

Flygaskor som bindemedel för stabilisering av grusmaterial

Pentti Lahtinen, Harri Jyrävä, Aino Maijala och Josef Mácsik

**Flygaskor som bindemedel för stabilisering av
grusmaterial
Laboratorieundersökningar samt förberedelser inför
provbyggandet**

**Fly ashes as binders for the stabilisation of gravel
Laboratory tests and preparations for a field test**

Pentti Lahtinen, Harri Jyrävä, Aino Maijala och Josef Mácsik

Q4-275

Abstract

Flygaskor från bibränsle har tidigare karakteriserats som möjliga alternativa bindemedel för stabilisering av t.ex. grusvägar. Grusmaterial från en skogsväg, Ehnsjövägen i Hallstaviken, har stabiliserats med flygaska och flygaska med tillsats av aktivator (exempelvis cement) i laboratorium. Flygaska från Holmen Papers Hallsta Pappersbruk användes vid försöken. Laborarietesterna visar att flygaska är ett fungerande stabiliseringsmedel med och utan tillsats av aktivator. Tillsats av aktivator förbättrar det stabiliserade grusmaterialets beständighet mot bl.a. tjäle. Delar av de erhållna resultaten har utnyttjats vid renoveringsarbetet som utfördes under hösten 2004 på Ehnsjövägen i Hallstavik.

Sammanfattning

Projektet är baserat på resultat som finns redovisat i rapporten FACE (Fly Ash in Civil Engineering) /1/. Det nu aktuella projektets syfte är att utveckla bindemedelsrecept för renovering av grusvägar baserade på en specifik flygaska från Holmen Papers Hallsta Pappersbruk. Utvecklingsarbetet nyttiggör tidigare finska undersökningar och erfarenheter på liknande bindemedelstyper i geotekniska anläggningar. Finska erfarenheter visar att stabilisering av grusvägar med flygaska ger förbättrad bärighet, bättre hållbarhet och minskat underhållsbehov. Stabiliseringssystemet medför också möjligheten att återanvända och därmed återvinna det material som redan existerar i vägen.

Provmaterial som ingick i undersökningen var grusmaterial från den aktuella provvägen (Ehnsjövägen i Hallstavik) och flygaska från Holmen Paper AB, Hallstavik. Flygaskan användes som bindemedel för att stabilisera grusmaterialet. Geotekniska undersökningen omfattade karakteriseringstester på flygaskan och gruset, inblandningstester samt kontrolltester på framtagna stabiliseringsrecept. Därtill gjordes försök för att bedöma stabiliseringens miljöpåverkan. Baserat på erhållna resultat från denna undersökning utfördes ett parallellt projekt, där Ehnsjövägen i Hallstavik renoverades i syfte att utvärdera stabiliseringsprocessen i full skala med hänsyn till tekniska, miljö- och ekonomiska aspekter vid byggandet. Provs stabiliseringsprojektet kommer att rapporteras separat.

Projektets resultat indikerar att flygaska kan användas med bra resultat som t.ex. bindemedel vid stabilisering av grus. Flygaska tillsammans med små mängder av andra bindemedel (byggcement och/eller masugnslagg) kan ge ett ur tjälningssynpunkt beständigt material. Projektet ger också underlagsmaterial som kan användas för att vidareutveckla bindemedel i andra tillämpningar, som exempelvis vid förbättring av överskottsmassor i byggnadsändamål.

Nyckelord: Flygaska, grusväg, stabilisering, bindemedel

Summary

The project is based on the results of a significant research project FACE (Fly Ash in Civil Engineering) /1/. The project aims at the development of binder recipes based on a chosen fly ash from Holmen Paper's Hallsta Pappersbruk for the renovation of a road. The development will benefit from the Finnish research and experience on this type of binders for geotechnical applications. The stabilisation should result in improving bearing capacity and better long-term durability and service life of the gravel roads. The environmentally friendly stabilisation system comprises also the possibility to reuse and recycle the material that already exists in the road to be renovated.

The test materials for the development project were the gravel from a chosen test road and the fly ash of Holmen Paper AB. The fly ash was used as the binder material. The geotechnical tests included characterisation tests of the test materials, tests on the stabilised mixes and control tests for the stabilisation recipe. Also, there were tests for the assessment of the environmental impact of the stabilisation. Side by side with those tests there has been a full-scale test, a separate project in Hallstavik, to test the stabilisation process with respect to the technical, environmental and economical aspects of construction. The full-scale test will be reported separately.

The project results imply that fly ash can be beneficially used as a binder for the stabilisation of gravel materials and similar materials. Fly ash can be used also with small amounts of other binder materials like cement or blast-furnace slag in order to have a frost resistant material. The project gives also basis for the development of binders for other types of applications, both for the renovation purposes and for the improvement of spoils for construction purposes.

Keywords: Fly ash, gravel road, stabilisation, binder

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	FORSKNINGSUPPGIFTEN	1
1.3	RESULTAT	2
2	PROVMATERIAL OCH DERAS KARAKTERISERING	3
3	RESULTATREDOVISNING AV STABILISERINGSTESTER	8
3.1	STABILISERING AV G16 MED OLIKA BINDEMEDEL	8
3.2	STABILISERING AV G16 MED OLIKA MÄNGDER AV FLYGASKA	11
3.3	PÅVERKAN AV PACKNINGSGRADEN	14
3.4	PÅVERKAN AV GRUSMATERIALET	15
3.5	RESULTAT AV MILJÖTESTER	16
4	RESULTATANALYS OCH SLUTSATSER	17
5	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	19
6	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSPÅRBEJDE	20
7	LITTERATURREFERENSER	21

Bilagor

A	UNDERSÖKNINGSMETODER
B	MILJÖTESTRESULTAT (TABELL)

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Sedan början av 1990-talet har Ramboll Finland Oy (före detta SCC Viatek Oy) varit en av pionjärerna som har utvecklat alternativa konstruktionsmaterial från industriella restprodukter. Energiproduktionens flygaska har varit ett av de mest intressanta och mångsidiga materialen. Flygaskor kan användas i stället för grus för bl.a. en vägs bär- eller förstärkningslager med eller utan stabilisering, som inblandningar med andra typer av restprodukter (t.ex. fiberslam som testats vid Q4-228). Torra flygaskor, direkt från en silo (lager) eller från pannan (filtersystemet), är ofta reaktiva och kan användas som bindemedel vid stabilisering av exempelvis leror. I sådana fall är det möjligt att ersätta helt eller till en större del kommersiella bindemedel (t.ex. kalk och cement).

Stabilisering av gamla grusvägar är en renoveringsmetod där man har fått mycket bra resultat i Finland med flygaskor som en komponent av stabiliserings- eller bindemedel. Den senaste och mycket lyckade pilotvägen, en sträcka av flera kilometer, renoverades i Luopioinen på sommaren 2002. Pilotprocessen finansierades av EU:s LIFE-Environment, Finlands Vägförvaltning och industrin (se: www.tieliikelaitos.fi/5_4.asp). Flygaska-baserade bindemedel har också testats för att förbättra dåliga överskotts- och muddringsmassor, som sedan kan användas i jordbyggandet (t.ex. som ballast in-situ) i stället för deponering. Alla dessa användningsområden medför kostnadsbesparningar och byggnadstekniska fördelar: hållbara, och lägre och lättare konstruktioner än med normalt stenmaterial.

1.2 Forskningsuppgiften

Målsättning med aktuellt projekt var att utveckla recept för flygaskabaserade bindemedel. Laboratorieundersökningen utfördes i Ramboll Finlands laboratorium. Bindemedlet skulle sedan testas i full skala vid renovering av en gammal skogsväg, Ehnsjövägen norr om Hallstavik, Holmen Skog. För att uppnå dessa mål har nedanstående program följts:

- Hallsta Pappersbruk har tagit provmaterial från olika ställen på Ehnsjövägen samt från Hallsta Pappersbruks flygaska. Dessa material sändes till undersökningslaboratoriet i Finland.
- Flygaskans och grusmaterialets geotekniska egenskaper har undersökts och materialen har karakteriserats
- Baserat på erhållna karakteriseringsresultat har homogeniserat grusmaterial från Ehnsjövägen blandats med olika bindemedel baserade på Hallsta Pappersbruks flygaska samt med enbart cement som referens. Dessa inblandningar har stabiliserats och undersökts sedan för att utreda stabiliseringseffekt.
- Undersökningar utfördes på stabiliserat grus, där stabiliseringsmedel var endast flygaskan av olika mängd (10, 20 och 30 % av grusmaterialets torrsubstans). Här undersöktes flygaskamängdens påverkan på det stabiliserade grusmaterialets beständighet.

- Därefter gjordes några kontrolltester på grusmaterialet stabiliserat med 20 % flygaska. Här kontrollerades packningsgradens och grusmaterialets kvalitetspåverkan på det stabiliserade grusmaterialets beständighet.
- Miljöpåverkan undersöktes med hjälp av lakningstest (kolonntesten enligt NEN 7343) på grusmaterial och stabiliserat grusmaterial. Som jämförelse har även flygaskans och grusets totalhalt av tungmetaller bestämts.

Provvägen utfördes med enbart flygaska som stabiliseringsmedel eftersom detta är enklast. Med ledning av resultaten i denna rapport valdes då en hög askhalt, upp till 30 %, för att om möjligt få en frostbeständig väg. Laboratorieresultaten antyder att det ändå finns en risk för att vägen skall frysa sönder inom 5 år. Frostbeständigheten kan dock vara tillräcklig genom att askor är långsamhärdande och därmed har en viss möjlighet till självläkning och förbättrade egenskaper på lång sikt. Provvägen bör analyseras i minst 5 år för att få en uppfattning av vilken frostbeständighet som erfordras i laboratoriemiljö för att ge en beständig askväg.

1.3 Resultat

Syftet med denna undersökning var att ta fram optimalt recept för ett bindemedel som skulle användas för provstabilisering av en vägsträcka under hösten 2004. Erfarenheter från fältutförandet redovisas i en senare Värmeforskrapport.

Resultaten indikerar att flygaska med aktiveringsmedel (cement, cement+Merit) ger lovande stabiliseringsresultat. Endast tillsats av flygaska (upp till 20 % flygaska) garanterar inte en lyckad stabilisering och tillräckligt bra bärighet av den stabiliserade vägen. Stabiliseringsresultat beror följande faktorer:

- o arbetsmetodik,
- o beredningsarbetets kvalitet
- o materialens olika karaktär och kvalitet.

I många fall behövs det tillsats av aktiveringsmedel (exempelvis cement) till flygaskan för att få tekniskt bra resultat med hänsyn till den stabiliserade vägens användningsändamål.

I denna rapport ges det underlagsmaterial som kan användas i stabiliseringsprojekt samt vid utvecklingen av bindemedel i andra tillämpningar, både vid renovering av vägar och vid förbättringen av överskottsmassor i byggnadsändamål.

2 Provmaterial och deras karakterisering

Holmen Paper AB, Hallsta Pappersbruk skickade c. 1,4 ton provmaterial (grusmaterial) till Ramboll Finland i Luopioinen i januari 2004. Grusmaterialprov togs från 4 olika ställen på Ehnsjövägen norr om Hallstavik. Proverna märktes med 1, 4, 5 och 6. Grusmaterialet har karakteriserats enligt tabellen 1.

Hallsta Pappersbruk tog också prov av bioflygaska (309 kg). Proverna togs ut torra och skickades till Ramboll Finland (senare flygaska, FA eller Hallsta Pappersbruks flygaska). Proverna togs emot i slutet av februari 2004 (26.2.2004). Flygaskan kan närmare definieras med nedanstående information

Typ av panna:	CFP (A-panna)
Brännmedel:	returpapperslam och avloppsslam
Lagring:	torr
Bevattning:	ingen

samt med karakteriseringsresultat (tabell 1, figurer 1 och 2).

Tabell 1: Karakterisering av flygaska och grusmaterial

Table 1: Characteristics of the fly ash and the gravel material

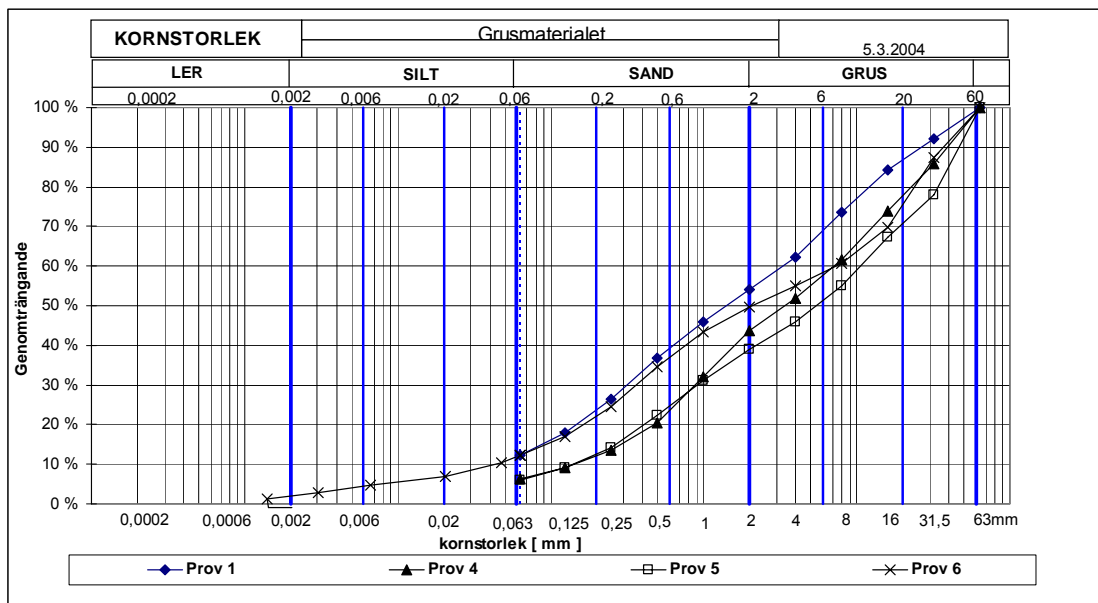
	Vattenkvot, w	pH	Glödnings- förlust	CaO (akt)	Stenhalt (> 63 mm)	Finjordshalt (<0,063 mm)
enhet:	% TS	-	% TS	% TS	%	% av mate- rial < 63 mm
obs.:		3)	800°C	3)	1), 2)	1)
Flygaska	0	13,1	2,9	9,0	-	-
Grus 1	7,1	-	1,6	-	10	12,2
Grus 4	6,6	-	1,1	-	30	6,4
Grus 5	5,1	-	1,0	-	10	6,1
Grus 6	4,8	-	1,8	-	0	12,2

Obs. 1) Kornstorleksfördelning i Figur 2 för flygaskan och i Figur 1 för grusmaterial ; sten- och finjordshalten bestämdes endast för grusmaterialet

Obs. 2) Stenar > 63 mm togs bort; fraktionen bestämdes endast för grusmaterialet

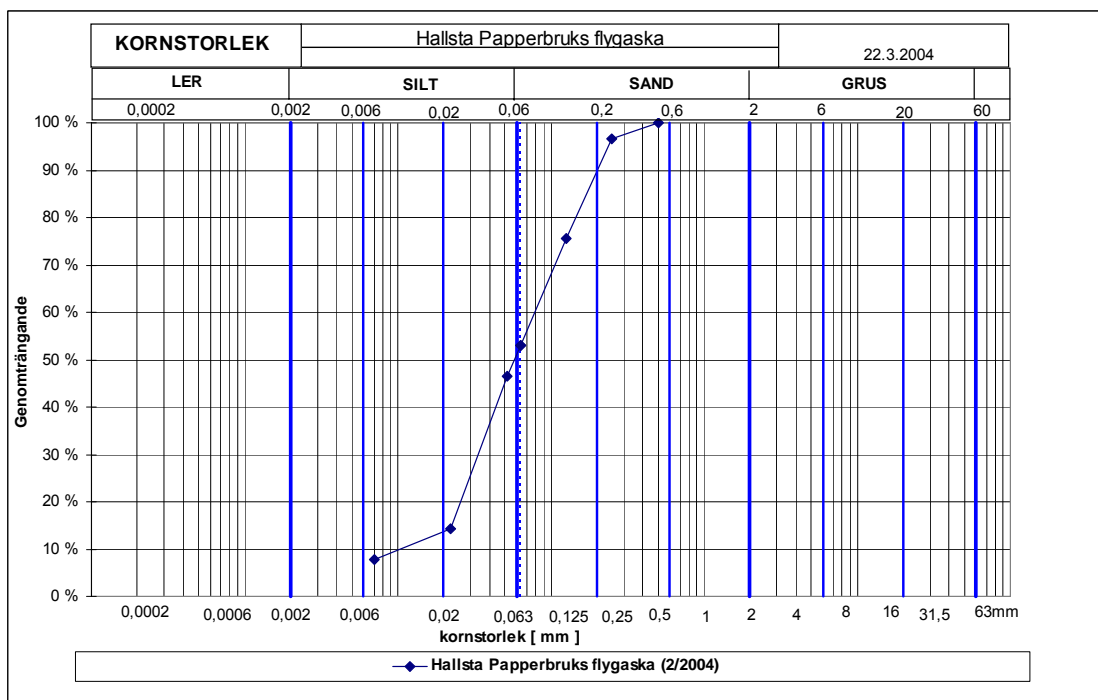
Obs. 3) Bestämdes endast för flygaskan

Grusmaterial fanns mycket mera än tillräckligt för de tester, som planerats för projektet. Därför var det motiverat att välja ett sådant delmaterial, som motsvarar en blandning av alla grusmaterial (1, 4, 5 och 6). En blandning av grusmaterial nr. 1 och 6 (i förhållanden 1:1) valdes för vidare undersökning med avseende på stabilisering. Detta grusmaterial kallas senare ”G16”.



Figur 1. Kornstorleksfördelningkurvor för grusprov 1, 4, 5 och 6. Stenar (> 63 mm) har borttagits.

Figure 1. Grain size distribution of gravel samples 1, 4, 5 and 6. Stones (> 63 mm) have been removed



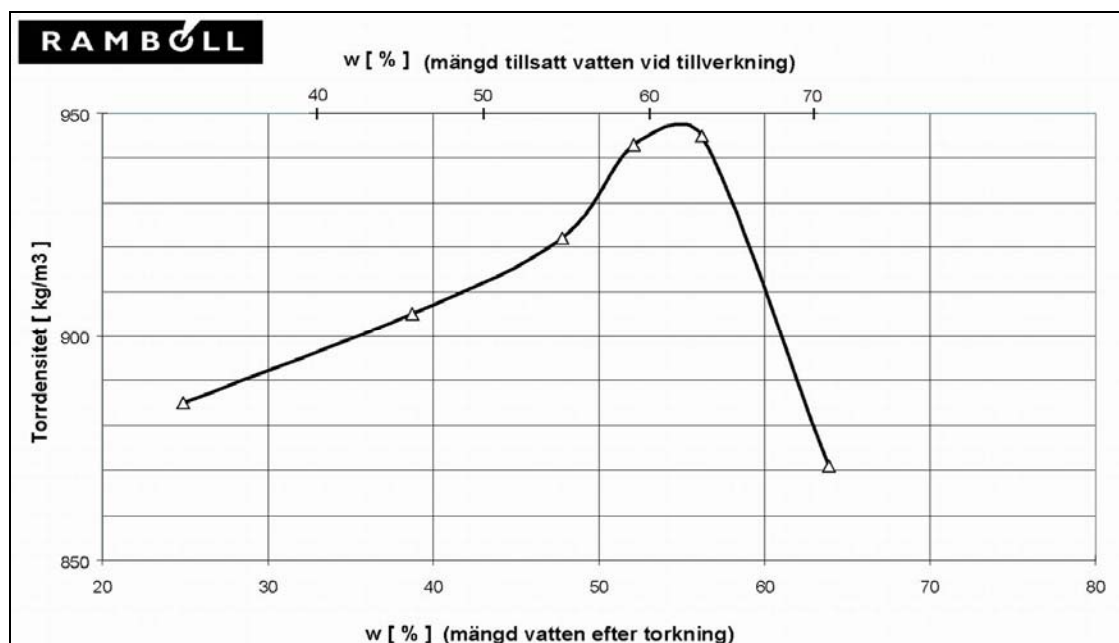
Figur 2. Flygaskaprovets kornstorleksfördelning

Figure 2. Grain size distribution of the fly ash sample

För flygaskan bestämdes också den specifika ytan (Blaine) samt portalet ($e = n / (1 - n)$ och $n = 1 - (\text{torrdensitet}/\text{korndensitet})$).

Torrdensitet:	900 – 945 kg/m ³
Korndensitet:	2510 kg/m ³
Spec. yta (Blaine):	660 m ² /kg
Porositet (n):	62 % – 64 %
Portal (e):	1,66 – 1,79

Materialets torrdensitet togs fram med hjälp av proctorförsök. Figuren 3 visar torrdensiteten som funktion av flygaskans vattenkvot vid packning. Tillsats av vatten ($w = 60\%$) till den torra flygaskan medför en viss avdunstning och kemisk bindning av vatten under väntetiden före packning. Avdunstningen orsakas av att flygaskan reagerar med vatten under en viss värmeutveckling, flygaskans temperatur höjs till över 37°C. Den aktuella vattenkvoten efter väntetiden före packningen är ca. 52 %.

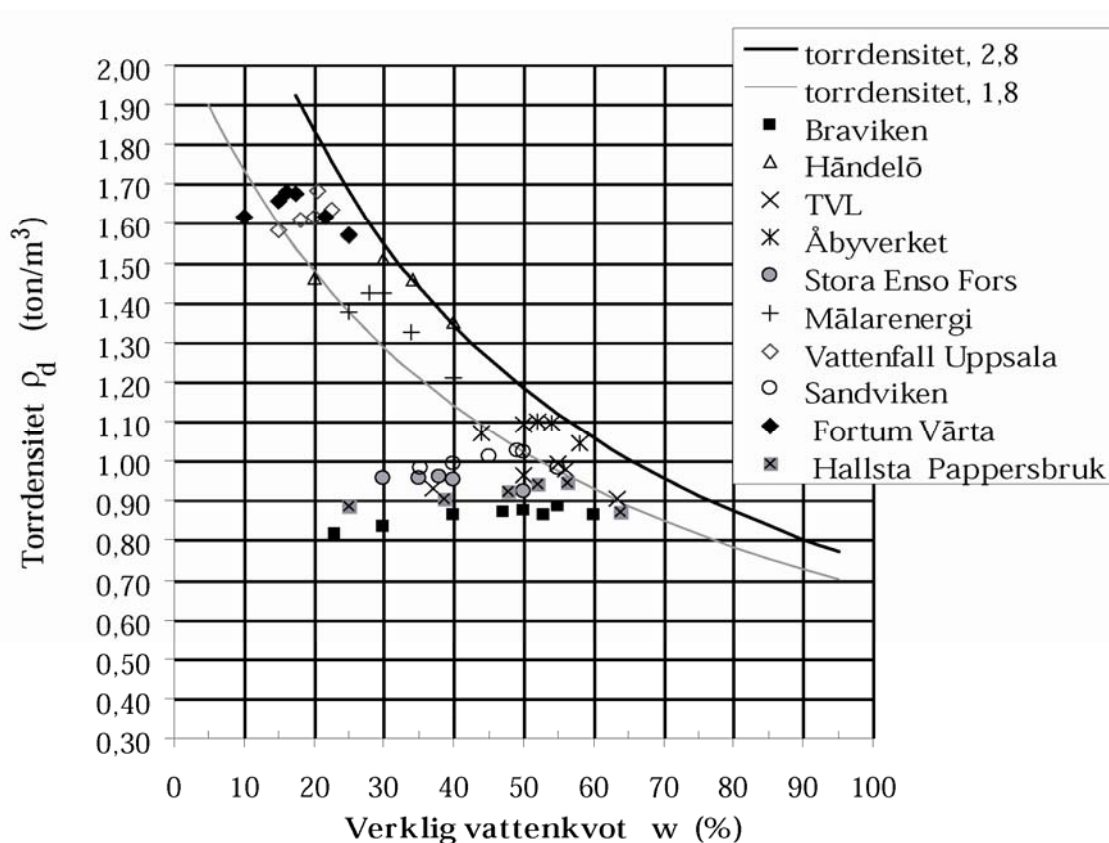


Figur 3. Flygaskans proctorkurva: den teoretiska proctorkurvan baseras på mängden tillsatt vatten vid tillverkningen av provkropparna medan den aktuella proctorkurvan baseras på den vattenkvot som har bestämts efter torkning av provkropparna (105°C).

Figure 3. Proctor results of the fly ash: the proctor curve has been determined theoretically on the basis of mixing additional water into the dry fly ash and the actual proctor curve on the basis of drying the compacted test piece (at 105°C).

Resultat som redovisas ovan jämförs här med information som har tagits fram för nio flygaskor i projektet FACE [1]. Syftet i detta skede är att grovt bedöma möjligheten att nyttja flygaskan i tekniska applikationer.

I figuren 4 görs det en jämförelse med de undersökta flygaskorna [1] för att kunna värdera Hallsta Pappersbruks flygaska. I figuren redovisas resultat från FACE undersökningen med inlagda proctorresultat med Hallsta Pappersbruks flygaska. Den teoretiskt högsta torrdensiteten vid en korndensitet på 2,51 ton/m³ är inlagd i figuren. Den flygaska som stämmer bäst överens med den nu aktuella flygaskan är Bravikens flygaska. Hallsta Pappersbruks flygaska har optimal vattenkvot runt 55 – 60 %. Denna flygaskans tekniska egenskaper som optimal vattenkvot och maximal torrdensitet stämmer väl överens med flygaskan från Braviken. Flygaskan från Braviken har optimal vattenkvot på 55 %. Vid optimal vattenkvot ligger flygaskans torrdensitet på 885 kg/m³. Flygaskans hållfasthet är då ca 2,5 MPa.



Figur 4. Packningskurvor från nio flygaskor [1] + flygaska från Hallsta Pappersbruk (Q4-275)

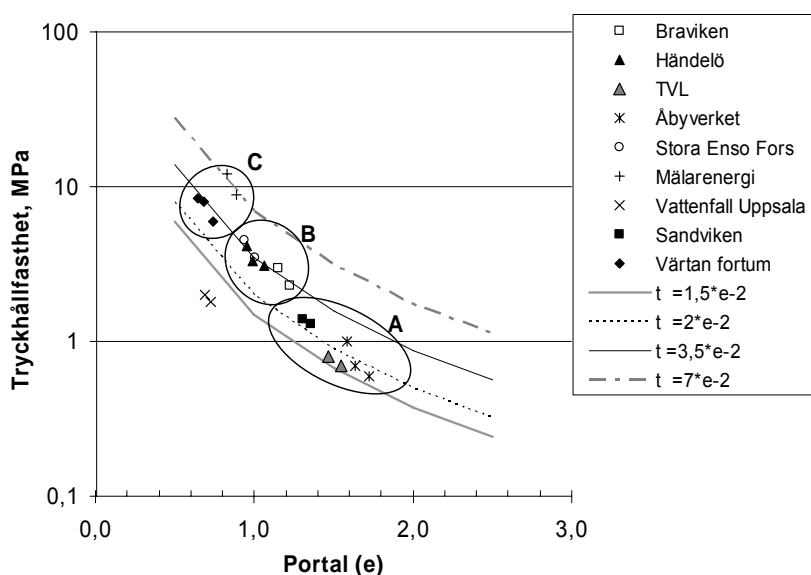
Figure 4. Dry density – water content relationship for 9 fly ashes [1] + fly ash of Hallsta Paper (Q4-275)

I rapport [1] visas ett samband mellan hållfasthet och portal hos olika flygaskor. Ekvationen som föreslogs var:

$$\tau = k * e^{-2}$$

där τ är hållfastheten efter 14 dagar, k är en konstant som beror av bindningarnas styrka, e är materialets portal och c (här $c = -2$) är en konstant beroende av partikelstorleken. I rapporten bedömdes att konstanten k för de undersökta flygaskorna ligger mellan 1,5 och 7. Eftersom flygaskorna kommer från olika tillverkningsprocess, olika råmaterial

varierar konstanten mellan olika flygaskor. Genom att sänka materialets portal, dvs. höja materialets packningsgrad kan flygaskans hållfasthet höjas. Portalet kan dock bara sänkas till en viss nivå. Inget material kan packas mer än sin maximala densitet. Genom tillsats av bindemedel som exempelvis cement kan flygaskans hållfasthet höjas genom en högre bindningskraft mellan partiklarna, dvs. ett högre k -värde. Tillsatsen av cement eller andra bindningsmedel får dock inte påverka materialets densitet negativt genom en höjning av portalet, eftersom detta i sin tur medför att hållfastheten minskar.



Figur 5. Sambandet mellan portal och tryckhållfasthet. OBS: bokstaven t står för τ .

Figure 5. Correlation between void ratio and shear strength. NOTE: letter t stands for τ .

Som det framgår av figuren 5 har flygaskorna i grupp B och C ungefär samma k -värde, dvs. bindningskraft. Det som skiljer dessa material åt är materialets portal, e . Lägre portal ger högre hållfasthet. Det bör noteras att flygaskor som har lagrats i vått tillstånd, under en längre tid, tillhör *grupp A*, exempelvis flygaskorna från TVL och Åbyverket. Trots den långa lagringen uppvisar dessa flygaskor viss kvarstående härdningskapacitet.

Flygaskan från Hallsta Pappersbruk har inte undersökts med avseende på hållfasthet. Flygaskan från Braviken har delats in i *grupp B* i FACE [1] rapporten. Till *grupp B* hör flygaskor som bedöms kunna 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. Det bedöms att även flygaskan från Hallstavik tillhör denna gruppering. Materialet uppvisar dock en förhållandevis högt portal.

3 Resultatredovisning av stabiliseringstester

3.1 Stabilisering av G16 med olika bindemedel

Med hänsyn till resultaten från tidigare stabiliseringstester (grus stabiliserad med ett flygskabaserat bindemedel) valdes följande bindemedel för provstycken för de första stabiliseringsförsöken:

- flygaska från Hallsta Pappersbruk (FA),
- cement (standard cement; BCe) som referensbindemedel,
- flygaska med tillsats av cement (FA+BCe),
- flygaska med tillsats av hyttsten och Merit 5000 (FA+Merit),
- flygaska med tillsats av cement och hyttsten [FA+(BCe+Merit)]
- flygaskan med tillsats av kalk och cement [FA+(CaO+BCe)]

Mängden av bindemedeltillsats var 8 -13 % av grusmaterialets (G16) torrmasa. Proctortester och packningstester utfördes på två blandningar: G16+10 % FA och G16 + 5 % FA + 3 % BCe. Resultat från dessa Proctortester ges både i tabell 2 och figur 6. Resultat från packningstesten för G16 + 10 % FA visar att packningsgraden $D = 90$ % kan nås med en arbetsmängd som motsvarar fem slag/skikt. Packningen utförs i fem skikt. En packningsgrad på $D = 95$ % erhöles med en arbetsmängd som motsvarar 10 till 11 slag/skikt. Motsvarande resultat för G16 + 5 % FA + 3 % BCe visar en arbetsmängd som motsvarar 9- 11 slag/skikt (tabell 2).

Fem provkroppar tillverkades för samtliga bindemedelsvarianter (se ovan). Efter blandning och packning med arbetsmängden fem slag/skikt i fem skikt har de packade provstyckena härdats vid rumstemperatur ($20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) under 28 dagar. Efter denna härdningstid har provkroppar med samtliga bindemedelsvarianter undersökts med avseende på tryckhållfasthet. Samtidigt startades det också frys-töförsök (se Bilaga A) på tio olika bindemedelsvarianter (se tabell 2). Den relativa frys-töbeständigheten (F-T beständigheten), bestäms genom att jämföra tryckhållfastheten hos de provstycken som har utsatts för F-T, med tryckhållfastheten före F-T påverkan. Baserat på tidigare finska erfarenheter kan ett material klassas som beständigt material om förändringen av hållfastheten efter F-T försök är mindre än 25 %. Den relativa F-T beständigheten är mindre än 25 % för följande bindemedel:

- o BCe
- o FA + BCe
- o FA + (BCe+Merit).

Den relativa F-T beständigheten var 77 % för G16 stabiliserad med 10 % flygaska.

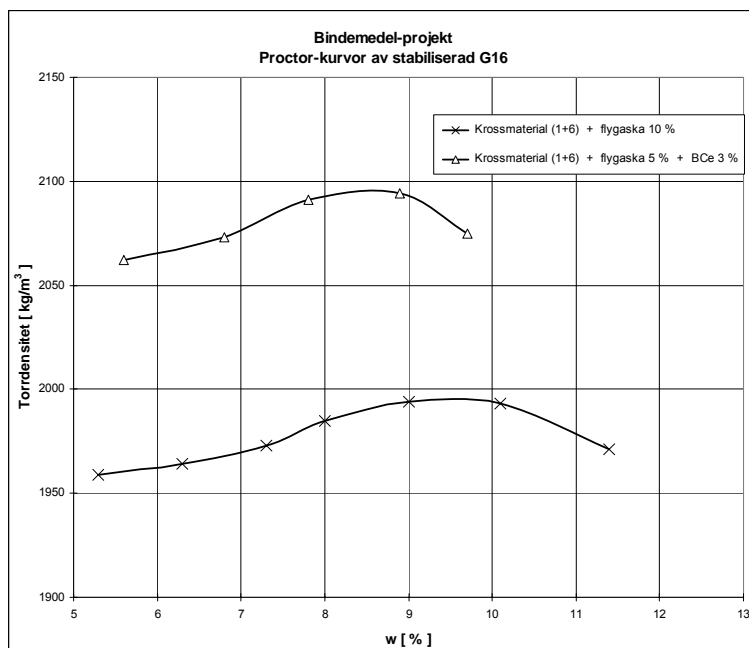
Frostbeständigheten bestämdes med hjälp av tjällyftsförsöket (se Bilaga A), som utfördes på bindemedelsvarianter som hade lägre relativ F-T beständighet än 25 %.. Bindemedlet BCe valdes som referens- och jämförmaterial. Testerna startades ca 60 dagar efter det att provkroppar hade tillverkats. Följande bindemedelsvarianter har undersökts med avseende på frostbeständighet:

- % BCe,
- 5 % FA + 3 % BCe
- 10 % FA + 3 % BCe.

Resultat från dessa försök visar, att härdningen av G16 stabiliserad med FA+BCe - bindemedel inte har avstannat efter 28 dagar. Provstyckets hållfasthet var högre efter tjällyftsförsöket än efter härdning under 28 dagar. Härdningen bedöms fortsätta minst 60 dagar efter tillverkning. För G16 stabiliserad med endast BCe var hållfastheten något lägre efter tjällyftsförsöket (2,6 MPa) än efter härdning under 28 dagar (3 MPa). Segregationspotentialen (SP_o; se Bilaga A) visar, att det FA+BCe -stabiliserade grusmaterialet (G16) inte ger tjällyftning. Däremot tycks det cementstabiliserade grusmaterialet vara någorlunda känsligt för tjällyftning [2]. Resultat av beständighetstester kan ses också i figuren 8.

Tabell 2: Påverkan av olika bindemedel
Table 2: Effect of different binders

Bindemedel	Mängd	Proctortest		Packningstest /Arbetsmängd		Tryck-hållfasthet, 28 d	F-T beständighet 28 d		Frostbeständighet	
		Vatten kvot, W _{opt}	ρ _{dmax}	D = 90 %	D = 95 %		σ	σ	Relativ	σ
		% TS	% TS	kg/m ³	skikt * slag/skikt	skikt *slag/skikt	MPa	MPa	%	MPa
FA	10	9,5	1995	5x5	5x10...11	1,3	0,3	77		
BCe	3					3,0	2,6	13	2,6	0,2 ... 0,6
	5					5,3	4,5	15		
FA+BCe	5+3	8,6	2095	5x4	5x9...10	5,1	4,2	18	5,9	< 0,1
	5+5					6,5	5,9	9		
	10+3					5,3	4,2	21	5,4	< 0,1
FA+Merit	10+3					1,5	0,4	73		
	5+5					1,0				
	5+3					1,0	0,2	80		
FA+ (BCe+Merit)	10+3					3,8	3,0	21		
FA+ (CaO+BCe)	10+3					2,6	1,9	27		
	5+5					1,4				



Figur 6. Proctorkurvor för grusmaterialet G16 blandad med 10 % flygaska och med 5 % flygaska+ 3 % byggcement

Figure 6. Proctorcurves of the gravel G16 mixed with 10 % fly ash and with 5 % fly ash + 3 % cement

3.2 Stabilisering av G16 med olika mängder av flygaska

Resultat av stabiliseringen med olika typer av bindemedel diskuterades vid telefonmötet med referensgruppen den 28 april 2004. På grund av förutsättningarna för den kommande provvägen beslutades att fortsätta laboratorieundersökningen med endast flygaska från Hallsta Pappersbruk som bindemedel men med olika mängder (10, 20 och 30 %).

I tabell 3 sammanfattas resultat från utförda försök med där G16 stabiliserades med 10 %, 20 % och 30 % flygaska. Proctortester utfördes på alla varianter, med undantag för G16 + 10 % FA, där endast enstaka kontrolltester utfördes på materialet. Proctortest resultat redovisas grafiskt i figuren 7. Provkroppar tillverkades med arbetsmängd som motsvarar 11 slag/skikt (fem skikt) för blandningen vid optimal vattenkvoten (w_{opt}). Den resulterade packningsgraden, D, blev 93 - 95 %. Den optimala vattenkvoten är den som materialet hade vid packningen, dvs. efter lagringstiden (ca en timme). Värmeutveckling medför att vatten avdunstar från blandningen (jämför med figur 3).

Efter 28 dygns härdning undersöktes tryckhållfastheten och frys-tö- (F-T) försöken startades. Tjällyftsförsöken startades efter det att F-T-beständighetsförsöken var avslutade. Härdningstiden motsvarade den vid de tidigare försöken. För blandningen med 20 % flygaska gjordes också provstycken som härdades under 90 dagar innan dessa undersöktes med avseende på tryckhållfasthet och frys-töbeständighet.

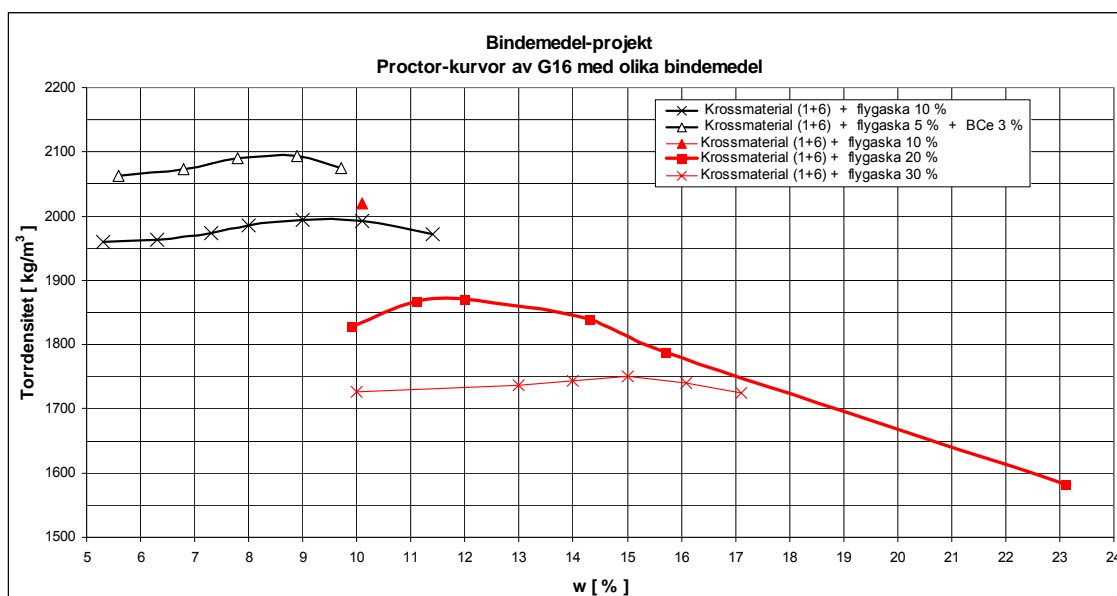
Tabell 3: Testresultat för G16 stabiliserad med olika mängder av flygaska
Table 3: Testresults of G16 stabilised with different quantities of fly ash

Binde- medel	Proctor		Tryckhållfastheten		F-T beständighet				Frostbeständighet		
	w_{opt}	ρ_{dmax}	σ (28 d)	σ (90 d)	σ (28 d)	relativ	σ (90 d)	relativ	σ	relativ	SP_o
	%	kg/m ³	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	mm ² /Kh
FA * 10 %	c. 10	c. 2020	1,1		0,3	-73 %			0,5	- 55 %	1,5
FA 20 %	12	1870	2,1	2,3	0,8	- 62 %	0,8	- 65 %	1,3	- 38 %	1,7
FA 30 %	15	1750	2,2		1,3	- 41 %			1,5	- 32 %	1,9-2,0

* jämför med tidigare resultat i tabellen 2

Tryckhållfastheten efter 28 och 90 dagar för prov med 20 % flygaska som tillsatsmängd visar att härdningen avstannar efter de första 28 dagarna. Den relativa F-T beständigheten är relativt hög. Beroende på mängd flygaska är den relativa F-T beständigheten 41 – 73 %. Beständigheten ökar med mängd flygaska som har tillsats. Den relativa beständigheten var lika stor för provkropp (med 20 % flygaska) som har härdat i 90 dagar istället för 28 dagar innan F-T-försöken startades. Motsvarande slutsatser kan dras baserat på resultat från tjällyftsförsöken. Frostbeständigheten är låg men ökar med mängd tillsats flygaska. Tryckhållfastheten efter tjällyftsförsöken är

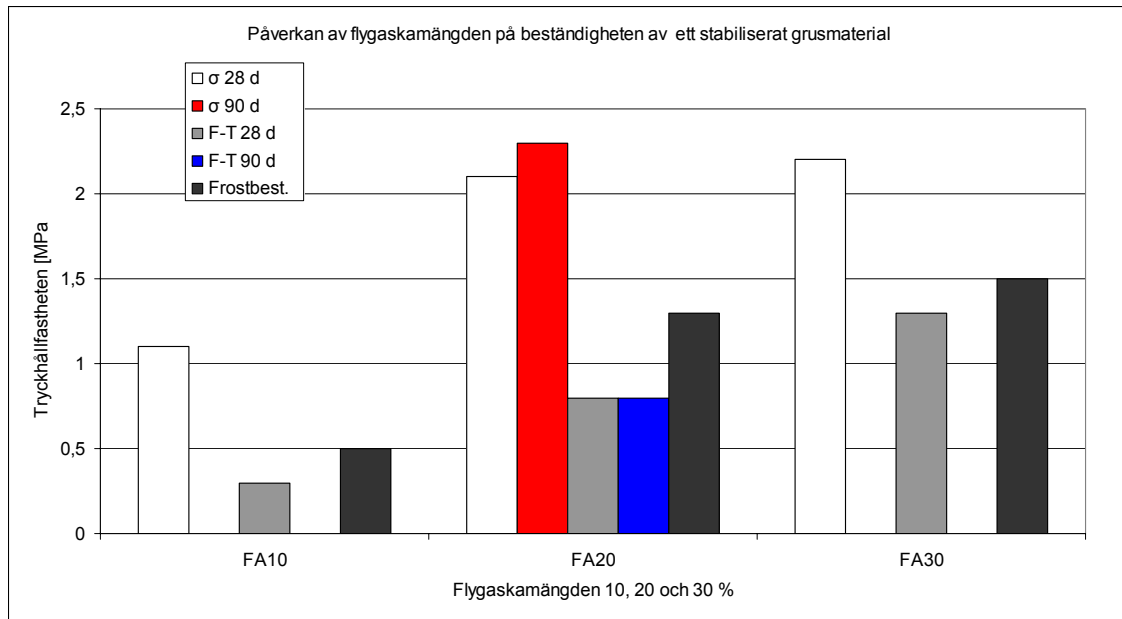
mellan 45 - 68 % av tryckhållfastheten efter 28 dagars härdning vid rumstemperaturen. Segregationspotentialen $SP_0 = 1,5 - 2,0 \text{ mm}^2/\text{Kh}$. Baserat på tidigare erfarenheter antyder resultaten att grusmaterial som har stabiliserats med denna flygaska utan något annat bindemedel är känsligt mot tjäle [2]¹. Hållfasthetsresultat med 10 %, 20 % och 30 % flygaskatillsats redovisas i figur 8. I figur 9 redovisar resultat från grusstabilisering med flygaska med och utan tillsats av bindemedel (se: 3.1).



Figur 7. Resultat av Proctortester på G16 med olika bindemedel

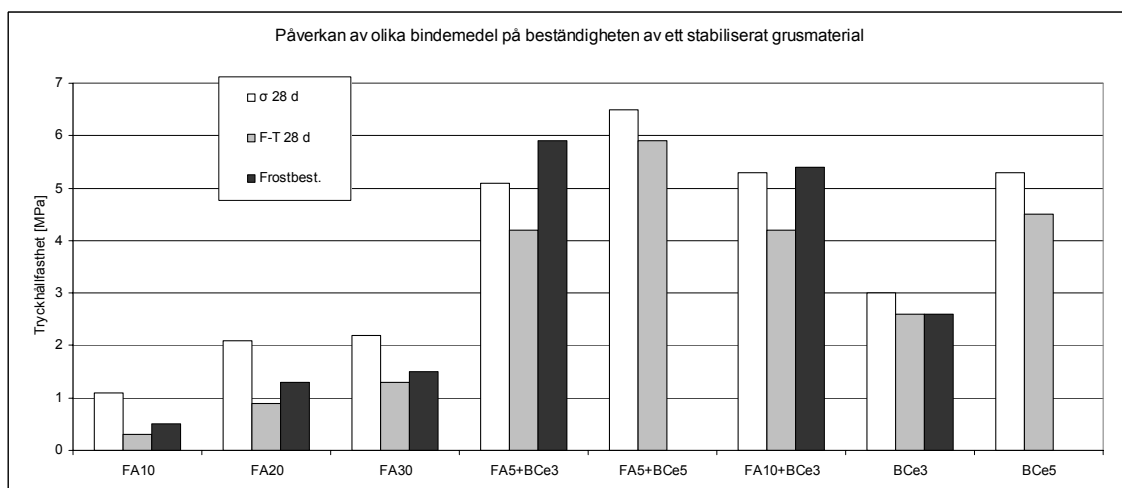
Figure 7. Results of Proctor tests on G16 with different binders

¹ se också Bilaga A och där beständighetstester



Figur 8. Påverkan av olika flygaskamängder på ett stabiliserat grusmaterial

Figure 8. Effect of different amounts of fly ash on the stabilised gravel



Figur 9. Påverkan av olika bindemedel på ett stabiliserat grusmaterial

Figure 9. Effect of different binders on the stabilised gravel

3.3 Påverkan av packningsgraden

Påverkan av packningsgraden har undersökts för en av blandningarna, G16 + 20 % FA. Packningen med olika arbetsmängder har gjorts vid den optimala vattenkvoten ($w_{opt} = 12\%$). Arbetsmängden varierade från 5 slag per skikt till 14 slag per skikt. Packningen utfördes i 5 skikt. Torrdensiteten (ρ_d) har bestämts och packningsgraden (D) kalkylerats. Varje alternativ har också undersökts med avseende på erhållen tryckhållfasthet efter 28 dygns härdning, och efter för frys-töbeständigheten. Det senare utfördes på prover som har först härdat under 28 dygn. Frostbeständigheten kontrollerades endast för det alternativ som packades med arbetsmängden 14 slag/skikt. Resultaten redovisas i tabell 4. Här har vi också motsvarande resultat från tjällyftsförsöket med provkroppar som har packats med 11 slag/skikt.

Tabell 4: Påverkan av packningsgraden
Table 4: Effect of the compaction rate

Blandning	Arbetsmängd, slag/skikt	Torrdensitet	Packningsgrad	Hållfasthet	Hållfasthet efter F-T test	F-T beständighet	Hållfasthet efter tjällyfts-test	Frostbeständighet	Segrationspotential
				A	B	(B/A)	C	(C/A)	
				σ (28 d)	σ	-	σ	-	
	(s/s)	ρ_d	D	MPa	MPa	%	MPa	%	mm ² /Kh
G16 + 20 % FA	5	1635	88	1,2	0,6	50	nn	-	-
	8	1710	92	1,8	0,6	30	nn	-	-
	11	1745	94	2,1	0,9	43	1,3	62	1,7
	14	1775	95-96	2,6	1,1	42	1,4	54	1,4-1,5

Tabell (4) visar att packningsgraden har en väsentlig betydelse med hänsyn till härdning och hållfasthet, vilket stämmer väl med teorin om sambanden mellan portal och hållfastheter (se fig 5). En särskilt stor förbättring kan märkas vid hållfastheten efter F-T testen, när packningsgraden höjs från 92 % till 94 %. På grund av detta skulle packningsgraden vid det egentliga byggandet vara minst 94 %.

3.4 Påverkan av grusmaterialet

Fyra olika grusmaterial från Ehnsjövägen har blandats med 20 % flygaska. Provstycken har tillverkats med arbetsmängden 11 slag/skikt vid blandningens optimala vattenkvot, 12 %. De olika provstyckens torrdensitet och hållfasthet efter 28 dygns härdning har bestämts. Resultaten redovisas i tabell 5. De stabiliserade grusmaterialen 1 och 6 gav likartade resultat. Detsamma gäller de stabiliserade grusmaterialen 4 och 5. Finmaterialinnehållet kan vara en förklaring varför grusmaterialen 1 och 6 har något högre hållfasthetsvärden än 4 och 5. Finjordshalten kan ge större aktiva ytor vid härdningen, samt fylla mera effektivt tomrum mellan grövre partiklar.

Tabell 5: Påverkan av grusmaterialet
Table 5: Effect of the gravel

Blandning	Torrdensitet	Hållfasthet
	ρ_d	σ (28 d)
	kg/m ³	MPa
Grus 1 + 20 % FA	1730	2,7
Grus 4 + 20 % FA	1735	1,8
Grus 5 + 20 % FA	1750	1,8
Grus 6 + 20 % FA	1710	2,4

Tabell 6: Egenskaper av grusmaterial (se tabell 1)
Table 6: Characteristics of the gravels (see table 1)

	Vattenkvot, w	Glödnings- förlust	stenhalt (> 63 mm)	Finjordshalt (<0,063 mm)
enhet:	% TS	% TS	%	% av mate- rialet < 63 mm
obs.:		800°C		
Grus 1	7,1	1,6	10	12,2
Grus 4	6,6	1,1	30	6,4
Grus 5	5,1	1,0	10	6,1
Grus 6	4,8	1,8	0	12,2

3.5 Resultat av miljötester

Miljötester omfattade bedömning av olika ämnens lakbarhet från det FA-stabiliserade grusmaterialet och totalhalten av dessa ämnen i gruset respektive i flygaskan. Totalhalten och resultaten från lakningen jämförs sedan med finska riktvärden.

Totalhalten av oorganiska ämnen analyserades med ICP-MS/AES teknik. Prov förbereddes genom torkning < 40°C, krossning (vid behov) och siktning (fraktion < 0,02 mm) och upplösning i salpetersyra i mikrovågsugnen.

Stabiliserade prov G16 + 20 % FA härdades under 28 dygn. Därefter krossades det stabiliserade provet och grusmaterialet G16. Andelen mindre än 4 mm i krossade materialen var > 90 %. Lakningsförsök utfördes enligt kolonntest NEN 7343. Lakvatten analyserades med ICP-MS/AES teknik.

I Bilaga (B) redovisas en sammansättning av miljötestresultaten. Finska riktvärden /3/ och EU riktvärden för inert och icke-farligt avfall /4/ redovisas i tabellen. Resultaten visar att lakningen av oorganiska ämnen är låg och antyder att flygaska som bindemedel inte utgör en risk för miljön.

4 Resultatanalys och slutsatser

Projektets ursprungliga syfte var att utveckla bindemedelsrecept baserad på en specifik flygaska för att stabilisera grusmaterial från en viss väg. Enligt tidigare finska undersökningar och erfarenheter skulle stabiliseringen resultera i förbättrad bärighet, bättre hållbarhet och lägre underhållskostnad av den renoverade grusvägen. Stabiliseringssystemet innebär också möjligheten att återanvända och därmed återvinna det material, som redan existerar i vägen. Förutsättningen att de reaktiva svenska (bio-) askorna ger bättre effekt som bindemedel än de typiska finska bioaskorna (brännmedel är oftast flis och/eller torv) är stor.

I början av utvecklingsarbetet karakteriserades torr flygaska från Hallsta Pappersbruk och grusmaterial från Ehnsjövägen i Hallstavik i Ramboll Finlands geotekniska laboratorium. Därefter startades de första stabiliseringstesterna med olika typer av bindemedel. Ett bindemedel var endast cement (referensbindemedel), ett bindemedel var endast flygaska, och de andra bestod av flygaska blandad med något annat material (cement, Merit 5000, kalk, blandningar av dessa). De första resultaten indikerade, att de bästa bindemedel skulle vara flygaska blandad med cement eller cement+Merit. Redan med tillsats av 3 % cement eller cement+Merit påverkades frys-tö- och frostbeständigheten positivt. Påverkan av mängder mindre än 3 % är sannolikt också väsentligt, men dessa har inte undersökts i projektet.

På grund av referensgruppens ståndpunkt, att bindemedlet och stabiliseringen bör utföras så kostnadseffektivt som möjligt, fortsattes undersökningen endast med flygaska som bindemedel i förhållandena 10 %, 20 % och 30 % flygaska blandad med grus. Således är projektets resultat inte optimerad för att ta fram recept med flygaska och aktivator, utan är optimerad för att uppnå bästa stabiliseringseffekt med flygaska och grusmaterial. Utökning av askans mängd i blandningen förbättrar tydligt det stabiliserade grusets frys-tö- och frostbeständigheten, men det stabiliserade materialets tjälkänslighet förbättras inte i samma proportion, dvs. segregationspotentialen förblir i alla fall relativt hög. I praktiken betyder det, att något tjällyft är möjligt, men strukturen håller på grund av dess bra beständighet.

Stabilisering med 10 % flygaska är tydligt för lite. Stabilisering med 20 % är det möjligt att få bra hållfasthet, men frys-tö- och frostbeständigheten är inte tillräckligt bra. I fall bindemedlet består endast av flygaska, bör mängden av flygaska vara närmare 30 %. Flygaskans långsiktiga härdning kan förbättra materialets egenskaper under en längre tid. I detta skede är det svårt att bedöma om den stegvisa försämringen av materialets egenskaper, orsakade av klimat- och trafikbelastningar, är större eller mindre än den förbättring av materialets egenskaper som orsakas av den långsiktiga härdningsprocessen.

Projektets resultat är dock positiva och visar, att en större tillsatsmängd av flygaska resulterar i en tillräckligt lyckad stabilisering av grusmaterial. Marginalerna till att beständigheten är tillräcklig är dock små och det finns inga erfarenheter för att avgöra, om den är tillräcklig om flygaskan läggs ut under ogynnsamma förhållanden. En

cement- eller cement+Merit –tillsats skulle öka tryggheten i att uppnå en tillräcklig beständighet.

5 Rekommendationer och användning

Projektets resultat indikerar att det finns stor potential att nyttja flygaska som bindemedel i vägbyggandet. Projektets undersökningsprogram i laboratoriet var tämligen begränsat med tanke på antalet möjliga flygaskor redovisade i FACE-projektet [1] och deras bedömda potential som bindemedel. Nästa steg borde vara att utvidga bindemedelsundersökningen för att omfatta flera olika flygaskor samt olika stabiliserings uppgifter. Det finns en stor potential att utveckla användningen av flygaskor i Sverige.

Finska erfarenheter visar att tillsats av cement eller andra bindemedel kan höja flygaskans hållfasthet samt frostbeständighet. De finska flygaskorna som har undersökts är av en annan typ än de flygaskor som har undersökts i denna undersökning. Vid renoveringen av Ehnsjövägen, en skogsbilväg, nyttjades flygaska utan bindemedelstillsats. Vägrenoveringsarbetet påbörjades hösten 2004. Den Värmeforskfinansierade uppföljningen avslutas sommaren 2005, medan Hallsta Pappersbruk kommer att fortsätta uppföljningsarbetet med avseende på miljötekniska parametrar under ca tre års tid.

Inblandnings- och stabiliseringssystemets effektivitet varierar i fullskaleprojektet i Hallstavik, vilket har med stor sannolikhet påverkat stabiliseringens homogenitet samt härdning. I Finland har man fått bra och relativt jämna resultat med hjälp av fräsinblandningssystemet, där bindemedlet fräsas djupt (200 – 300 mm) in i en vägs ytskikt. I de fall bindemedlet innehåller en aktivator (t.ex. cement), måste inblandning av bindemedlet ske separat. Bindemedlets kvalitativa homogenitet är särskilt avgörande med hänsyn till stabiliseringens kvalitet. Givetvis är även grusmaterialets kvalitet av betydelse för resultaten.

Under hösten 2005 kommer skog att avverkas och köras ut genom Ehnsjövägen. Efter detta kan en utvärdering göras av lämpligheten av Hallsta Pappersbruks flygaska som stabiliseringsmedel utan bindemedel. Hallsta Pappersbruk kommer också att följa upp hur flygaskan i vägmaterialet kommer att påverka grund- och ytvattnet i omgivningen.

6 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Flygaskor, som produceras av Sveriges skogsindustri, har särskilt bra egenskaper för att kunna nyttjas som bindemedel vid stabilisering av grusmaterial. Som bindemedel är dessa askors värde betydligt högre än när flygaskor nyttjas i bulk i andra vägbyggnadstillämpningar. Behovet av bindemedel är dock relativt litet för ett vägbyggnadsprojekt (normalt mindre än 20 % av ett skikt i väggkonstruktionen), å andra sidan är det mer ekonomiskt att transportera bindemedelsmaterial över relativt långa avstånd, dvs. transportavståndet motsvarar det som kalk och cement har. Det ekonomiska transportavståndet för flygaska i applikationer där stora mängder nyttjas i överbyggnads- och fyllnadsmaterial är ganska litet, uppskattningsvis 50 - 100 km.

Det lönar sig att utvidga flygaskans användning som bindemedel till flera olika områden. Särskilt viktig betydelse har följande områden:

- Stabilisering av äldre vägbyggnader
- Stabilisering av nya anläggningar, t.ex. nya typer av väg- och fältbyggnader
- Återvinning och användning av överskottsmassor genom stabilisering
- Stabilisering av förorenad jord
- Djup- och massstabilisering av mjuka jordmassor (t.ex. torv, gyttja, lera)
- Återvinning och användning av muddringsmassor genom stabilisering

Fortsättningen av forskningsarbetet skulle sikta sig till att utveckla olika bindemedelsinblandningar (produkter, recept) för olika tillämpningsområden. Askorna för detta utvecklingsarbete kunde väljas emellan de askorna, som har undersökts under tidigare Värmeforsk projekt och som tycks vara de mest potentiella som bindemedel p.g.a. deras årlig uppkomst och deras egenskaper. Det fortsatta arbetet kunde innebära följande steg:

1. Val av flygaskor t.ex. enligt resultat av Q4-107 [1]. Karakteriseringstester på dessa flygaskor.
2. Utveckling av recept för olika användningsområde (se ovan) på grund av geotekniska och miljökriterier.
3. Prov- / pilotbyggandet för olika användningsområde
4. Uppföljning av byggnader och datainsamling (geoteknisk, miljö, ekonomisk)
5. Utvecklingen av logistiska och kvalitetsförsäkrings system för att stöda användningen
6. Utarbetning av produktblad samt vägledning

7 Litteraturreferenser

- [1] Mácsik, Josef, Lenströmer, Stina och Nilsson, Thomas 2004. Flygaska i geotekniska anläggningar. Etapp 1: Inventering/ Tillämplighet. FACE / Q4-107. Värmeforsk Service AB. 2004.
- [2] Lahtinen, Pentti 2001. Fly Ash Mixtures as Flexible Structural Materials for Low-Volume Roads (*Flygaskablandningar som flexibel konstruktions material för mindervärdiga vägar*). Doctoral thesis for Helsinki University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering. Finnra Reports 70/2001. Finnish Road Administration. 95 p + annexes 55 p. ISBN 951-726-826-2.
- [3] Sorvari, Jaana 2000. Ympäristökriteerit mineraalisten teollisuusjätteiden käytölle maarakentamisessa (Miljökriterier för användningen av mineraliska industriavfall i jordbyggandet). Suomen ympäristö 421/2000. Suomen ympäristökeskus. Förslag till finska riktvärden.
- [4] 2003/33/EC. Commission of European Communities 2003. Criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 and Annex II of Council Directive 1999/31/EC on the landfill of waste. Brussels. *Kommissions beslut på kriterier och procedurer för accepteringen av avfall i deponier*.
- [5] Konrad, J-M. 1980. Frost Heave Mechanics. Ph. D. thesis. University of Alberta, U.S.A.
- [6] Saarelainen, S. 1995. Modelling frost heaving and frost penetration at some observation sites in Finland. The SSR model. VTT Publications 95
- [7] Haavikko, H. 2000. Sorateiden uusien perusparannusteknologioiden taloudellisuus (Ekonomi av de nya renoveringsmetoder av grusvägar). Examensarbete vid byggnadsekonomi. Tampere Tekniska Universitetet, Byggnadsteknisk avdelning.

Bilagor

A Undersökningsmetoder

De geotekniska undersökningarna utfördes i Ramboll Finlands geotekniska laboratoriet 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. Vid behov har testerna modifierats för att undersöka alternativa material, t.ex. askor.

Vattenkvot bestämdes genom att torka en viss mängd av material (m) vid 105°C. Vattenkvoten $w = m_w/m$, där m_w = vattnets vikt. Torrsubstansens vikt är m_d .

Glödningsförlust(LOI) (%) bestämdes vid 800°C i en timme. Här glödgas bort allt organiskt material samt andra ämnen, liksom t.ex. karbonater. Dessa resultat kan inte översättas som organisk innehåll (som skulle bestämmas vid 500 °C). Om askorna utsatts för fukt så anger LOI även kemiskt bundet vatte; t.ex. avgår vatten från kolhydrat vid 440 °C.

Kornstorlek är en viktig geoteknisk parameter hos byggnadsmaterial. Kornstorleksfördelningen bestämdes med hjälp av siktning och sedimentationsanalys. Resultat (andelen av olika kornstorlekar i materialet) presenteras med hjälp av kornstorleksfördelningskurva på respektive material.

pH är en kontrolltest på materialen. Askans pH är normalt ganska hög (10-12).

Halten av den aktiva CaO i flygaskan bestäms enligt standarden SFS 5188 (Osläckt kalk och släckt kalk. Aktiv kalk). Den indikerar flygaskans förmåga till härdning (ofta: ju större är halten av aktiv kalk i askan desto större blir tryckhållfastheten) samt stabiliseringsaktivitet, dvs. förmåga att själv fungera som stabiliseringsmedel.

Portal och specifik yta av flygaskan bestämdes också. Portalet är volym porer genom volym fast. Portalet har beräknats genom att nyttja materialets torrdensitet och kompaktdensitet. Torrdensitet bestämdes enligt GLO-85 (ett finskt generellt geotekniskt system) och kompaktdensitet bestämdes med pyknometern. Specifika ytan bestämdes enligt Blaine metoden.

Vid proctorpackning bestäms materialets maximala torrdensitet ($\rho_{d(max)}$) och dess optimala vattenkvot (w_{opt}). Principen för Proctormetoden är att materialet packas med hjälp av en fallvikt (25 slag/lager), i fem lager i en stålcyllinder. Proctorpackningen görs vid olika vattenkvoter, och resultaten från de olika packningsförsöken ritas in i ett diagram med torrdensitet på y-axeln och vattenkvot på x-axeln. Vid den optimala vattenkvoten packas materialet så att torrdensiteten får sitt maximala värde. I praktiken används den maximala torrdensiteten och den optimala vattenkvoten som referensvärde, men det mest effektiva packningsresultatet fås genom att packas under en lite högre vattenkvot än den optimala vattenkvoten. Denna princip följs också i laboratoriet vid provkroppstillverkning.

Packningstesten görs för att kontrollera packningseffekten vid olika arbetsmängder och för det praktiska packningsarbetet. Packningen kan göras t.ex. vid en viss vattenkvot med 10 och 14 slag per lager, och resulterande torrdensiteten jämförs med den maximala torrdensiteten. Resulten är s.k. packningsgrad D (%); t.ex. $D=90$ % tyder, att resulterande torrdensitet är 90 % av den maximala torrdensiteten. I laboratoriet görs de själva provstycken vid en arbetsmängd som motsvarar den praktiskt möjliga packningsgraden, t.ex. $D=93$ %.

Tryckhållfastheten bestämdes med enaxliga tryckförsök på laboratorietillverkade provstycken, som hade låtits härda under 28 dygn.

Följande belastningstester gjordes för det mesta efter en 28 dygns härdning, men i några fall också efter 90 dygns härdning:

- Frys-töförsök. Mätning av materialets tryckhållfasthet efter tolv frys- och töcykler ger indikation om materialets beständighet mot frost. Försöket utförs genom att tillverkade provkroppar läggs (inom en plaströr) vid rumstemperaturen på en kapillarmatta genom vilken provet kan absorbera vatten. Efter fyra timmar läggs provet in i en frys (temperaturen är -18°C). Provet lämnas här under 8 – 16 timmar. Därefter vänds provet upp och ner (180°) och läggs åter på kapillarmattan för att smälta vid rumstemperatur under ett halvt dygn. Därefter startas frysningen igen. Frys- och töcykeln upprepas tolv gånger. Under testet kontrolleras provets skick okulärt. Efter tolv frys- och töcykel bestäms provets tryckhållfasthet (1-axial).
- Tjällyftsförsök är ett speciellt test för att simulera och bestämma ett materials uppförande under frostpåverkan. Testresultat omfattar materialets tjällyftpotential, och man kan också kalkylera segregationspotential, SPo [$\text{mm}^2/\text{h}^*\text{K}$], som indikerar materialets tjälkänslighet. För detta test har Ramboll Finland ett speciellt mätningssystem, där provet först vattenmätas, sedan sätts vattenytan ner (0,5 – 1 cm över provkroppets bottom) och provet fryses på övre sidan (-3°C) medan den undre sidan hålls ofrusen. Medan provet vattenmätas belastas det med 20 kPa, men annars är belastningen 3 kPa. Olika parameter, t.ex. tjällyft, segregationspotential, tjäldjupet och temperatur av provkroppet, kontrolleras och kalkyleras under testen, och data lagras i minnet av en datamaskin. Efter försöket kan också provets frostbeständighet bestämmas med hjälp av tryckhållfasthetstesten (resultat jämförs med tryckhållfastheten före tjällyftstesten).

Segregationspotential SPo är tjälbildningskoefficient, som bestäms med hjälp av tjälningshastigheten och temperaturgradienten, som påverkar vid gränsen av frostdjup. Med andra ord är segregationspotentialen ett mått för tjällyftsstyrka. Ovannämnda parametrar kan bestämmas med hjälp av tillbakakalkylering på grund av uppföljningsresultat eller med tjällyftsförsöket. SPo kan kalkyleras t.ex. med formeln $SPo = [50 \cdot h / (10 \cdot \sqrt{F - z_0})] - 1,8$ [6], där

h = tjällyft (mm), F = frostmängd ($\text{K} \cdot \text{h}$), z_0 = överbyggnadens tjocklek (mm)

Enligt [5] and [2] blir SPo

$< 0,18$ för icke-tjälkänsligt material

0,18 – 0,72	för föga tjälkänsligt material
0,72 – 3,6	för tjälkänsligt material
> 3,6	för mycket tjälkänsligt material

Miljöpåverkan av ett fiberaska-stabiliserat grus behövs för det eventuella tillståndet för (prov-) byggandet från miljömyndigheterna, men också för att bestämma materialets möjliga miljörisker och övervakningsbehovet. Miljöpåverkan testades genom att bestämma den oorganiska totalhalten av komponenter (grusmaterialet samt det stabiliserade grusmaterialet), och med lakningsförsök på de samma. Lakningsförsök var kolonntest enligt NEN 7343.

B Miljötestresultat (tabell)

Ämne	Lakning [mg/kg]; L/S 10				Totalhalt [mg/kg]		Riktvärden [mg/kg] (Sorvari 2000) Lakning L/S 10		2003/33/EC DECISION ON ACCEPTANCE OF WASTE IN LANDFILLS ...		Riktvärden [mg/kg] (Sorvari 2000) Totalhalt	
	ostabiliserat G16		G16 + 20 % FA		G16	FA	Obelagd byggnad	Belagd byggnad	Inert avfall: L/S 2 ; L/S 10	Icke-farligt avfall: L/S 2 ; L/S 11	Målvärde (rent jord)	Gränsvärde (förorenat jord)
	min*	max	min*	max								
Ag		0,0003		0,0004	0,07	0,64						
Al		30,1949		27,3860	5620	73100						
As		0,0039		0,0036	1,93	6,66	0,14	0,75	0,1 ; 0,5	0,4 ; 2	4	60
B		0,1191	0,0301	0,0329	5,00	153					5	50
Ba	1,3903	1,4000		2,5724	23,1	347	10,0	28,0	7 ; 20	30 ; 100	600	600
Be	0,0000	0,0010	0,0000	0,0011	0,34	1,78					1	10
Bi	0,0001	0,0002	0,0001	0,0002	0,18	5,93						
Ca	1274,3426	1274,3426		1977,0512	15100	201000						
Cd	0,0002	0,0003	0,0004	0,0005	0,13	1,19	0,011	0,015	0,03 ; 0,04	0,6 ; 1	0,15	10
Co		0,0023	0,0087	0,0087	3,80	4,35	1,1	2,5			50	200
Cr		0,0074	0,0184	0,0191	8,39	57,5	2,00	5,10	0,2 ; 0,5	4 ; 10	37	500
Cu		0,3027		0,9893	12,7	307	1,10	2,00	0,9 ; 2	25 ; 50	18	400
Fe	0,6687	0,7638	0,3191	0,5322	11000	15400						
K		39,0079		97,6568	1300	7050						
Li		0,1327		0,4439	8,77	82,9						
Mg	2,7031	3,0202	1,0734	1,7835	2790	8520						
Mn		0,0215		0,0077	248	1090						
Mo		0,1207		0,1878	0,29	3,54	0,31	0,50	0,3 ; 0,5	5 ; 10	5	200
Na		34,6508		153,6729	86	6400						
Ni		0,0165		0,0872	5,23	27,9	1,20	2,10	0,2 ; 0,4	5 ; 10	19	300
Pb		0,0070		0,0058	19,1	23,8	1	1,8	0,2 ; 0,5	5 ; 10	15	300
Rb		0,1346		0,3771	14,4	122						
Sb		0,0011		0,0013	0,02	0,02	0,12	0,4	0,02 ; 0,06	0,2 ; 0,7	5	40
Se	0,0021	0,0055	0,0023	0,0074	0,50	0,61	0,06	0,098	0,06 ; 0,1	0,3 ; 0,5	1	10
Si		28,3389		14,8068	139	188						
Sr		6,9807		15,0992	17,2	471						
Th	0,0003	0,0004	0,0002	0,0003	7,58	8,88						
Tl	0,0001	0,0002	0,0004	0,0004	0,14	0,67						
U	0,0080	0,0081	0,0020	0,0021	1,10	3,37						
V		0,0047	0,0016	0,0016	15,2	16,3	2,2	10,0			50	500
Zn		0,0408		0,0158	63,4	224	1,5	2,7	2 ; 4	25 ; 50	23	700
S		14,3888		10,0807	70	13100						
P	0,0032	0,1013	0,0735	0,1414	338	3590						

OBS*

min. = alla eller en del av analysresultat varit under bestämningsgränsen (ICP); i så fall dessa resultat är minst = null

max = i förra fall har resultat givits på bestämningsgränsen

i fall min. värdet ~ max. värdet, har endast ett par av resultat varit under bestämningsgränsen, för det mesta L/S 5 ... 10

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 ENERGI MYNDIGHET

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