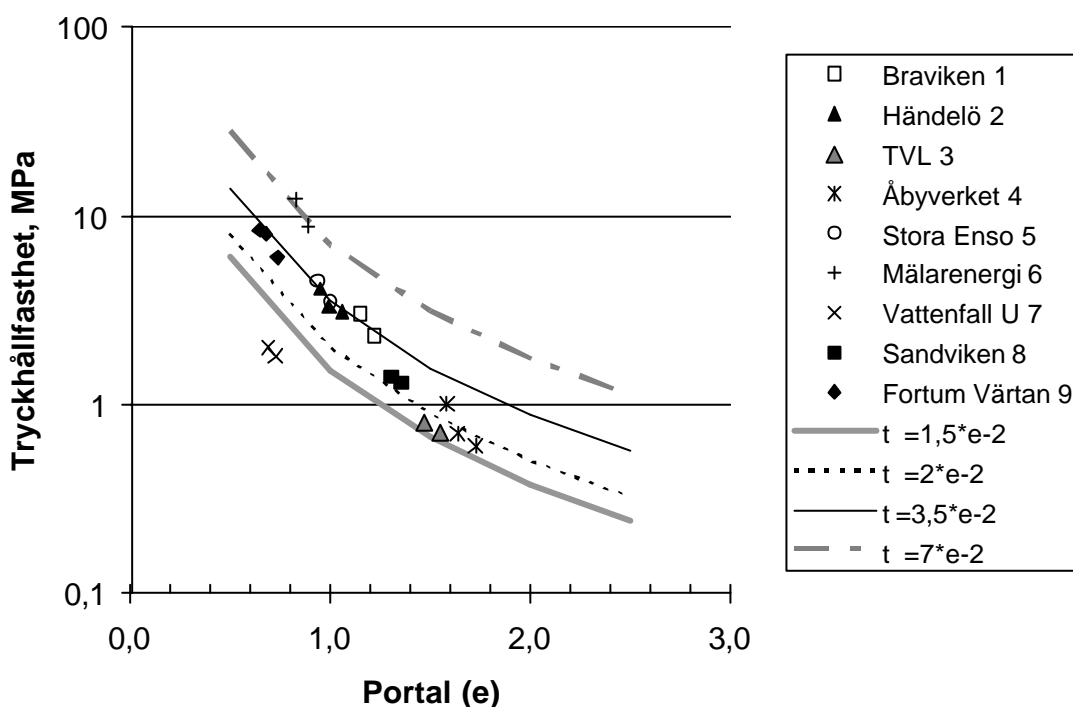
Figure 4.3 Relationship between dry density and optimal water content.

Ett alternativt sätt att redovisa resultaten är att visa sambandet mellan portal, e , och tryckhållfasthet, figur 4.4. Portal för respektive flygaska har räknats fram genom att nyttja materialens torrdensitet och kompaktensitet. Utifrån proctorförsöken har den teoretiskt lägsta kompaktensiteten tagits fram för respektive flygaska. I och med att två till tre olika packningsgrader för respektive flygaska undersökts vad gäller hållfasthet, finns det hållfasthetsvärden med olika portal för en flygaska. Samtliga värden presenteras i figur 4.4. Som det framgår i figuren finns det ett samband mellan hållfasthet och portal, trots att det är flygaskor med olika ursprung som har undersökts. Enligt en rapport, [5] finns det ett samband

mellan hållfasthet och portal hos sintrat material och fuktiga sligers. Ekvationen som föreslås här är:

$$t = k * e^{-c}$$

där t är tryckhållfastheten efter 14 dygn, k är en konstant beroende av bindningarnas styrka, e är portalet och c är en konstant beroende av partikelstorleken. Schematiskt har fyra olika bindningskrafter föreslagits, k mellan 1,5 för den svagaste flygaskan och 7 för den mest hållfasta, figur 4.4. Flygaskorna kommer från olika tillverkningsprocesser, har olika innehåll av CaO (akt), vattenkvot etc., vilket medför att bindekraften mellan kornen varierar. Konstanten c antogs vara lika med 2 för samtliga flygaskor. Detta baseras på att flygaskorna är förhållandevis homogena vad gäller kornstorlekssammansättning. Det är hållfastheten hos flygaskan från Vattenfall Värme Uppsala (7) som avviker något från de värden som man skulle förvänta sig, detta genom att ha lägre hållfasthet. Med stor sannolikhet gäller motsvarande samband även flygaskan från SEF (5). Detta kan förklaras med att w_{opt} inte är tillräcklig för att maximera härdningen.



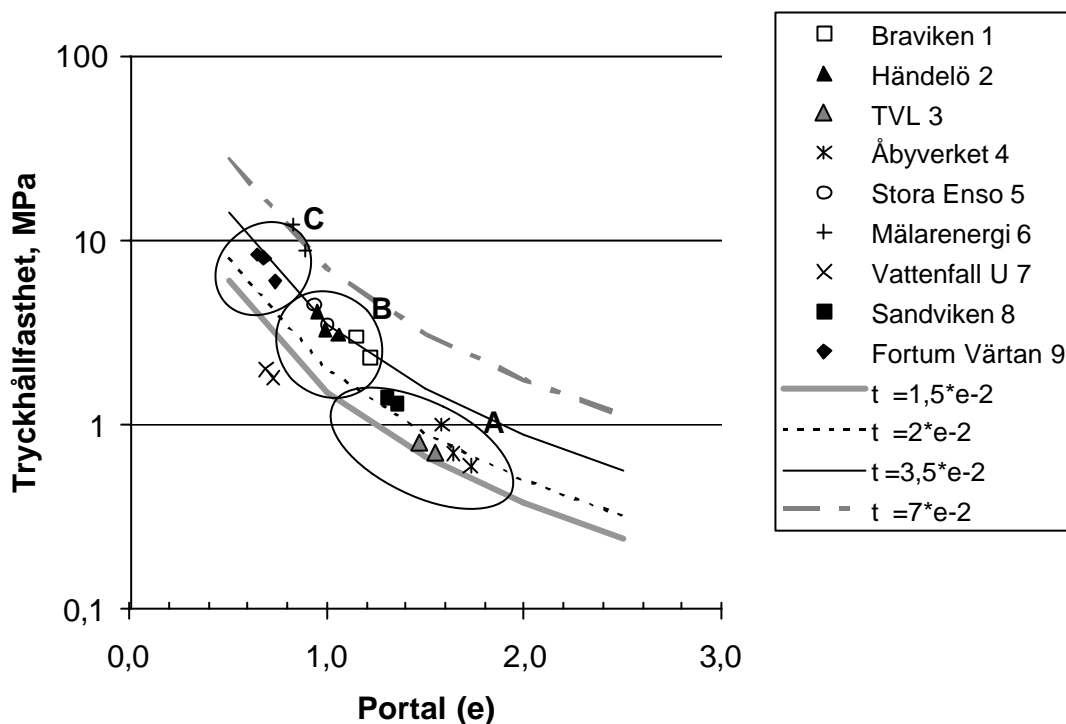
Figur 4.4 Sambandet mellan portal och tryckhållfasthet (efter 14 dygn). OBS bokstaven t står för t .

Figure 4.4 Correlation between void ratio and shear strength (after 14 days of curing). t stands for t .

4.8.3 Gruppering

Flygaskorna grupperas utifrån portal och erhållna hållfasthetsvärden i tre "grupper", från A – C, figur 4.5. Gruppen A är flygaskor med högt portal ($> 1,2$) och låg hållfasthet (< 2 MPa).

Hit hör flygaskorna från TVL, Åbyverket och Sandviken Energi. Gruppen B består av flygaskor med portal mellan 0,9 – 1,2 och hållfasthet mellan 2 – 5 MPa. Till gruppen B hör flygaskorna från Braviken, Händelöverket och Stora Enso Fors AB. Gruppen C består av flygaskor med portal < 0,9 och hållfasthet med > 5 MPa. Till gruppen C hör flygaskorna från Mälarenergi och Fortum Värtan. Dessutom bedöms flygaskan från Vattenfall Uppsala höra till denna grupp baserat på materialets låga portal. Den låga vattenkvoten som tillsattes flygaskan vid packning, w_{opt} , är inte tillräcklig för att ge härdning i materialet. Extra vatten bör tillsättas flygaskan för att uppnå optimal hållfasthetsutveckling.



Figur 4.5 Sambandet mellan portal och hållfasthet (14 dygn), samt en gruppering av flygaskorna utifrån tekniska egenskaper och förutsättningar. OBS bokstaven t står för t .

Figure 4.5 Correlation between void ratio and shear strength (14 days)., Fly ashes are grouped according to technical properties. t stands for t .

4.8.4 Val av flygaskor inför Steg 2 i projektet

Observera att samtliga flygaskor har potential att nyttjas som ”byggnadsmaterial” i anläggningstekniska applikationer. Här väljs dock fyra ”typiska” material ut för de fortsatta studierna.

Bästa resultat fås med torra (’färska’) flygaskor vad gäller härdningsrelaterade egenskaper. Möjlighet att lagra flygaskorna torrt ökar askans potential.

Utifrån resultaten från steg 1 har följande flygaskor valts ut för den fortsatta studien där flygaskorna stabiliserades med bindemedel:

- Tekniska Verken i Linköping, *grupp A*
- Stora Enso Fors AB, *grupp B*
- Mälarenergi, *grupp C*
- Fortum, Värtan, *grupp C*

Valet av just dessa flygaskor gjordes med hänsyn till typ av panna och bränsle samt tekniska egenskaper. Syftet med att tillsätta Portland cement till flygaskorna var att kontrollera hur tillsatsen påverkar hållfastheten och beständigheten mot tjäle.

Flygaskan från *TVL* valdes eftersom denna flygaska var en lagrad flygaska från deponi. Materialets vattenkvot är hög. CaO (akt)-innehållet bedöms vara förbrukat i materialet. Flygaskans härdningskapacitet bedömdes vara låg utan tillsats av bindemedel. Bränslet var 50 % kol, 10 % trä och 40 % gummi. Panntypen rosterpanna. Syftet med tillsats av portlandcement var att höja materialets härdningskapacitet och därmed hållfasthet.

Flygaskan från *StoraEnso Fors AB* valdes eftersom denna flygaska var en torr flygaska från pappersindustrin. Materialets vattenkvot är låg. CaO (akt)-innehållet låg på ca 12,4 %. Flygaskans härdningskapacitet bedömdes vara hög, men hållfastheten låg på ca 4,5 MPa utan tillsats av bindemedel. Bränslet var biobränsle och en mindre mängd blandslam som innehåller lera och kalk. Panntypen är en CFB-panna. Syftet med tillsats av portlandcement var att höja materialets hållfasthet och tjälbeständighet.

Flygaskan från *Mälarenergi* valdes eftersom denna flygaska var en färsk flygaska från kraftvärmeverk. Materialets vattenkvot är låg. CaO (akt)-innehållet låg på ca 4,4 %. Flygaskans härdningskapacitet bedömdes vara hög utan tillsats av bindemedel. Bränslet var grenar och toppar från skogsavverkning. Panntypen är en CFB-panna. Syftet med tillsats av portlandcement var att höja materialets hållfasthet.

Flygaskan från *Fortum, Värtan* valdes eftersom denna flygaska var en färsk flygaska med höga hållfasthetsvärden. Materialets vattenkvot är låg (0,1 %). CaO (akt)-innehållet låg på ca 1,8 %. Flygaskans härdningskapacitet bedömdes vara hög utan tillsats av bindemedel. Bränslet var 5 – 12 % olivkärnor och resten kol. Panntypen är PFBC (trycksatt cirkulerande flytbädd med dolomit som bäddsand). Syftet med tillsats av portlandcement var att höja materialets härdningskapacitet och därmed hållfasthet.

5 RESULTAT OCH ANALYS, STEG 2

Inför steg 2 togs nya prover från de fyra askleverantörerna. Materialens CaO (akt)-halt, w och tekniska egenskaper som w_{opt} och maximal torrdensitet kontrollerades. Efter kontroll av ovan redovisade parametrar stabiliserades flygaskorna med 2,5 och 5 vikt-% TS prortlandcement (PCe).

5.1 Kontroll

Som det framgår i tabellerna 5.1 och 5.2 är materialen från steg 1 och 2 snarlika men viss variation förekommer. I steg 2 var TVL flygaskans w 92 %, dvs ca 14 % högre än i steg 1. Flygaskans härdningskapacitet antas vara lägre i steg 2, dvs ett sämre material som stabiliseras med cement. Det osläckta kalkinnehållet var drygt 2,5 gånger högre i steg 2. I och med den höga vattenkvoten är kalkinnehållet av mindre betydelse för härdningen. De övriga flygaskornas w var på samma nivå i steg 2 som i steg 1, samtliga prover var ”torra” och w låg mellan 0 – 0,4 %. Flygaskorna från SEF och FV hade något högre halt av CaO (akt) i steg 2, tabell 5.1. I steg 2 va CaO (akt)-innehållet i flygaskan från ME nästan dubbelt så hög som i steg 1, 8,7 %, jämförd med 4,6 % i steg 1. Materialens optimala vattenkvot, w_{opt} , och maximala densitet indikerar att det är små skillnader mellan flygaskorna från steg 1 och steg 2, med undantag av flygaskan från ME. Det senare materialet har markant lägre maximal torrdensitet, 1300 kg/m³ jämförd med 1420 kg/m³ i steg 1. En förklaring kan vara att materialets CaO (akt)-halt är nära dubbelt så hög i steg två.

Tabell 5.1 De olika stegens ursprungliga vattenkvot och torrdensitet.
Table 5.1 Measurements of water content and Ca-content during step 1 and 2 of the project.

Aska	w , [%]		CaO (akt) [%]	
	Steg 1	Steg 2	Steg 1	Steg 2
TVL (3)	78,3	92,0	1,1 (släckt kalk)	2,8 (släckt kalk)
SEF (5)	0,4	0,1	12,4	13,1
ME (6)	0,1	0,3	4,6	8,7
FV (9)	0,1	0,0	1,8	2,3

Tabell 5.2 De olika stegens optimala vattenkvot och torrdensitet.
Table 5.2 Measurements of optimal water content and dry density during step 1 and 2 of the project.

Aska	w_{opt} , [%]		Torrdensitet, max [kg/m ³]	
	Steg 1	Steg 2	Steg 1	Steg 2
TVL (3)	56	49-50	980	1040
SEF (5)	38	45-46	960	930
ME (6)	28	n. 30	1425	1300
FV (9)	16	18	1680	1700

5.2 Stabiliserad flygaska

Den optimala vattenkvoten var samma oberoende tillsats av bindemedel. Det bör noteras att cementtillsats på 2,5 % och 5 % medför en viss minskning av blandningarnas maximala torrdensitet, tabell 5.3. Detta medför att materialets porositet och portal ökar. Högre tillsats av cement ger något högre maximal torrdensitet, tabell 5.3.

Tabell 5.3 De stabiliserade proverna optimala vattenkvot och maximala torrdensitet.
Table 5.3 Optimal water content and maximum dry density of Portland cement (PCe) stabilised samples.

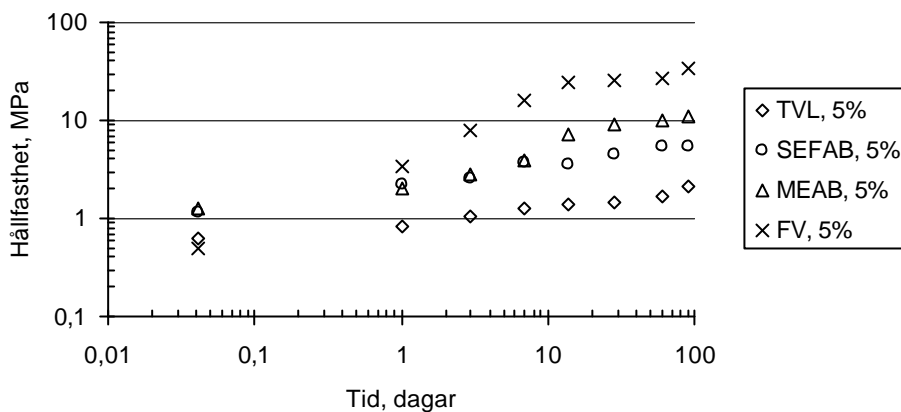
Aska	w_{opt} , [%]	Arbetsmängd vid packning	Torrdensitet [kg/m^3]	
			PCe 2.5 %	PCe 5 %
TVL (3)	50		c. 920	c. 940
SEF (5)	45	12 slag/skikt, 5 skikt	c. 845	c. 865
ME (6)	30		c. 1185	c. 1210
FV (9)	18	10 s/s, 5 skikt	c. 1595	c. 1620

I tabell 5.4 redovisas de olika tillverkade provernas hållfasthetsutveckling med tiden. Det bör observeras att självhårdade prover har undersökts efter 14 dygn. Tabellens resultat redovisas och förtydligas i två diagram, figur 5.1 och 5.2. I figur 5.1 redovisas hållfasthetsutvecklingen för flygaskorna med tiden, medan i figur 5.2 presenteras den procentuella hållfasthetsutvecklingen, där hållfastheten efter 90 dagar antogs som 100 %. Resultaten visar att efter 14 dagars härdningstid blir hållfastheten av cementstabiliserade prov lägre hos flygaskorna från SEF (5) och ME (6) än när de inte har stabiliserats, tabell 5.4. Flygaskorna från TVL (3) och FV (9) erhåller högre hållfasthet med cementtillsats, tabell 5.4. Gemensamt för de två senaste flygaskorna är att dessa har låga halter av CaO (akt). FV flygaskan får högre hållfasthet vid 2,5 % cementtillsats än vid 5%. Detta kan bero på att w på 18 % är inte tillräcklig för härdningen.

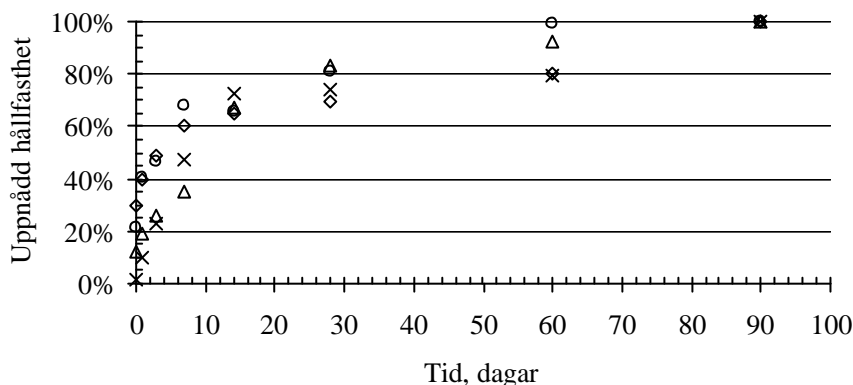
Tabell 5.4 Provernas hållfasthetsutveckling med tiden.
Table 5.4 Shear strength development during curing time.

Aska	Bindemedel	Tryckhållfasthet, 1-axlig [MPa]							
		1 h	1 d	3 d	7 d	14 d	28 d	60 d	90 d
	PCe 0 %					0,8			
TVL (3)	PCe 2.5 %						1,3 *		
	PCe 5.0 %	0,63	0,84	1,04	1,28	1,38	1,48	1,70	2,12
	PCe 0 %					4,5			
SEF (5)	PCe 2.5 %						4,64 / 4,55		
	PCe 5.0 %	1,15	2,19	2,56	3,69	3,6	3,87 / 4,43	5,43	5,46
	PCe 2.5 %					12,2			
ME (6)	PCe 2.5 %						8,64		
	PCe 5.0 %	1,29	2,03	2,79	3,82	7,25	9,01	10,06	10,85
	PCe 0 %					8,4			
FV (9)	PCe 2.5 %						37,1		
	PCe 5.0 %	0,49	3,35	7,86	16,2	24,8	25,3	27,1	34,3

* Störningar i provstyckets spännings-/deformationssamband.



Figur 5.1 Hållfasthetsutveckling med tiden.
 Figure 5.1 Shear strength after different curing time.



Figur 5.2 Den procentuella hållfasthetsutvecklingen med tiden. Hållfastheten efter 90 dagar antogs som 100 %.
 Figure 5.2 Development of shear strength after curing time as fraction of the samples shear strength after 90 days of curing.

Tabell 5.5 redovisar hur hållfastheten påverkas hos provkropparna efter en frys tiningscykel (F-S), som proverna utsätts för under 10 dygn med vattengenomströmning. Materialens permeabilitet ligger i storleksordningen 10^{-7} till $< 10^{-9}$ m/s.

Tabell 5.5 Redovisning av hållfasthetsvärden och permeabilitet.
Table 5.5 Shear strength and permeability.

Aska Bindemedel	t_{fu} , MPa, efter 28 d	$t_{fu}^{\#}$, MPa, efter 28 d	$t_{fu}^{\text{§}}$ [MPa]	Hydraulisk konduktivitet efter 28 d, k [m/s]
PCe 0 %	0,8			
3 PCe 2.5 %	1,3 *	0,06		
PCe 5.0 %	1,48	0,1	0,43	7,0E-08
PCe 0 %	4,5			
5 PCe 2.5 %	4,64 / 4,55	3,70		
PCe 5.0 %	3,87 / 4,43	3,41	3,08	2,8E-07
PCe 0 %	12,2			
6 PCe 2.5 %	8,64	4,43		
PCe 5.0 %	9,01	7,65	6,20	2,2E-08
PCe 0 %	8,4			
9 PCe 2.5 %	37,1	35,1	28,0	
PCe 5.0 %	25,3	26,9		2E-09 - < 1E-9

[#] Försöken utfördes på stabiliserade prov som har genomgått frysningstingscykler.

[§] Försöken utfördes på prov som undersöktes vad gäller materialens hydrauliska konduktivitet.

* Störningar i provstyckets spännings-/deformationssamband.

Fet kursiv stil är hållfasthetsvärden efter 14 dagars härdningstid.

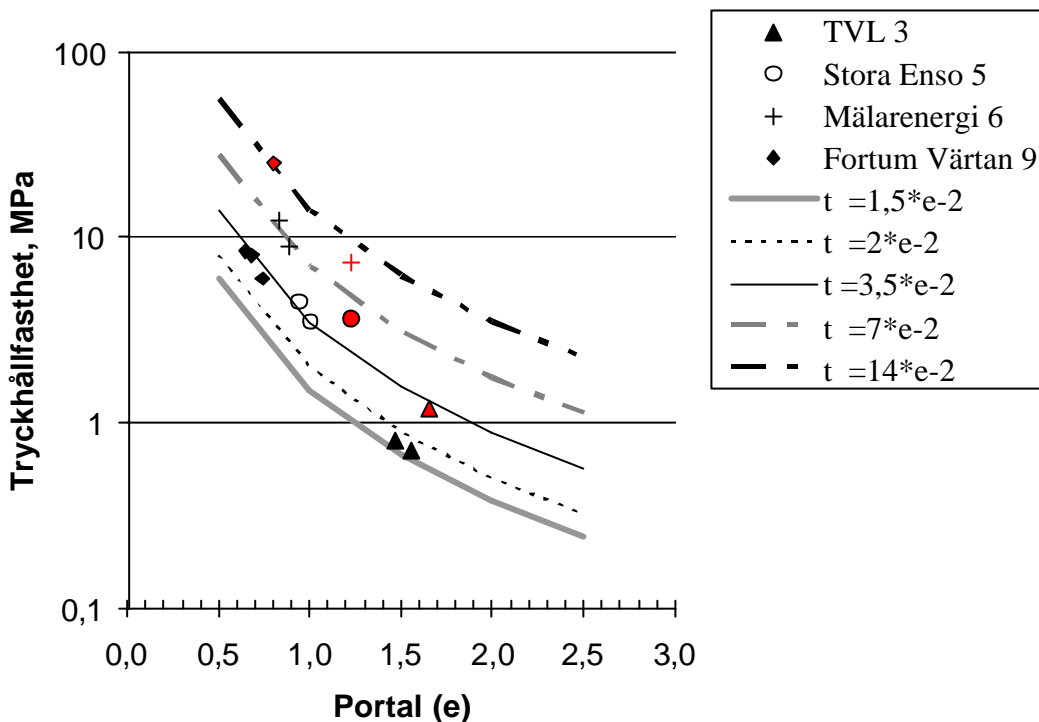
Flygaska 3, TVL – Hållfastheten som det stabiliserade materialet erhåller efter 28 dygn ligger på 1,3 – 1,5 MPa. Frysning och tining förstör provernas hållfasthet, tabell 5.5. Den med 5 % cementtillsats stabiliserade flygaskans permeabilitet är $7 \cdot 10^{-8}$ m/s. Provstyckets hållfasthet minskar med ca 60 % efter utförd permeabilitetsförsök, hållfastheten ligger då på ca 0,43 MPa. Flygaskan bör skyddas från tjälpåverkan för att kunna bibehålla hållfastheten.

Flygaska 5, StoraEnso Fors AB – Hållfastheten som det stabiliserade materialet erhåller efter 28 dygn ligger på ca 4 MPa. Frysning och tining påverkar provernas hållfasthet i lite utsträckning, tabell 5.5. Provernas hållfasthet minskar något till ca 3,4 – 3,7 MPa. Den med 5 % cementtillsats stabiliserade flygaskans permeabilitet är $2,8 \cdot 10^{-7}$ m/s. Provstyckets hållfasthet minskar med ca 25 % efter utförd permeabilitetsförsök, hållfastheten ligger då på ca 3,1 MPa.

Flygaska 6, Mälarenergi – Hållfastheten som det stabiliserade materialet erhåller efter 28 dygn ligger på ca 8,6 – 9 MPa. Frysning och tining påverkar provernas hållfasthet, tabell 5.5. Provernas hållfasthet minskar till ca 4,4 MPa (PCe 2,5 %) och 7,6 MPa (PCE 5%). Större cementtillsats motverkar minskningen av materialets hållfasthet efter försöken med frysning och tingscykler. Den med 5 % cementtillsats stabiliserade flygaskans permeabilitet är $2,2 \cdot 10^{-8}$ m/s. Provstyckets hållfasthet minskar med ca 30 % efter utförd permeabilitetstest, hållfastheten ligger då på ca 6,2 MPa.

Flygaska 9, Fortum, Värtan – Hållfastheten som det stabiliserade materialet (med 5 % tillsatts av cement) erhåller efter 28 dygn ligger på ca 25,3 MPa. Vid bindemedelstillsats på 2,5 % var provets hållfasthet ca 37,1 MPa. Efter frysning och tining minskade provets hållfasthet till 35,1 MPa för provet med 2,5 % cementtillsats och till 26,9 MPa för provet med 5 % cementtillsats. Den med 5 % cementtillsats stabiliserade flygaskans permeabilitet sjönk

under försökets gång till värden $<10^{-9}$ m/s, tabell 5.5. Provstyckets hållfasthet minskade något efter utförd permeabilitetstest, hållfastheten låg på ca 28 MPa efter avslutat permeabilitetsförsök. Resultaten tyder på att cementtillsats kan höja flygaskans hållfasthet. Resultaten antyder dock att en cementtillsats på 5 % ger sämre hållfasthetsvärden än 2,5 %. Detta kan vara orsakad av att vattenkvoten i materialet inte är tillräcklig hög för att få igång en ”fullständig” härdning.



Figur 5.3 Redovisning av portal och hållfasthet hos självhärdade (14 d) och stabiliserade (28 d) prover. Prov med cementtillsats (5 %) har röd markering. OBS bokstaven t står för t .

Figure 5.3 Void ratio and shear strength of samples without (14 d) and with (red marks) Portland cement (28 d) as additive. t stands for t .

I figur 5.3 redovisas resultaten från hållfasthetsundersökningarna. Vid redovisningen och tolkningen gjordes följande förenklingar/antaganden:

- Kompaktdensiteten hos flygaskorna påverkas ej av cementtillsats.
- Packningsgraden antas ligga på 90 % för de stabiliserade proverna.
- Partikelstorleken hos materialet påverkas ej av tillsats av cement, dvs konstanten e^{-c} antas vara e^{-2} för samtliga prover.

Tillsats av cement medför i samtliga fall att torrdensiteten minskar jämfört med prov utan tillsats av cement. Detta medför att provernas portal minskar med tillsats av cement. Bindningsytan mellan partiklarna minskar med ökande portal. Detta kompenseras i viss mån av att bindningskraften från cementen är starkare än flygaskans ursprungliga bindningskraft. Detta kan ses i samtliga fall, figur 5.3. I fallet TVL och FV ger hållfasthetsökningen från cement en ökning av det härdade materialets hållfasthet. För FV medför cementtillsatsen en höjning av

hållfastheten från ca 8 MPa till ca 25 MPa. I fallet med SEF och ME flygaskorna visade det sig att tillsatsen av cement medför en markant höjning av portalet och den höjning av bindningsstyrka som cementen bidrar med är inte tillräcklig för att kompensera hållfasthetsminskningen. I dessa fall medför cementtillsatsen en försämring av flygaskornas tekniska egenskaper.

6 GRUPPERING

I detta avsnitt grupperas flygaskorna efter studerade egenskaper och en bedömning av potentiella användningsområden redovisas.

Resultaten visar att flygaskorna uppvisar varierande höga hållfasthetsvärden efter härdning under 14 dagar. Av de analyserade värdena framgår att flygaskans ursprungliga vattenkvot (w), CaO (akt)-innehåll och härdningstemperatur är viktiga faktorer som styr de härdade provkropparnas hållfasthet efter en viss tids härdning. Andra parametrar som påverkar hållfasthetsutvecklingen är materialets kornstorleksfördelning, optimal vattenkvot, vattenkvot vid packning, maximal torrdensitet, packningsgrad, erhållet portal etc.

Erhållna resultat indikerar att det finns ett samband mellan portal och tryckhållfasthet, specifik yta och mängd bindemedel. Samtidigt finns det en viss tveksamhet vad gäller materialens kompaktdensitet. Den teoretiskt möjliga lägsta kompaktdensiteten varierar kraftigt mellan olika flygaskor. Kompaktdensitet mellan 1,8 - 2,85 ton/m³ har uppmätts med standardiserade metoder.

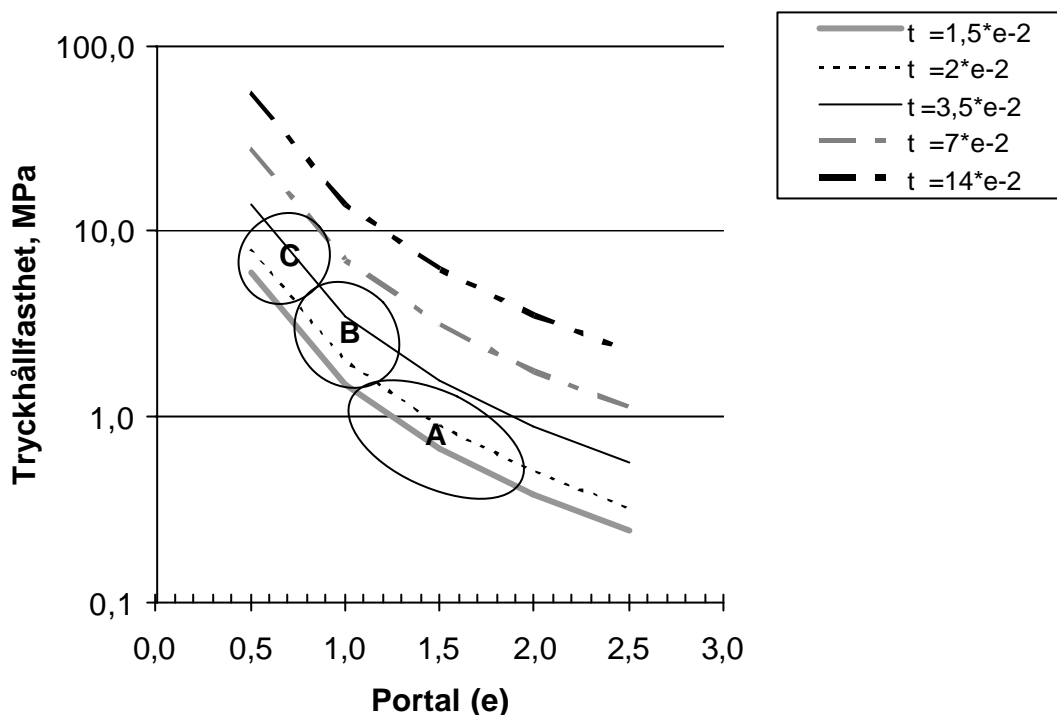
6.1 Gruppering efter tekniska egenskaper

Undersökta flygaskor har grupperats utifrån hållfasthetsvärden efter 14 dagar och portal. I rapporten har flygaskorna delats in i tre grupper, A-C, figur 6.1.

Grupp A. Hit hör flygaskor med låg hållfasthet och högt portal. Det som är typiskt för dessa flygaskor är att de är våtlagrade dvs har hög vattenkvot, TVL (3) och ÅV (4), och/eller låg maximal torrdensitet samt lågt CaO (akt)-innehåll, SE (8).

Grupp B. Hit hör flygaskor med medelhög hållfasthet och portal. Det som är typiskt för dessa flygaskor är att de är torra från början och har CaO (akt)-innehåll på > ca 4 % av TS. Flygaskorna BV (1), HV (2) och SEF (5) hör till dessa.

Grupp C. Hit hör flygaskor med hög hållfasthet och lågt portal. Det som är typiskt för dessa flygaskor är att de är torra från början och har lågt portal. Flygaskorna ME (6), VVU(7) och FV (9) hör till dessa.



Figur 6.1 Gruppering av flygaskorna efter användningspotential. Härddningstid 14 dygn.

Figur 6.1 Fly ash grouped according to application potential. Curingtime 14 days.

Undersökningen visar att flygaskor med högt innehåll av CaO (akt) inte vinner entydigt på cementtillsats. I och med att materialet får lägre maximal torrdensitet vid tillsats av upp till 5 % portlandcement, så motverkas cementens bindningsstyrka av lägre portal. I fall med lågt innehåll av CaO (akt) kan cementtillsats ge flera positiva effekter:

- Högre hållfasthet.
- Bättre beständighet mot tjäle.
- Bättre beständighet mot perkolerande vatten.

Tillsats av cement förbättrar samtliga undersökta flygaskors beständighet mot tjäle, oberoende CaO (akt)-halt. I miljöer där tjäle kan vara ett problem bör cementtillsatsens effekt undersökas.

Flygaskor med låg w_{opt} riskerar att få låga hållfasthetsvärden. Denna effekt ökar med stigande innehåll av CaO (akt) och portlandcement. Extra tillsats av vatten efter avslutad packning hjälper till att få bättre hållfasthetsutveckling. Detta bedöms vara fallet för flygaskorna från HV(2), SEF, (5), ME (6), VVU (7). Vid tillsats av 5 % Portlandcement gäller detta även för flygaskan från FV (9).

6.2 Bedömning av användningsområden

Flygaskor som tillhör *Grupp A* (deponifygaskor) bör ej nyttjas utan bindemedel i applikationer där hållfasthet och beständighet är viktiga parametrar. Stabilisering kan utföras med andra lämpliga flygaskor eller exempelvis av bindemedel som portlandcement, Merit 5000 etc. Dessa flygaskors hållfasthet är låg och beständighet mot tjäle och perkolerande vatten är minimal. Liknande flygaska har nyttjats i förstärkningslager i en vägkonstruktion efter det att den har stabiliserats med tillsats av färsk flygaska (torr och reaktiv) och bindemedel (Portlandcement, Merit 5000 och/eller osläckt kalk) [1].

Flygaskor som tillhör *Grupp B* kan nyttjas utan bindemedel i applikationer där hållfasthet och beständighet är viktiga parametrar. I vissa fall, där tjäle befaras bli ett problem, kan tillsats av cement förbättra hållfasthetsegenskaperna och beständigheten. Vid höga CaO (akt)-innehåll medför cementtillsats ingen entydig förbättring av de tekniska egenskaperna. Vid låga w_{opt} bör extra vatten tillsättas efter avslutad packning för att underlätta härdning av materialet. Fältförsök har utförts med flygaska från SEF (5), ca en mil norr om Norberg, där en grusväg har renoverats. Detta projekt finansieras bla av Askprogrammet (Q4-229). Uppföljning av projektet sker under 2004. Erfarenheter från fältundersökningarna tyder på att flygaskorna utan bindemedel uppvisar bra hållfasthet och beständighet. För flertalet av de undersökta askorna finns det därmed stor potential att nyttjas utan bindemedel (tex cement).

Flygaskor som tillhör *Grupp C* kan nyttjas med eller utan bindemedel i applikationer där hållfasthet och beständighet är viktiga parametrar. I vissa fall kan tillsats av cement förbättra hållfasthetsegenskaperna och beständigheten. Vid låg halt av CaO (akt) kan cementtillsats förbättra materialets tekniska egenskaper. Vid låga w_{opt} och högt innehåll av CaO (akt) eller portlandcement bör vatten tillsättas efter avslutad packning.

7 FORTSATTA ARBETEN

Detta projekt är indelat i två steg, där det första steget behandlar flygaskornas grundläggande tekniska egenskaper inklusive härdningsegenskaper utan tillsats av bindemedel och i steg 2 undersöktes flygaskorna med tillsats av bindemedel.

Lagring/hantering

Resultaten i denna rapport visar att flygaskor har stor potential att kunna nyttjas med och utan bindemedel i anläggningstekniska applikationer. Mängden flygaska som produceras per dag är begränsad. Om flygaska nyttjas som stabiliserat skikt exempelvis i en vägkonstruktion blir askmängden en begränsande faktor. För att kunna nyttja flygaska i större skala finns det några alternativa val:

- a.) mellanlagring av flygaska i torrt tillstånd
- b.) mellanlagring av flygaska med låg vattenkvot
- c.) applikationer där flygaska är ett bindemedel, dvs lägre tillsatsmängd
- d.) flera askproducenter samarbetar
- e.) mfl.

Vid mellanlagring av befuktad flygaska går en del av härdningskapaciteten förlorad med tiden. Hur mycket av härdningskapaciteten som går förlorad och hur man kan kompensera detta, exempelvis med tillsats av cement, färsk torr flygaska etc., är ett intressant FoU-område för att kunna nyttja flygaskor i stor skala.

Härdningskapacitet/bindemedel

Applikationer där flygaska nyttjas med eller utan bindemedel i lägre tillsatsmängder är också av intresse. Det pågår ett flertal FoU-arbeten med flygaskor som tillsatsmaterial till avloppsslam, fiberlera, grusmaterial etc. i applikationer från tätskikt på deponi till stabilisering av grusvägar. Parallella projektresultat från Riksväg 90, ett EU- och SBUF-projekt [1] visar att en blandning mellan färsk flygaska och deponiaska (ca 50/50 % av TS halt) samt 5% bindemedelstillsats (bl.a. cement) ger en hållfasthet i laboratorium på ca 2-2,5 MPa. I fält har en vägsträcka förstärkts med askblandningen med lovande resultat, geotekniskt, ekonomiskt och miljömässigt [2].

Flera av de undersökta flygaskorna, bla Stora Enso Fors, Vattenfall Värme Uppsala, Mälarenergi m.fl. har i praktiken visat sig kunna ha höga hållfasthetsvärden utan tillsats av bindemedel. Dessa flygaskor kan vara intressanta förstärkningsmaterial i både grus- och asfalterade vägar. För att visa miljöegenskaper och teknisk prestanda krävs det ett antal pilotstudier som följs upp under en längre tid, > 3 - 5 år.

Grundforskning

Ett annat FoU-område av intresse är där geoteknik, materialkarakterisering och miljöegenskaper kopplas ihop. Genom en detaljerad beskrivning av flygaskors innehåll av kristallint vatten, S, Na, Ca, Cl etc, korndensitet, kornstorleksfördelning, packningsegenskaper, porositet/poral, specifik yta etc. kan förståelsen öka för hur flygaskors

härkning utvecklas. Detta är ett forskningsområde som kan underlätta framtida produktifiering av flygaskorna.

Miljöriktig användning

En viktig aspekt vid användning av flygaskor är att visa för aktörer och tillståndsmyndigheter att materialet är ett bra miljöval. Vid användning av bl.a. flygaskor i exempelvis en vägkonstruktion ska det göras en anmälan till kommunen. I anmälan bör applikationen, materialanvändningen, omgivningen mm. beskrivas och en övergripande bedömning på miljövinster och eventuell miljöpåverkan göras. Här saknas det idag en enhetlig bedömningsgrund [6] som kan underlätta beslut. Finska och svenska erfarenheter [1] och [2] visar attspridning av metaller från olika provtyper är minimal. Utlakning av metaller i fält undersöks i ett pågående värmeforskningsprojekt, Q4-229, på två provsträckor med flygaskor från Stora Enso Fors AB och Vattenfall Värme Uppsala.

Askregister/gruppering

Detta arbete kan ses som embryo till ett register där tekniska och miljötekniska egenskaper finns dokumenterade. För att underlätta en ökad användning av flygaskor i anläggningstekniska applikationer bör ett "askregister" upprättas, där materialtekniska och miljötekniska egenskaper, erfarenhet från fältförsök och fullskalig användning redogörs. Föreslagen gruppering (A-C) gjordes baserad på data från ett begränsat antal flygaskor. Det finns ett behov av att ännu ej undersökta flygaskor undersöks och bedöms för att vidareutveckla den i aktuell rapport föreslagna bedömningsgrunden.

8 REFERENSER

- [1] Lahtinen P., "*Fly Ash Mixtures as Flexible Structural Materials for low-Volume roads*", Finnish Road Administration, Finnra Reports 70/2001, 2001.
- [2] Mácsik et al., "*Askblandningar i anläggningsprocesser - Användning av askblandningar vid provväg och täckning av tipp*", EU strukturfond mål 1 projekt, <http://www.z.lst.se/eu/index.htm>, projektbank, 2003.
- [3] Pousette K., Mácsik J. 2003. *Flygaska som vägbyggnadsmaterial*, *Bygg och teknik*, 2003, nr:1, pp 31 – 34.
- [4] Larsson R., "*Hållfasthet i friktionsjordar*", SGI, 1989.
- [5] Ribbing C., "*Kulrullning*", Institutionen för Mineralberedning, 1975.
- [6] Svedberg B., 2003, "*Miljögeotekniskt bedömningsystem: applikation på väg- och järnvägsbyggnadsmaterial*", Licentiatuppsats, ISSN 1402-1757 / ISRN LTU-LIC--03/46--SE / NR 2003:46.

A Sammanställning över producenter av flygaska

Handläggare	PM		1(3)
Henrik Bjurström	Datum	Utgåva	Ordernr
Tel 08-657 1028	2002-06-20	1	472871
Fax 08-653 3193			
henrik.bjurstrom@af.se			

Uppdraget från Scandiaconsult Sverige AB, Josef Mácsik, är att ge en lista på ca 30 anläggningar som producerar flygaska. Önskad information är anläggning, typ av panna, bränslen och mängder flygaska. Med hänsyn till miljöfrågorna bör inga anläggningar som eldar avfall tas med i denna lista. Om kalk tillförs förbränningsprocessen, t ex som slam, önskas att vi noterar detta.

Förutsättningen för uppdraget är en inventering av askor efter biobaserade bränslen som utförs av ÅF-Energiconsult AB för Energimyndigheten och Ångpanneföreningens Forskningsstiftelse.

De uppgifter som samlats in under inventeringen åt Energimyndigheten har ÅF-Energiconsult fått i förtroende från anläggningarna för denna inventering. Uppgifterna redovisas avidentifierat, i aggregerat skick till Energimyndigheten. Vi förutsätter att uppgifterna som härmed lämnas till Scandiaconsult Sverige för att underlätta arbetet i ett projekt finansierat av Värmeforsk också hanteras i förtroende. Vi önskar att Ni inte sprider denna sammanställning.

Tabellen nedan utgör redovisning för uppdraget. Vi har plockat ut de anläggningar som producerar mer än 1000 ton flygaska per år. Mängduppgifterna har avrundats till närmaste hundratal. Vi ber Er observera följande:

- o Även om inventeringen skulle genomföras på ett urval av anläggningar är den inte ännu riktigt fullständig – några producenter har inte svarat ännu, t ex Sydkraft Värme i Malmö. Det innebär att det kan finnas några andra stora producenter än de i listan nedan men de är troligen få.
- o Kvaliteten på de svar som vi har fått i inventeringen varierar kraftigt. Få relevanta anläggningar har lämnat några analyser.
- o Några anläggningar blandar flygaska och bottenaska vid utmatningen. Det framgår inte alltid av de uppgifter vi fått.
- o De kvantiteter som anges i tabellen är de som matas ut från anläggningen. Eftersom många anläggningar använder våt utmatning för askorna kan uppgiften vara för våt aska. De brukar inte ange torrhalten varför det är svårt att räkna om till torra kvantiteter på ett konsekvent sätt.
- o Anläggningar med huvudsakligen RT-flis har vi uteslutit eller noterat. Anläggningar där RT-flis ingår i blandningar har vi tagit med – graden av inblandning bör utredas genom kontakt med anläggningen.
- o Många deponerar men anläggningarna kan ha arbetat upp användningar av askan.

Tabell 1. Produktion av flygaska vid energianläggningar i Sverige. Rader i kursiv stil: troligen "förorenade" askor.

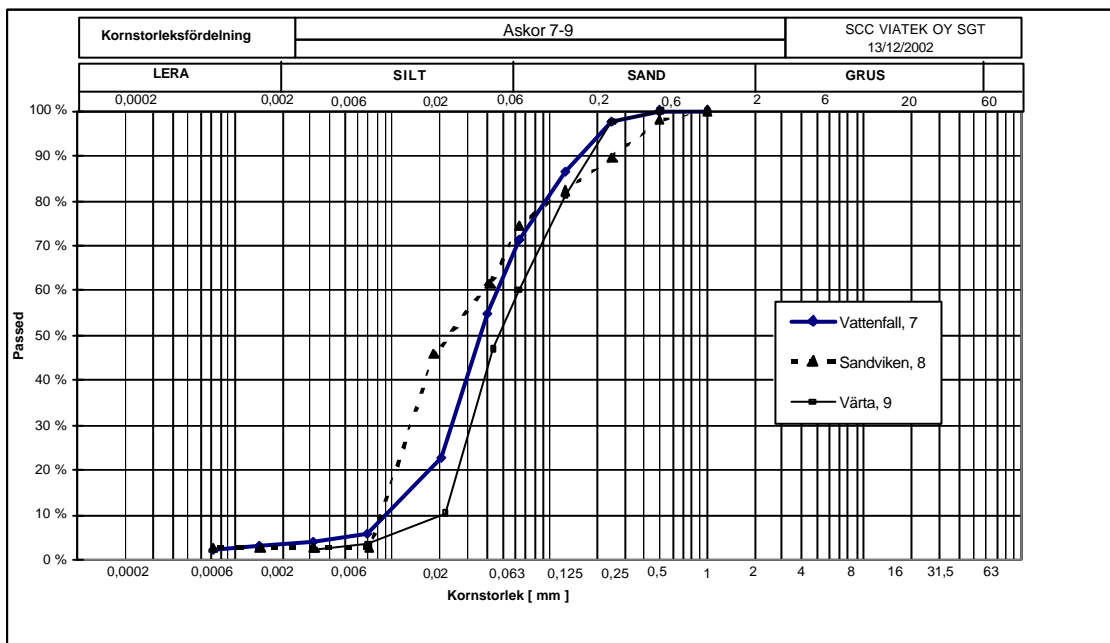
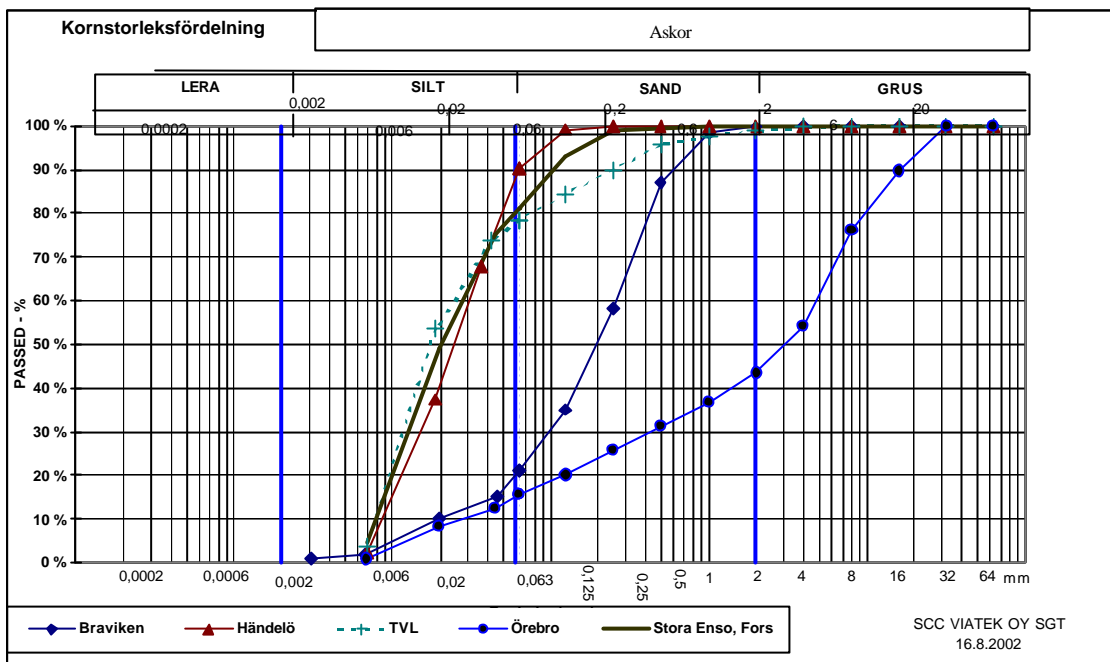
Anläggning	Panntyp	Bränslen	Flygaska (t/a)
<u>Energiföretag</u>			
Birka, Brista	CFB	Flis	3600
Birka, Högdalen P6	CFB	RT-flis, skogsflis, olja	6600
Borås Energi, ÅP2	roster	Skogsflis (pellets)	2200
Eskilstuna E&M	CFB, BFB	Skogsflis, bark, salix	3800
Jämtkraft	roster	Skogsflis, bark, torv, RT-flis (0-10 %)	3000
Mälarenergi	CFB	Skogsflis, sågverksrester, bark, salix, torv, kol, olja	5600
Skellefteå Kraft	CFB + BFB	Skogsflis, torv, olja	2000
Söderenergi, Igelsta P3	BFB	RT-flis, torv	7000
Trollhättan Energi	Roster	Skogsflis i en panna, RT i de andra	1500
Vattenfall Uppsala	pulver	Torv, trä	5000
Vattenfall Idbäcken	CFB	Skogsflis, RT, kol, sågverksrester	3000
Växjö Energi	CFB + roster	Skogsflis, bark, sågverksrester, torv	1600
Öresundskraft	Pulver	Pellets, kol, olja	7000
Sydkraft Händelö	P13, CFB	skogsflis	4600
	P12, roster	Kol, tallbecksolja	3700
Hässelby	pulver	Olja, pellets	1300
Gällivare	FB	Skogsflis, torv	1000
Karlstad	CFB	GROT och stamved	1200
Jönköping kvv	pulver	Sågverksrester	1000
<u>Skogsindustrin</u>			
Billerud Gruvön	roster	Bark, flis, olja, sågverksrester	5300
M-real Husum	BFB	Bark, fiberslam, olja	5500
Iggesund	roster	Inga uppgifter, troligen bark och slam	4600 ¹
Karskär Energi	Roster	Bark, fiberslam, sågverksrester	2000

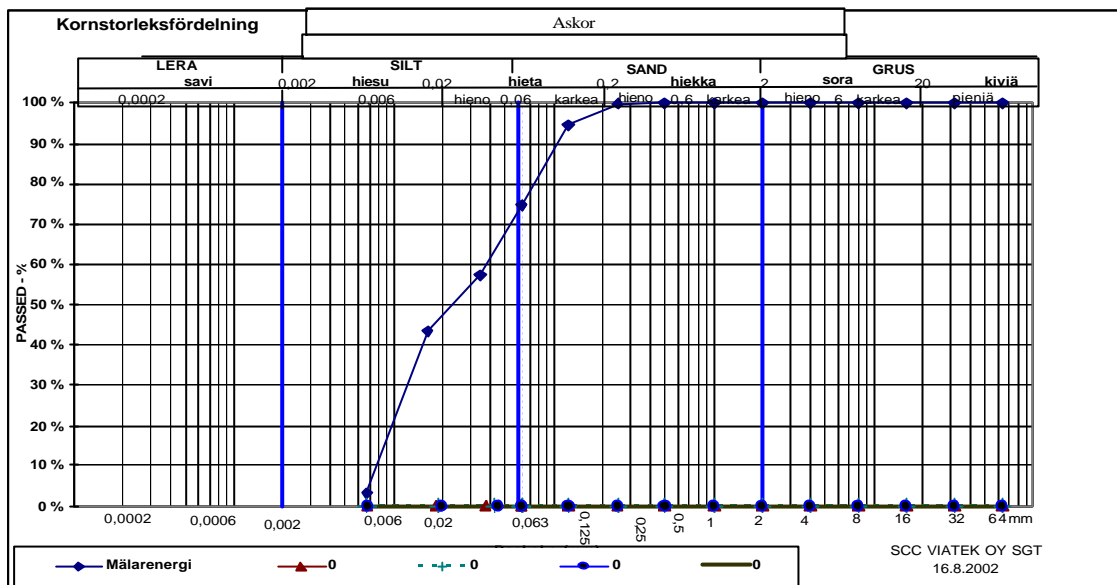
Anläggning	Panntyp	Bränslen	Flygaska (t/a)
Kappa Kraftliner, Lövholmen	roster	Bark, olja, sågverksrester	2000
Stora Enso Norrundet	BFB	Bark, sågverksrester	2000
SCA Obbola	Ingen uppgift	Bark, fiberslam, bioslam	3800
Södra Värö	Roster ¹	Bark	1200
Stora Enso Nymölla	BFB	Bark, flis, bioslam, olja	10180
Holmen Wargön	roster	Bark, flis, RT, fiberslam, olja	1100
Stora Enso Fors	CFB	Flis	5500
Holmen Braviken	roster	Bark, RT, bioslam, sågverksrester	8700
Holmen Hallsta	axonugn BFB	Bark, RT-flis Bioslam, olja ²	2000 10000
Stora Enso Kvarnsveden	Oljepanna med barkugn	Bark, flis, bioslam, olja	8900
SCA Ortviken	BFB	Bark, flis, bioslam, fiberslam	6500
	roster	Bark, flis, något RT, sågverksrester	4700

Fotnot:

- 1) Roster enligt statistiken, men de har kört igång en ny panna av okänd typ
- 2) Holmen Hallstas uppgifter är inte riktigt tydliga – möjligen går även flis till BFB-pannan

B Granulometrisk sammansättning





C Kolonnförsök

Flygaska – Stora Enso Fors. Bindemedel - Portland cement, 5% (FCK-29).

Kumulativt L/S	L/S	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
pH		13,2	13,2	13,1	13	12,8	12,6	12,2
Ledningsförmåga	mS/m 25 °C	5970	5250	4400	3016	2221	1108	410
Redox. Eh	mV			147	160	168	208	218
Ca	mg/kg TS	3,06	6,19	17,1	42,7	107	399	1539
Fe	mg/kg TS							
K	mg/kg TS	677	1286	2732	4367	6617	9572	10267
Mg	mg/kg TS							
Na	mg/kg TS	281	535	1084	1729	2663	3854	4123
S	mg/kg TS	67,3	126	245	349	457,5	533	553
Al	mg/kg TS	0,766	1,51	3,22	5,51	9,16	10,5	17,3
As	mg/kg TS							
Ba	mg/kg TS	0,0195	0,0346	0,0925	0,192	0,448	1,84	5,78
Cd	mg/kg TS	0,00008	0,00015	0,000316	0,0005	0,00074	0,00074	0,00074
Co	mg/kg TS	0,00033	0,000603	0,00134	0,00206	0,0032	0,00417	0,00417
Cr	mg/kg TS	0,0835	0,159	0,323	0,506	0,719	0,89	0,947
Cu	mg/kg TS	0,00056	0,00108	0,00374	0,00549	0,00704	0,00704	0,00704
Hg	mg/kg TS							
Mn	mg/kg TS	0,000049	0,000182	0,000362	0,000582	0,000582	0,000582	0,000582
Ni	mg/kg TS	0,000064	0,000064	0,000064	0,000064	0,000064	0,000064	0,000064
Pb	mg/kg TS	0,0044	0,00867	0,0253	0,0368	0,0518	0,0696	0,0797
Zn	mg/kg TS	0,0051	0,00933	0,0188	0,0276	0,039	0,051	0,056

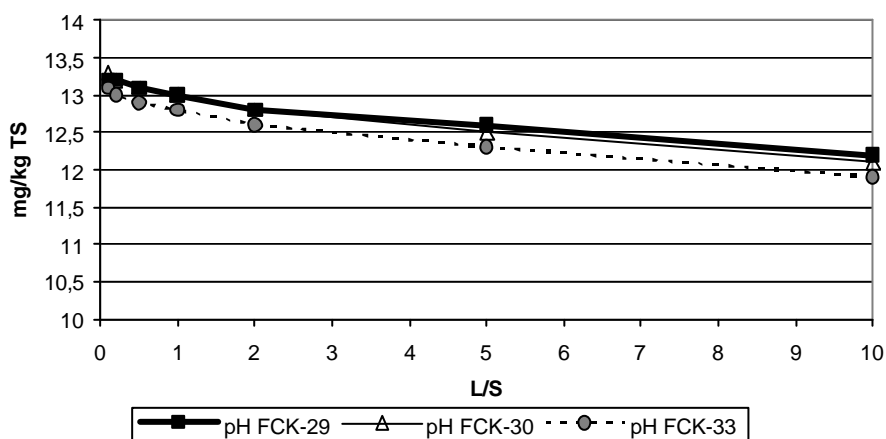
Flygaska – Stora Enso Fors. Bindemedel - Portland cement, 2,5% av TS och Merit 5000, 2,5% av TS (FCK-30).

Kumulativt L/S	L/S	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
pH		13,3	13,2	13,1	13	12,8	12,5	12,1
Ledningsförmåga	mS/m 25 °C	7290	6070	4580	3254	2198	1003	327,5
Redox. Eh	mV	-	-	151	161	172	207	223
Ca	mg/kg TS	2,44	4,4	9,74	17	40	97	792
Fe	mg/kg TS	0,00067	0,00169	0,00298	<0,005	<0,011	<0,023	<0,043
K	mg/kg TS	878	1608	3183	4963	7263	10191	11051
Mg	mg/kg TS	<0,09	<0,099	<0,13	<0,18	<0,27	<0,54	<0,99
Na	mg/kg TS	367	670	1324	2039	2996	4193	4530
S	mg/kg TS	117	197	352	496	650	759	787
Al	mg/kg TS	1,01	2,39	5,87	10,6	19,6	70,3	94
As	mg/kg TS							
Ba	mg/kg TS	0,0181	0,0349	0,0802	0,149	0,303	1,11	4,36
Cd	mg/kg TS	0,00009	0,000174	0,000333	0,000527	0,000764	0,000764	0,000764
Co	mg/kg TS	0,000133	0,00023	0,000459	0,000728	0,00117	0,00117	0,00117
Cr	mg/kg TS	0,121	0,217	0,391	0,558	0,799	0,98	1,03
Cu	mg/kg TS	0,00074	0,00193	0,00306	0,00412	0,00531	0,00531	0,00531
Hg	mg/kg TS	0,000004	0,000007	0,000013	0,000013	0,000013	0,000013	0,000013
Mn	mg/kg TS	0,000182	0,000696	0,000996	0,00116	0,0017	0,00257	0,00772
Ni	mg/kg TS	0,00008	0,000134	0,000134	0,000134	0,000134	0,000134	0,000134
Pb	mg/kg TS	0,00711	0,0127	0,0348	0,049	0,0714	0,0921	0,105
Zn	mg/kg TS	0,00738	0,0141	0,0279	0,034	0,0464	0,0558	0,061

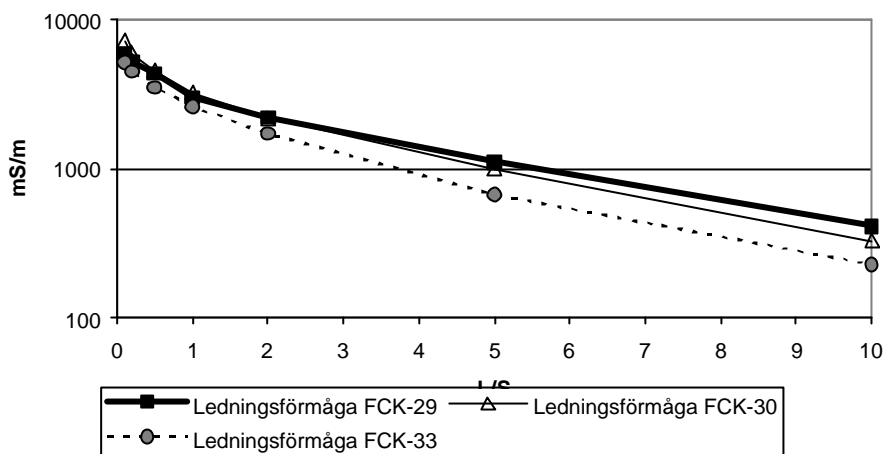
Flygaska - Mälarenergi AB. Bindemedel - Portland cement, 25% av TS och Merit 5000, 2,5% av TS (FCK-33)

Kumulativt L/S		0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
pH		13,1	13	12,9	12,8	12,6	12,3	11,9
Ledningsförmåga	mS/m 25 °C	5220	4510	3530	2623	1725	671	226,8
Redox. Eh	mV	-	-	167	177	188	228	233
Ca	mg/kg TS	1,96	3,71	9,56	18,8	46,5	85,5	665,5
Fe	mg/kg TS	0,00079	0,0047	0,0266	0,0617	0,108	0,177	0,204
K	mg/kg TS	858	1600	3310	5350	7790	10250	10870
Mg	mg/kg TS							
Na	mg/kg TS	188	359	761	1257	1879	2512	2671
S	mg/kg TS	105	195	462	758	1035	1254	1335
Al	mg/kg TS	0,0613	1,04	3,26	6,5	11,2	23,1	30,1
As	mg/kg TS							
Ba	mg/kg TS	0,0134	0,0209	0,0587	0,123	0,284	0,869	3,52
Cd	mg/kg TS	0,00023	0,000447	0,00099	0,0017	0,00259	0,00259	0,00259
Co	mg/kg TS	0,00007	0,000125	0,000244	0,00042	0,00067	0,00067	0,00067
Cr	mg/kg TS	0,00103	0,00282	0,00535	0,00836	0,0133	0,0182	0,0226
Cu	mg/kg TS	0,00066	0,00119	0,00289	0,0045	0,00668	0,00668	0,00668
Hg	mg/kg TS	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002	0,000002
Mn	mg/kg TS	0,00023	0,000546	0,00105	0,00167	0,00258	0,00368	0,0069
Ni	mg/kg TS	0,000128	0,00022	0,00065	0,00104	0,00176	0,00587	0,00587
Pb	mg/kg TS	0,00135	0,00563	0,0166	0,0283	0,0433	0,0534	0,065
Zn	mg/kg TS	0,00218	0,00549	0,0111	0,0181	0,0245	0,0287	0,0287

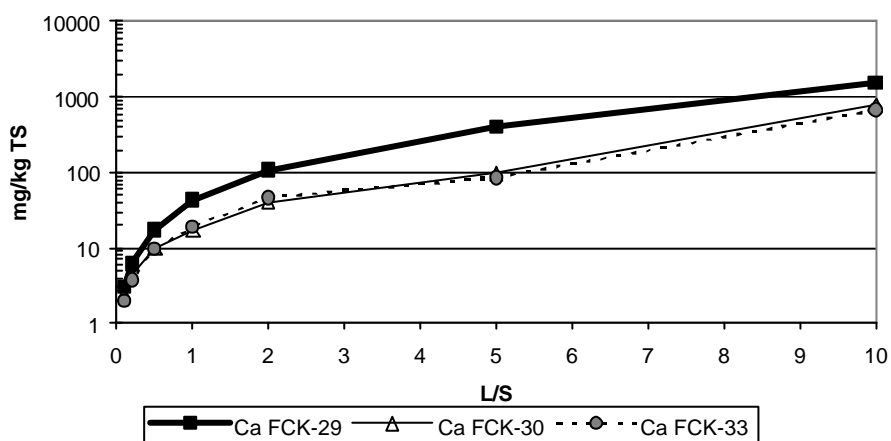
En sammanställning av urlakningen i diagramform följer nedan:



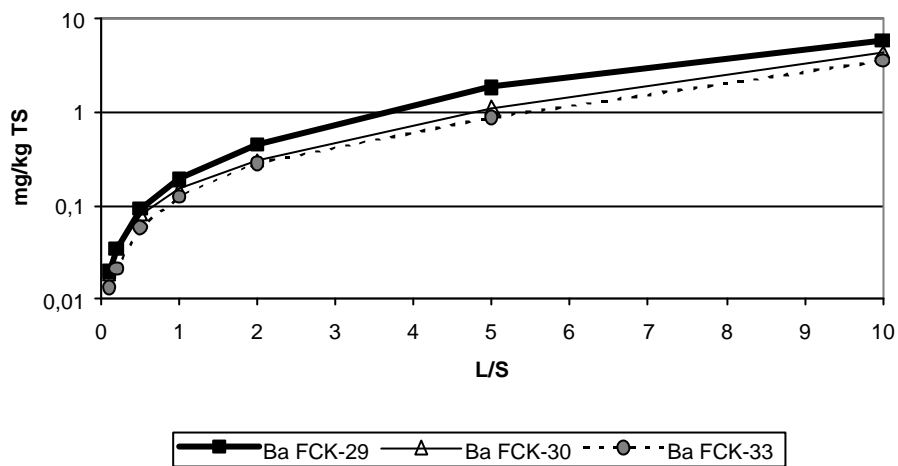
C1. Provernas pH vid olika L/S kvot.
C1. pH of the samples at different L/S.



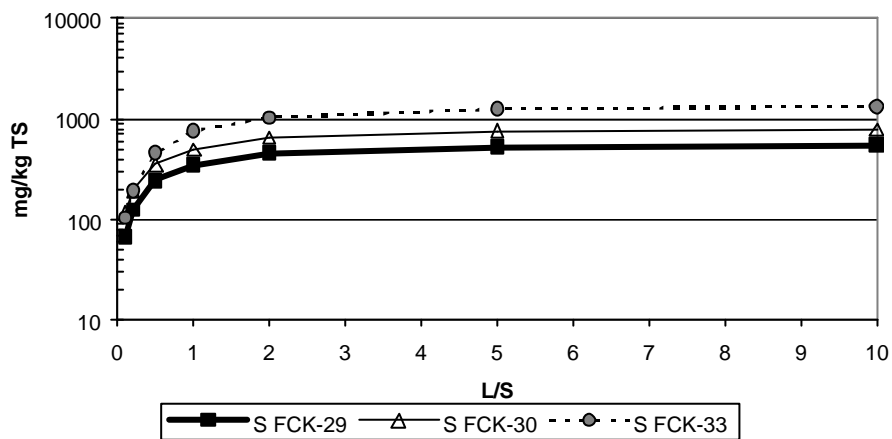
C2. Provernas ledningsförmåga vid olika L/S kvot
C2. Conductivity of the samples at different L/S.



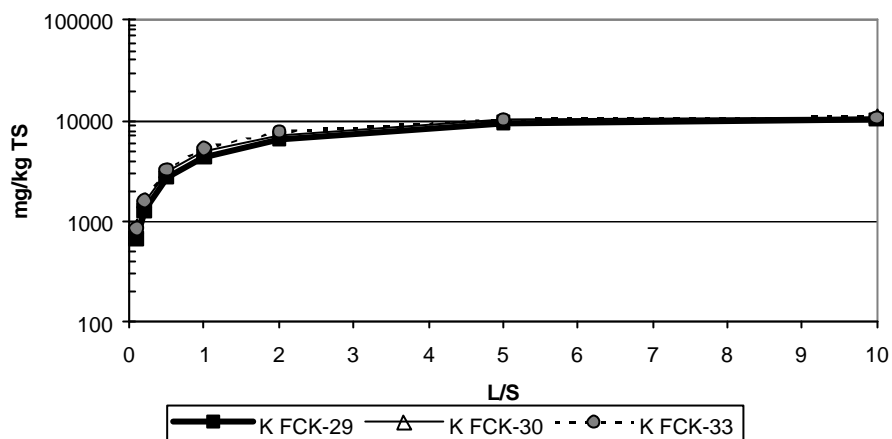
C3. Den kumulativa urlakningen av Ca vid olika L/S kvot
C3. Cumulative leachability of Ca of the samples at different L/S.



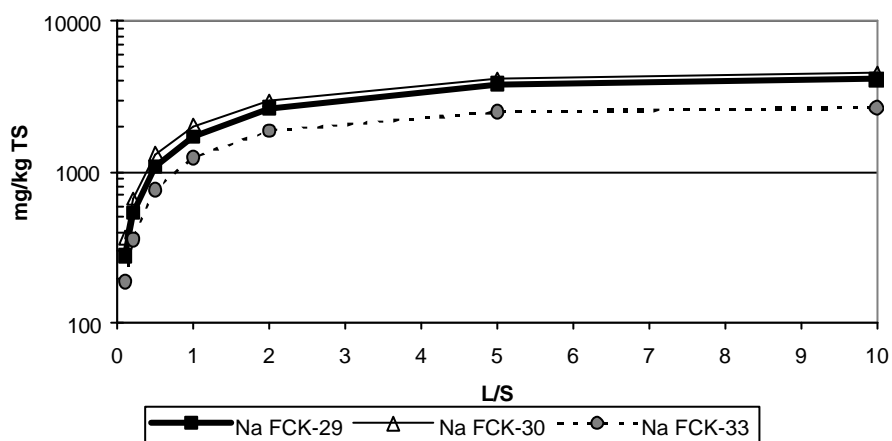
C4. Den kumulativa urlakningen av Ba vid olika L/S kvot
 C4. Cumulative leachability of Ba of the samples at different L/S.



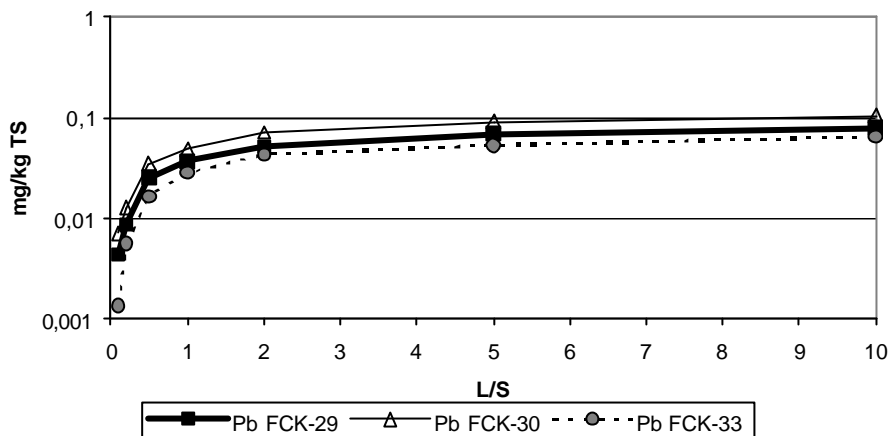
C5. Den kumulativa urlakningen av S vid olika L/S kvot
 C5. Cumulative leachability of S of the samples at different L/S.



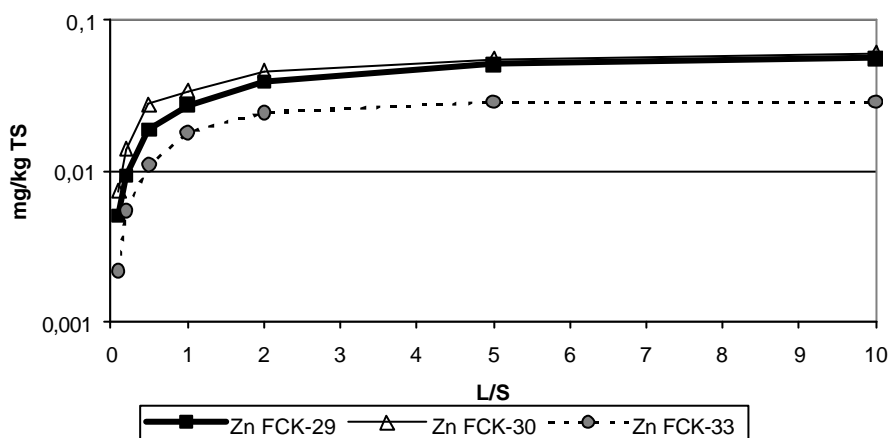
C6. Den kumulativa urlakningen av K vid olika L/S kvot
C6. Cumulative leachability of K of the samples at different L/S.



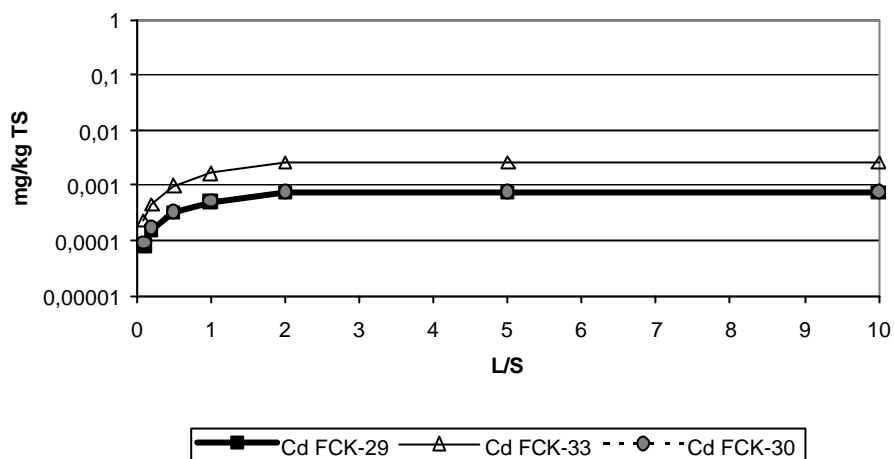
C7. Den kumulativa urlakningen av Na vid olika L/S kvot
C7. Cumulative leachability of Na of the samples at different L/S.



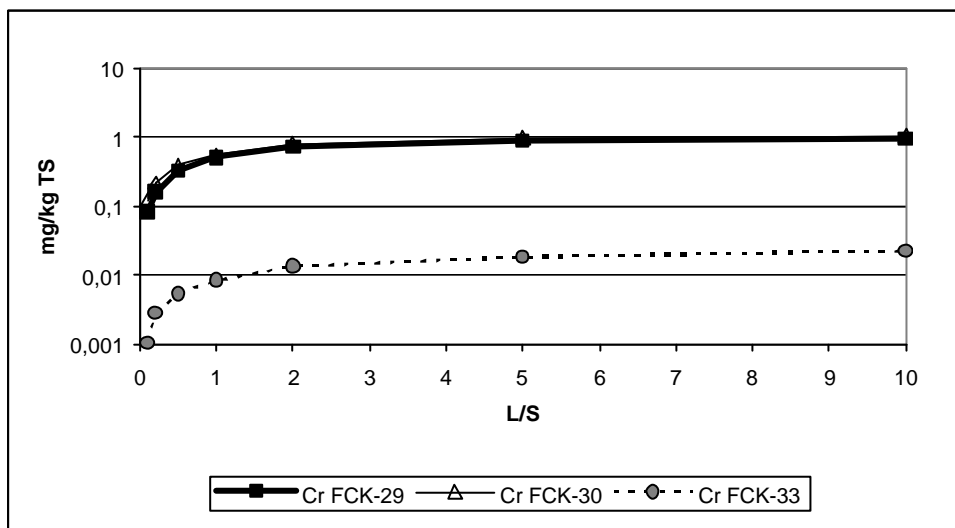
C8. Den kumulativa urlakningen av Pb vid olika L/S kvot
 C8. Cumulative leachability of av Pb of the samples at different L/S.



C9. Den kumulativa urlakningen av Zn vid olika L/S kvot
 C9. Cumulative leachability of Zn of the samples at different L/S.



C10. Den kumulativa urlakningen av Cd vid olika L/S kvot
C10. Cumulative leachability of Cd of the samples at different L/S.



C11. Den kumulativa urlakningen av Cr vid olika L/S kvot
C11. Cumulative leachability of Cr of the samples at different L/S.

D Värmeforskseminarium "Miljöriktig användning av askor", Uppsala 21-22 oktober 2003

FACE – Flygaska i geotekniska applikationer

J. Mácsik, SCC/Ramböll & B. Svedberg, LTU

Allmänt

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

- Återanvända material.
- Återvinna material i andra processer för att minska åtgången av andra råvaror och resurser.
- Minska naturresursbehovet.

Problemställning

Det finns stora problem beträffande bärigheten på sträckor på asfalterade och grusvägar. Många vägar stängs av under tjällossningen p g a den dåliga bärigheten längs vissa sträckor. Genom att nyttja flygaska som förstärkningslager vid dessa ”problemsträckor” kan tjälskadorna minimeras och vägarna hållas öppna under tjällossningen. Behovet av reparationer minskar.

Värdering ur miljö och teknisk synpunkt

Flygaskor är ett ur tekniskt synpunkt bra och beprövat vägbyggnadsmaterial. Forskningsresultat från bl.a. finska undersökningar visar att förstärkningslager bestående av flygaskor visar att flygaska är ur teknisk, miljömässig och ekonomisk synpunkt ett bra materialval, Lahtinen (2001).

Omgivning vs applikation

Det förefaller naturligt att en värdering av ett material i en konstruktion bör baseras på ett bredare perspektiv och inte begränsa sig till en jämförelse av material utan värdera konstruktionen som helhet. Emissionerna från konstruktionen är vidare beroende av dess placering i omgivningen. Effekten på omgivningen i sin tur beror av lokaliseringen.

Lösning

Genom att nyttja flygaska innovativt t ex som bär, förstärknings- och isolerande lager i vägbyggnadskonstruktioner kan dessa optimeras så att materialet ger ett mervärde som är större än bara volymen och dessutom ger minskat framtida underhållsbehov. Vägar, parkeringsplatser etc. kan byggas med mindre åtgång av naturresurser med tillhörande miljövinster och ekonomisk nytta.

Projekt

I de nu aktuella FoU-projekten ska tekniska och miljömässiga egenskaper hos olika bioflygaskor som förstärkningslager, tätskikt etc., ur teknisk såväl som miljömässig synpunkt. Projektet "FACE"s övergripande syfte är att ta fram nyttoprodukter för geotekniska applikationer baserade på flygaska. Långsiktigt mål är produkter med tillämpningsinriktade varudeklarationer speciellt anpassade för byggprocessen. Arbetet utförs i ett etappvisst förfarande där miljömässiga och tekniska förutsättningar hos potentiella produkter undersöks.

Parallellt utförs följande projekt, där flygaskor från biobränsla ingår:

- Q4-107 – Karaktärisering av flygaskors grundläggande egenskaper. Askornas användningspotential bedöms utifrån några normgivande tekniska egenskaper och erfarenheter från tillämpningar i Finland. Flygaskor från olika biobränslaepannor har ingått i undersökningen. (SCC)
- Q4-229 – Förstärkning av grusvägar med flygaska från Vattenfall Värme Uppsala och Stora Enso Fors. Två försöksvägar undersöks, en i Uppsala och en norr om Norberg. Flygaskorna användes utan bindemedel. Undersökningen söker svar på om flygaskorna går att nyttja utan bindemedelstillsats. (SCC)
- Q4-228 – Projektets syfte är att utveckla produkter baserade på blandningar av fiberslam från pappersindustrin och bio-flygaska från energiproducenter för geotekniska anläggningar och produktifiering. Projektet bygger på tidigare finska erfarenheter på motsvarande material i geotekniska anläggningar. Målsättningen är att hitta blandningar med god teknisk funktion t.ex. tjälbeständighet, goda bärighetsvärden och deformationsegenskaper i geotekniska anläggningar. (SCC-VIATEK)
- Q4-111 - Projektets syfte är att utveckla ett tätskiktmaterial baserat på avloppsslam och bioflygaska samt att ta fram utförandebeskrivning för pilotförsök på deponi med det nya tätskiktsmaterialet. De genomförda undersökningarna visar att flygaskastabiliserat avloppsslam (FSA) har stor potential att kunna uppfylla krav som ställs på ett tätskikt, ur beständighetsmässig, teknisk-, och inte minst, ekonomisk synpunkt. Stockholm Vatten AB och SCC/Ramböll.

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