

Produkter baserade på blandningar av flygaska och fiberslam (fiberaskor) för vägbyggande

Pentti Lahtinen, Aino Maijala och Josef Mácsik

**Produkter baserade på blandningar av flygaska
och fiberslam (fiberaskor) för vägbyggande**

**Products based on the mixes of fly ashes and fibre
sludge (fibre-ashes) for road construction**

Pentti Lahtinen, Aino Maijala och Josef Mácsik

Q4-228

VÄRMEFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM · Tel 08-677 25 80
Mars 2005
ISSN 0282-3772

Förord

Pentti Lahtinens doktorsarbete "Fly Ash Mixtures as Flexible Structural Materials for Low-volume Roads" är grundläggande för att visa, att vägmateriel med flygaskor som bas kan ge vägar hög tältålighet och styvhet och ingen påvisbar miljöpåverkan på omgivningen (flygaskor, som ej är farligt avfall). Han visar även att totalkostnaderna för vägar under hela deras livslängd blir låga med denna typ av material.

I arbetet framför Lahtinen en tes att den totala vägtjockleken skulle kunna minskas till hälften. Mina beräkningar med ett förstärkningslager på 20 cm och en skrymdensitet på flygaskan på 1,1 t/m³ ger att flygaskan ersätter naturmaterial åtminstone upp till 7 gånger sin vikt (alla flygaskor ger dock inte denna låga volymvikt).

Lahtinen framhåller att de bästa tekniska och miljömässiga egenskaperna erhålls, om flygaska blandas med ca 5-6 % bindemedel, varav minst 50 % cement, jämte med kaolinhaltigt fiberslam från pappersindustrin.

Andra arbeten inom och utom askprogrammet påvisar, att även flygaskor utan bindemedel m.m. ger miljösäkra, stabila och tältåliga vägar. Flygaskor kan gärna blandas med grus och sannolikt även med bottenaskor för att snabbt ge körbara vägar/ytor med hög bärighet.

Doktorsarbetet påvisade att det finns indikationer på att tesen kan uppfyllas. Som jämförelse anser jag att man hittills "bara" kan räkna med att enbart flygaska kan ersätta naturmaterial upp till 4 ggr sin vikt och samtidigt ge ökad styvhet och tältålighet.

Detta projekt är ett led i att visa att flygaska blandat med fiberslam och bindemedel har utomordentliga egenskaper vid byggande av vägar.

Jag ser fram emot att Lahtinen m.fl. i slutändan kan visa att flygaska blandat med fiberslam och bindemedel kan ersätta naturmaterial åtminstone upp till 7 ggr sin egen vikt och samtidigt ge en styvare och mer tältålig konstruktion.

Claes Ribbing

Programansvarig
Värmeforsk Service AB

Abstract

Flygaskor från bibränsle och kaolinhaltig fiberslam från pappersproduktion samt deras blandningar (s.k. fiberaskor) har karakteriserats med avseende på geotekniska och miljöparametrar. Undersökningen indikerar att fiberaskor med eller utan tilläggsbindemedel är lämpliga för olika vägbyggnadskonstruktioner. Lämpligheten måste dock visas genom fälttester och provbyggandet.

Sammanfattning

Projektet nyttiggör tidigare finsk forskning och erfarenheter från fiberaskor i geotekniska anläggningar. Projektet har använt flygaskor med samma ursprung som de i Värmeforsks rapport 870: FACE; Flygaska i geotekniska anläggningar, etapp 1.

Projektets syfte var att utveckla konstruktionsmaterial baserade på blandningar av fiberslam och flygaska för geotekniska anläggningar och en slutlig produktifiering av ”fiberaskan”. Blandningarna är baserade på flygaskor från energiproducenter (biobränsle) och kaolinhaltigt fiberslam från pappersindustrin. Med hjälp av laboratorietester har projektet sökt efter fiberaskor med god teknisk funktion bl.a. låg tjälkänslighet, goda bärighetsvärden och deformationsegenskaper i geotekniska anläggningar. Projektresultat ger ökad kunskap till alternativa vägbyggnadsmaterial för att kunna bygga tekniskt bra, hållbara och miljövänliga vägar och andra byggnadskonstruktioner för lägre kostnader än konventionella anläggningars kostnader, inklusive underhållskostnader. Laboratorieresultaten har visat, att detta bör vara möjligt att uppnå, men detta måste dock verifieras med hjälp av fälttester, provbygganden och uppföljning i fält.

I projektets första etapp utfördes en inventering där lämpliga fiberslam och flygaskor valdes ut. Undersökningen genomfördes i det geotekniska laboratoriet av Ramboll Finland Oy (f.d. SCC Viatek Oy, SGT – som senare i rapporten kallas SGT). Efter att allt provmaterial hade mottagits i laboratoriet, startades flera stegs undersökningsprogram för att söka efter optimala fiberaskablandningar med och/eller utan aktiveringsmedel. Aktiveringsmedlen i projektet var byggcement, Merit 5000 och osläcktkalk. De mest potentiella blandningarna undersöktes med avseende på långsiktiga geotekniska egenskaper (för det mesta beständighet mot klimatisk belastning) och miljöegenskaper.

Projektet har resulterat i att flera tekniskt, miljömässigt samt ekonomiskt potentiella fiberaskablandningar har kunnat tas fram med förslag på vidareutveckling, dvs. fälttester och provbyggande. De mest uppenbara fördelarna med fiberaskor som byggnadsmaterial är deras elasticitet och deformationsbeständighet, som ökar konstruktionens hållbarhet mot tjällyft och sättningar avsevärt jämfört med traditionella material. Därtill är fiberaskorna praktiskt taget dammfria material, som medför att fiberaskornas tillverkning och utförande i byggandet är enklare att hantera än enbart flygaska. Denna undersökning och dess resultat skall vara ett underlag för fortsättningen av undersökningar, för en handbok för t.ex. vägbyggandet med fiberaskor, och produktifieringen.

Nyckelord

Flygaska, fiberslam, alternativa material, jord, väg, byggande

Summary

The project has derived benefits from the earlier Finnish research and development as well as from the experience in the fibre-ash materials for geotechnical applications. The fly ashes used for the project have been taken from the same sources as the fly ashes for the earlier Värmeforsk project 870: FACE.

The project's objective was to develop construction materials based on mixtures of fibre sludge and fly ash for geotechnical applications, and for the final commercialisation of the fibre-ash materials. The mixtures are based on fly ashes from energy production (bark, peat and sludge used for incineration) and on kaolin containing fibre sludge from the paper industry. With help of laboratory tests the project has been searching for fibre-ashes with excellent technical characteristics like good frost resistance combined with a good bearing capacity and resilience in geotechnical structures. The project's results has given additional knowledge about alternative road construction materials to construct technically good, sustainable and environmentally friendly roads and other constructions with lower costs than the conventional constructions. The results of laboratory tests have shown that this is possible. However, it has to be verified with help of field tests and pilot constructions.

The first tasks of the project were to make choices of the appropriate fibre sludge and fly ashes for the project targets. The laboratory tests have been carried out in the geotechnical laboratory of Ramboll Finland Oy (earlier SCC Viatek Oy, SGT - later in the report SGT). After arrival of all test material in the laboratory the test programme started in order to find out the most optimal fibre-ash mixtures with or without any activator. The most potential mixtures were tested for their geotechnical long-term properties (mainly resistance against climatic load) and for their environmental risk potential.

The results comprise of several technically, environmentally and economically potential fibre-ash mixtures and recommendations for their further development with the help of field tests and test construction. The most noteworthy benefits of the fibre ashes as soil construction materials are their elasticity and resistance against permanent deformation. These properties make the fibre-ash materials significantly more frost resistant than the conventional materials. Also, the fibre-ashes are easier and simpler to use in the construction process than the fly ashes because the fibre-ashes are practically dust-tight materials. The results of the project will be background information for the further studies, and for the guidelines and commercialisation of e.g. road construction with fibre-ashes.

Keywords:

Fly ashes, fibre sludge, by-products, soil, road, construction

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	FORSKNINGSUPPGIFTEN	1
1.3	RESULTAT	1
2	UNDERSÖKNINGSPROGRAMMET	3
3	INVENTERING OCH PROVTAGNING AV KOMPONENTER	7
3.1	VAL AV KOMPONENTER	7
3.2	EXPORTTILLSTÅND	8
3.3	PROVTAGNING	9
4	KARAKTERISERING AV KOMPONENTER	10
4.1	KARAKTERISERING AV FLYGASKORNA	10
4.2	PORTAL OCH SPECIFIC YTA AV FLYGASKORNA	12
4.3	KARAKTERISERING AV FIBERLERA	13
5	SAMMANBLANDNINGSPROJEKT	14
6	GEOTEKNISKA STABILISERINGSUNDERSÖKNINGAR	17
7	GEOTEKNISKA KONTROLLTESTER	21
8	MILJÖTESTER AV FIBERASKABLANDNINGAR	23
8.1	TOTALHALTEN	23
8.2	LAKNING	25
9	RESULTATANALYS	31
10	FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE	33
11	SLUTSATSER	34
12	LITTERATURREFERENSER	35

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Fiberslam är en biprodukt från papperstillverkning och består för det mesta av fiber och kaolin (och kallas också fiberslam eller ”fiberlera”). Utvecklingen av produkter baserade på fiberslam och blandningar av fiberslam och flygaska (fiberaska) startade redan i början av 1990-talet i Ramboll Finland Oys (f.d. SCC Viatek Oy) geotekniska laboratorium i Luopioinen. De första konstruktionerna med fiberaska byggdes 1996, baserat på erhållna resultat. Uppföljningsarbeten som omfattar teknik och miljö pågår fortfarande. Det kan sägas att samtliga prov- och pilotkonstruktioner var lyckade och själva teknologin har visat sig vara konkurrensduglig med hänsyn till teknik, miljö och kostnader.

1.2 Forskningsuppgiften

Målsättningen med projektet var att utveckla nya produkter (fiberaskor) för vägbyggnadsändamål. Dessa mål skulle uppnås genom följande:

- Inventering och karakterisering av fiberslam och flygaskor som är lämpliga för att tillverka produkter för vägkonstruktioner när de blandas ihop
- Identifiering av optimala blandningar (fiberaskor), och undersökningen av beständighet och miljömässiga egenskaper hos de alternativen som ger bäst resultat. Här undersöktes fiberaskor med och utan tillägsbindemedel i laboratoriemiljö. Dessa undersökningar inkluderade också miljötester på komponenter och blandningar.
- Förslag till fortsättningen, t.ex. provbyggandet och vilka materialen, som skulle testas vid provbyggandet, samt underlagsmaterial för en potentiell ”Vägledning för byggande med flygaskor och blandningar med flygaskor”

Ramböll Sverige Ab (f.d. Scandiaconsult Sverige Ab) i Sundsvall tillsammans med producenter har varit ansvariga för provtagning och provmaterials leverans till Finland. Ramböll Sverige, närmare Josef Mácsik, har också medverkat vid redovisning av resultat och rapportering. Själva undersökningarna har utförts i Ramboll Finland Oy: s FoU-laboratoriet SGT i Finland. Projektkoordinator har varit Pentti Lahtinen, Harri Jyrävä har varit ansvarig för laboratorieundersökningarna och –tester, och Aino Majjala har varit ansvarig för administrationen, redovisning av resultat och rapportering.

1.3 Resultat

Projektets resultat innebär flera tekniskt, miljömässigt och ekonomiskt potentiella fiberaskablandningar och förslag till vidareutveckling, dvs. fälttester och provbyggande.

De mest uppenbara fördelar av fiberaskor som byggnadsmaterial är deras elasticitet och deformationsbeständighet, som ökar deras hållbarhet mot tjällyft och sättningar avsevärt jämfört med traditionella material. Därtill är fiberaskorna mindre stoftartade material än flygaskor, som medför att fiberaskornas tillverkning och utförande i byggandet är enklare att hantera än enbart flygaska.

Detta undersökningsprojekt och dess resultat skall vara ett underlag för fortsättningen av undersökningar, t.ex. provbyggandet, och produktifieringen.

2 Undersökningsprogrammet

I projektet användes fyra olika flygaskor (val av askorna i projektet Q4-107, steg 2) och fyra fiberslam från olika producenter. Av de fyra fiberslammaterialen gjordes ett samlingsprov som homogeniserades. Därefter tillsattes flygaskorna, dvs. det var fyra olika provblandningar som undersöktes. Undersökningen och utvecklingen av fiberaskor har pågått enligt följande program (Tabell 1):

Tabell 1: Översikt på undersökningsprogrammet / Overview of the research programme

Steg	Innehåll och tester
Val och leverans av provmaterial	Stegets innehåll var följande: val av producenter och deras material, ansökan av exporttillstånd, provtagning samt transport av provmaterial till Finland. Provmaterialet (komponenter) omfattade både flygaskor och fiberlera (kaolinhaltigt fiberslam), vars inblandningar heter fiberaskor.
Karakteriseringen av komponenter	Fiberlera: Vattenkvot, glödningsförlust, pH. Enligt resultat blandades en homogen blandning eller samlingsprov av fiberleror – motsvarande parameter av denna blandning bestämdes också. Samlingsprovet användes för undersökningarna under nästa steg. Flygaska: Vattenkvot, glödningsförlust, pH, kornstorleksfördelning, halt av CaO(aktiv). Speciellt för begäran av Svenska Energiaskor bestämdes också specifik yta och portal.
Sammanblandningsoptimering	Baserat på resultat från karakteriseringssteget fortsatte undersökningen med ett homogeniserat samlingsprov på fiberleran, som blandades sedan med fyra olika flygaskor i förhållandena 1:2, 1:1 och 2:1 (tillsammans tolv fiberaskablandningar). Packningsegenskaper bestämdes på dessa fiberaskablandningar med Proctor- och packningstester. Baserat på dessa resultat valdes en fiberaskablandning för alla fyra askor (tillsammans fyra blandningar) för fortsättningen. Fortsatta tester på dessa fyra fiberaskablandningar omfattade bestämning av följande parametrar: <ul style="list-style-type: none"> - tryckhållfastheten efter 28 dygns härdning - hydraulisk konduktivitet (permeabilitet) efter 28 dygns härdning - tryckhållfasthet efter permeabilitetstesten (bedömning av beständigheten mot vattengenomströmning).
Stabiliseringsundersökningar (blandningsrecepten)	Bestämning av bindemedeltyp: Testerna gjordes på ovannämnda fyra fiberaskablandningar inblandade med några möjliga bindemedelstyper. På ett par blandningar gjordes proctortest för att kontrollera packningsegenskaperna. Efter 28 dygns härdning bestämdes följande parameter på dessa olika blandningar eller i vissa fall på en del av dessa blandningar: tryckhållfasthet, och hur tryckhållfastheten påverkas av frysning-tiningscykler, vattenmättning, tjällyft samt materialens permeabilitet. <u>Miljöpåverkan</u> testades genom att bestämma den oorganiska totalhalten av komponenter (4 askor samt fiberlerablandningen), TOC av fiberleran och med lakningstester på en del av stabiliserade/ostabiliserade blandningar. Lakningstester var kolonntesten enligt NEN 7343 och skakningstesten enligt EN 12457-02.
Kontrolltester	En fiberaskablandning valdes till slut för kompletterande tester som omfattade följande tester: Fiberaskablandningen stabiliserades med ett par olika mängder av ett visst bindemedel och på dessa bestämdes följande geotekniska parameter efter 28 dygns härdning: tryckhållfastheten och påverkan av frysning-tiningscykler och permeabilitet på tryckhållfastheten. På en av ovannämnda varianter bestämdes också hållfasthetsutvecklingen under en längre tid: Tryckhållfastheten bestämdes efter 0, 7, 14, 28, 45, 60 och 90 dygns härdning.

De geotekniska undersökningarna utfördes i SGT 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.

Karakterisering av komponenter gällde tester på flygaskornas och fiberlerornas grundläggande geotekniska egenskaper och därmed deras överhuvudtaget lämplighet för vägbygget.

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

Glödningsförlust, LoI (%) bestämdes vid 800°C i en timme. Här glödgas allt organiskt material samt andra ämnen, liksom t.ex. karbonater, bort. Dessa resultat kan inte översättas som organisk innehåll.

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 för respektive material. Kornstorleksfördelningskurva kunde tas fram för flygaskorna, som består av partiklar i silt- till sandfraktion. Testen kan göras på flygaskorna, som för det mesta tycks vara silt typer. Fiberlera består av lerpartiklar och fibrer, vilket omöjliggjorde granulometrisk bestämning.

pH är en kontrolltest på materialen. Askans pH är normalt ganska hög (10-12) och fiberlerans pH faller inom det neutrala området (6-8).

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 halten av aktiv kalk är i askan desto större blir tryckhållfastheten) samt stabiliseringsaktivitet, dvs. förmåga att själv fungera som stabiliseringsmedel. Oftast en hög CaO(akt) halt gör flygaskan lite svår att behandla under byggnadsprocessen: tillägg av vatten behövs för att transportera och utlägga askan på vägsektionen, men tillägg av vatten startar aktiva potsolana reaktioner i askan och den blir snart hård och svår att behandla.

Portal och specifik yta av askorna har också bestämts, se 4.2. Portal har räknats genom att nyttja materialets torrdensitet och kompaktensitet. Torrdensitet bestämdes enligt GLO-85 (ett finskt generellt geotekniskt system) och kompaktensitet bestämdes med pyknometern. Portalen bestämdes enligt Blaine metoden.

Recept behövs för att bestämma och optimera den geotekniskt bästa möjliga relationen av en viss flygaska med en viss fiberlera (här det homogeniserade fiberlerasamlingsprovet) i förhållandet med allmänna krav för vägbyggnadsmaterial för grusvägar. Packningsegenskap, tryckhållfasthet efter 28 dygns härdning, samt tilläggstester (exempelvis hydraulisk konduktivitet och vattengenomträngningsbeständighet) kan ge indikationer om den optimala blandningen. Dessa resultat berättar också, om ett visst ändamål (liksom en bärlager för en väg) behöver mera stabilisering dvs. tillägg av något bindemedel.

Vid proctorpackning bestämdes 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 stålcylander. 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 vägmaterialet så att torrdensiteten får sitt maximala värde. Dessa parametrar kan bestämmas för flygaskan, men proctorkurvan blir inte tydlig för fiberleror och för fiberaskor. 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. Här görs packningen vid en viss vattenkvot med t.ex. 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.

Permeabilitet eller hydraulisk konduktivitet togs fram med hjälp av med ”flexible wall” permeameter enligt NT Technical report 254/1994 på laboratorietillverkade provstycken efter 28 dygns härdning. Efter permeabilitetstesten bestämdes tryckhållfastheten hos dessa provstycken. Resultaten ger en indikation om effekten av vattenträngning genom materialet på materialets hållfasthet (”vattengenomträngningsbeständighet”).

De geotekniska stabiliseringsundersökningarna omfattade vidare belastningstester för blandningarnas egenskaper och användningsmöjligheter utan eller med bindemedelstillägget. Med detsamma kan man se de effekter, som olika typer av bindemedel har på blandningar. Provstyckena gjordes med samma principer, som har beskrivits ovan. Följande belastningstester, som inte har beskrivits ovan, gjordes också efter en 28 dygns härdning.

Frysning-tiningstest (eller ”frys-tö-” / frysning-smältningstest). Mätning av materialets tryckhållfasthet efter tolv frys- och tiningscyklar ger indikation om materialets beständighet mot frysning och tining. Försöket utförs genom att tillverkade provkroppar läggs (inom en plaströr) vid rumstemperaturen på en kapillärmatta 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 tiningscykeln upprepas tolv gånger. Under testet kontrolleras provets skick okulärt. Efter tolv frys- och tiningscyklar bestäms provets tryckhållfasthet (1-axial).

Vattenbeständigheten utförs för att bestämma ett materials beständighet mot mättnings/impregnering av vatten. Under detta försök förvaras provet under vattenytan (i en behållare fylld med vatten) i sju dagar. Provet kontrolleras okulärt under försöket. Efter sju dagar bestäms provets tryckhållfasthet.

Frostbeständighetstest är ett speciellt test för att simulera och bestämma ett materials uppförande under frostpåverkan. Testresultat omfattar materialets tjällyftpotential, och man kan också kalkylera segregationspotential, SP_o [$\text{mm}^2/\text{h}\cdot\text{K}$], som indikerar materialets tjällyftningsbenägenhet. För detta test har t.ex. SGT konstruerat ett speciellt mätningssystem, där provet först vattenmätts, sedan sätts vattenytan ner (0,5 – 1 cm över provkroppets botten) och provet fryses på övre sidan (-3°C) medan den undre sidan hålls ofrusen. Medan provet vattenmätts 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 en datamaskins minne. Efter försöket bestäms också provets tryckhållfasthet.

Stabiliseringsundersökningarna kompletterades med kontrolltester på en bestämd fiberaskblandning. Kontrolltesterna gällde påverkan av bindemedelsmängden samt av härdningstiden på materialens hållfasthet och t.ex. frysning-tiningsbeständighet.

Miljöpåverkan av olika stabiliserade och ostabiliserade material behövs för eventuella tillstånd för (prov-) byggandet från miljömyndigheterna men också för att bestämma om materialens möjliga miljörisker och deras övervakningsbehov. Miljöpåverkan bedömdes genom resultaten av den oorganiska totalhalten av komponenter (4 askor samt fiberlerablandningen), TOC av fiberleran och med lakningstester på en del av stabiliserade/ostabiliserade blandningar. Lakningsförsök var kolonntest enligt NEN 7343 och skakningstest enligt EN 12457-02.

3 Inventering och provtagning av komponenter

3.1 Val av komponenter

Utvecklingen av nya produkter (fiberaskor) startades med att inventera och utreda de fiberslam och flygaskor, som skulle användas för utvecklingen. En del av askorna valdes enligt resultat av FACE (Q4-107): askorna från Stora Enso Fors, Holmen Papers Bravikens Pappersbruk, Mälarenergi AB i Västerås och Tekniska Verken i Linköping. Slutligen var följande provmaterial till förfogandet för undersökningarna:

Tabell 2: Provmaterial för undersökningarna / Materials for testing

PRODUCENT	FLYGASKA (FA)	FIBERLERA* (FL)
Stora Enso, Grycksbo bruk		x
Stora Enso, Fors bruk	x	x
Holmen Paper, Vargön Pappersbruk	x	x
Holmen Paper, Bravikens Pappersbruk	x	x
Mälarenergi AB, Västerås	x	
Tekniska Verken, Linköping	x	

*kaolin- och fiberhaltigt fiberslam

Instruktioner hade givits till producenter beträffande information och data för att identifiera provmaterial, t.ex.: tillgänglig information om bruk, hur restprodukten uppstår, vattenkvot, analyser, och speciellt om fiberleran: andelen av fiber vs. kaolin, och annat mineral. Informationen i tabeller (3) och (4) står till förfogandet (jämför också FACE / bakgrundsinformation om flygaskorna, tabell 2.1).

Tabell 3: Identifieringsinformation om fiberleror / Information about the fibre clays

Producent	Materialet
Stora Enso, Grycksbo bruk	Från tillverkningen av bestruket finpapper, vid rening av processavloppsvatten. Sammansättning: torrhalt 35-40 %, askhalt 50-60 %, krita c. 30 %, lera c. 30 %, permeabilitet $4,5 \times 10^{-10}$ m/s (L. Tanse 17.8.2004)
Stora Enso, Fors bruk	Primärslam (M. Carlsson 6.8.2004)
Vargöns Pappersbruk	Fiber c. 70 %, lera 30 %; leras fördelning: bentonit/kaolin 60/40 (S. Schrewelius 6.8.2004)
Bravikens Pappersbruk	Returpappersslam: Fiber c. 60 % och kaolin + krita c. 40 % (L. Dahlberg 23.8.2004)

Tabell 4: Identifieringsinformation om flygaskor / Information about the fly ashes

Producent	Bränsle	Panna	Materialet
Stora Enso, Fors bruk	Biobränsle (flis, bark, pellets, mindre blandslam)	CFB (Ahlström Pyroflow CFB), 56 MW	Torr, direkt ur asksilon (M. Carlsson 6.8.2004)
Vargöns Pappersbruk	Biobränsle: bio-flis, rt-flis, bark, papper, fiber-slam, och plast från tillverkningen	Snedrosterpanna	Torr flygaska direkt från asksilon (S. Schrewelius 6.8.2004)
Bravikens Pappersbruk	Biobränsle: bark, retur-pappersslam, RT-flis och annat återvunnet trämaterial	Kablitzrost, 66 MW	Färsk, torr flygaska (L. Dahlberg 23.8.2004)
Mälarenergi AB, Västerås	Spillprodukter från skogsavverkning (grenar, toppar)	CFB	Torr flygaska (data från FACE-rapporten)
Tekniska Verken, Linköping	50 vikt-% kol, 10 vikt-% trä, 40 vikt-% gummi	Vanderroster	Deponiaska: 25 vikt-% vatten tillsatts före transport till deponi. Askan producerades under vintersäsongen och prov togs ut på hösten (information från FACE-rapporten)

3.2 Exporttillstånd

På grund av flera lagrum, speciellt Rådets Förordning (EEG) nr 259/93 om övervakning och kontroll av avfallstransporter inom, till och från Europeiska gemenskapen, artikel 4 och 27, behövdes Naturvårdverkets tillstånd att exportera och Finlands miljöcentrales godkännande av den anmälda transporten av de ”avfall” som användes vid undersökningarna.

Ramböll Sverige AB fick tillstånd av Naturvårdsverket samt Finlands miljöcentral (21.8.2003 / SYKE-2003-K-107-K4) att exportera flygaskor och fiberlera från Sverige till Finland. Därefter startades insamling av flygaskor samt fiberleror från olika producenter.

Behov av exporttillståndet hade inte iakttagits i projektplaneringen. Enligt projektplanen skulle undersökningarna starta i början av juni 2003, men i själva verket startades de i slutet av september 2003 (efter allt material var till förfogandet). Exporttillståndsprocessen och materialleveranser tog nästan fyra månader, och starten av undersökningarna fördröjdes i samma mån.

3.3 Provtagning

Producenter hade fått instruktioner för provtagningen från Ramböll Sverige AB i juni 2003. Det viktigaste var att provtagning utfördes vid tillfällen då inga (åtminstone uppenbara) störningar skedde i processen. Andra viktiga omständigheter var att

- dokumentera provtagningen (namn på provtagaren, tidpunkt och datum, typ av material, mängd, förhållandena, beskrivning av provtagningen och eventuella avvikelser osv.)
- ta ut provmaterial under en dag och med rena och annars sakenliga redskap (t.ex. ingen kontaminering av metaller osv. skulle hända under provtagningen)
- homogenisera provmaterialet
- packa provmaterialet i plasttunnor för transport
- märka behållaren ordentligt (typ av materialet, tidpunkt och datum för provtagningstillfället, mängd)
- förvara provmaterial svalt, i synnerhet fiberleraproverna (som har risk för bakteriell tillväxt), före transporten

4 Karakterisering av komponenter

Tabell (5) beskriver mängden av de olika provmaterial eller komponenter, som leverades under exportstillståndet och som har tagits emot av SGT vid slutet av september 2003:

Tabell 5: Mängd (kg) av provmaterial som användes för undersökningarna / Quantities (kg) of test materials used for the research

PRODUCENT	FLYGASKA	FIBERLERA*
Stora Enso, Grycksbo bruk		55
Stora Enso, Fors bruk	120	50
Vargöns Pappersbruk	100	70
Bravikens Pappersbruk	120	60
Mälarenergi AB, Västerås	160	
Tekniska Verken (TVL), Linköping	160	

Enligt SGTs instruktioner var det totala behovet för undersökningar ca 400 kg flygaska och 200-300 kg fiberlera. TVLs flygaska lämnades bort på grund av dess låga användningspotential som en komponent i fiberaska (se karakteriseringsresultat nedan).

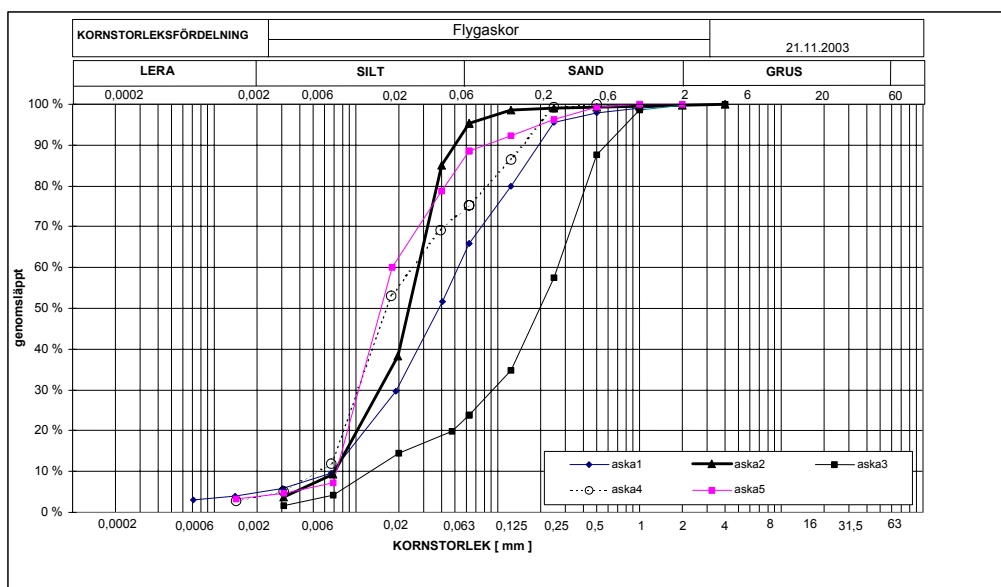
4.1 Karakterisering av flygaskorna

Karakteriseringsparameter för flygaskorna var kornstorleken, vattenkvot (w), glödningsförlust (LoI), pH och halt av aktiv kalk (aktiv CaO). Kornstorleken beskrivs i figuren (1). Andra resultat kan man se i tabellen (6), för jämförelse skall också motsvarande resultat från FACE (Q4-107) inom parentes. Vattenkvoten av nästan alla askorna var låg (< 3 %) med undantaget TVLs deponiaska FA5. Glödningsförlust var över 5 % på Vargöns Pappersbruks (FA2), Bravikens (FA3) och TVLs (FA5) aska; en lägre glödningsförlust indikerar bra aska som byggnadsmaterial. På motsvarande sätt är halten av aktiv CaO låg i TVLs fuktiga aska (1,3 %), relativt hög i Vargöns Pappersbruks aska (8,7 %). De övriga undersökta askornas aktiv CaO-halt ligger mellan 4 och 6 %. Vargöns Pappersbruks aska (FA2) är intressant på grund av dess höga halt av aktiv CaO. Figuren (1) indikerar, att askornas kornstorleksfördelning är likartade och kornstorleksammansättningen motsvarar jordmaterialet silt. Ett undantag är askan FA3, som har grövre kornstorleksfraktion och motsvarar sand.

Tabell 6: Karakteriseringsresultat för flygaskor (inom parentes motsvarande FACE-resultat) / Results of characterisation of fly ashes (in parenthesis corresponding results from FACE)

Flygaskor	Val för optimering	w [% TS]	LoI 800°C [% TS]	pH	aktiv CaO [% TS]
Stora Enso, Fors bruk	FA1	0,0 (0,4)	3,0 (7,1)	12,8 (12,8)	4,1 (12,4)
Vargöns Pappersbruk	FA2	2,3	13,8	13,2	8,7
Bravikens Pappersbruk	FA3	2,2 (1,5)	15,6 (13,3)	12,9 (12,6)	5,5 (5,2)
Mälarenergi AB, Västerås	FA4	0,1 (0,1)	7,4 (4,5)	12,9 (12,6)	4,6 (4,6)
TVL, Linköping	FA5	78 (78,3)	27,9 (30,3)	11,2 (9,0)	1,3 (1,1)*

*) $\text{Ca}(\text{OH})_2$



Figur 1. Kornstorleksfördelning av flygaskor / Grain size distribution of fly ashes

Bedömning av flygaskornas lämplighet i det fortsatta projektet

Enligt tidigare erfarenheter i Finland är de mest lämpade flygaskorna för vägranläggningar och blandningar med fiberlera är torra askor ($w < 3,0\%$), med låg glödningsförlust ($\text{LoI} < 10\%$ ¹) och halt av aktiv CaO större än 3%. Enligt karakteriseringsresultat tycks FA1 och FA4 vara lämpliga askor, och FA2 och FA3 intressanta frågetecken (relativt hög LoI, men också en riklig/hög halt av aktiv kalk) för ovannämnda ändamål. TVL askan (FA5) saknar nästan helt reaktivitet (härdningskapacitet). Denna aska kan inte användas tillsammans med en våt fiberlera, men kunde vara en intressant aska i torrt tillstånd.

¹ OBS. Högre LoI-värden än 10% kan dock vara acceptabla, om LoI-värdena förutom oförbränt även inkluderar karbonater såsom CaCO_3 samt kemiskt bundet vatten såsom i $\text{Ca}(\text{OH})_2$

4.2 Portal och specific yta av flygaskorna

Densitetsvärden samt portal har bestämts hos Tampere tekniska universitets laboratorium för byggsgeologi. Alla värden har bestämts som medelvärde av tre mätningar.

Specifik yta har bestämts av Finnsementti Oy med hjälp av Blaine metoden. Resultaten är också här medelvärde av flera mätningar p.g.a. att askan håller ojämn kvalitet. Blaine tycks inte vara den rätta metoden att bestämma den specifika ytan av askor på grund av askornas inhomogena porositet. Enligt Finnsementti har deras Blaine-apparat kalibrerats för att mäta den specifika ytan av olika cementtyper. Här är antagandet, att materialets porositet är ca. 0,5. Några flygaskor (stenkolsaskor), vilkas porositet är nära 0,5, har mäts med denna apparat. Porositeten av tre flygaskor (FA1, FA2 och FA4) var mellan 0,6 och 0,75, men andra askornas porositet kunde inte bestämmas (enligt Finnsementti). Resultat av portal och specifik yta är i tabellen (7) nedan.

Tabell 7: Portal och specifik yta / Void ratio and specific area

Prov (aska)	Kompaktdensitet, ton/m ³	Torr densitet, ton/m ³	Portal (e)	Specifik yta, m ² /kg
FA1	3,04	0,59	4,15	609
FA2	2,85	0,30	8,50	873
FA3	2,56	0,45	4,69	-
FA4	2,99	0,52	4,75	769
FA5	2,68	0,53	4,06	-

Enligt Finnsementtis information är den specifika ytan av askorna högre än olika cementtypernas specifika ytan (som varierar mellan 390 och 410 m²/kg). Överhuvudtaget gäller att ju större den specifika ytan är desto aktivare är askan. FA2 verkar vara den mest ytaktiva askan, d.v.s. den mest finkorniga askan med den största specifika ytan. En systematisk undersökning för flygaskornas portal och specifik yta och dess relation till andra egenskaper fattas ännu. Resultat kan också jämföras med motsvarande askornas resultat vid FACE (Q4-107).

4.3 Karakterisering av fiberlera

De parametrar som används i detta projekt för att karakterisera fiberleran är vattenkvot (w), glödningsförlust (LoI) och pH. Fiberlerans kornstorleksfördelning kan inte bestämmas, eftersom den inte är ett helt granulärt material.

Tabell 8: Karakteriseringsresultat för fiberleror / Characterisation results of fibre clays

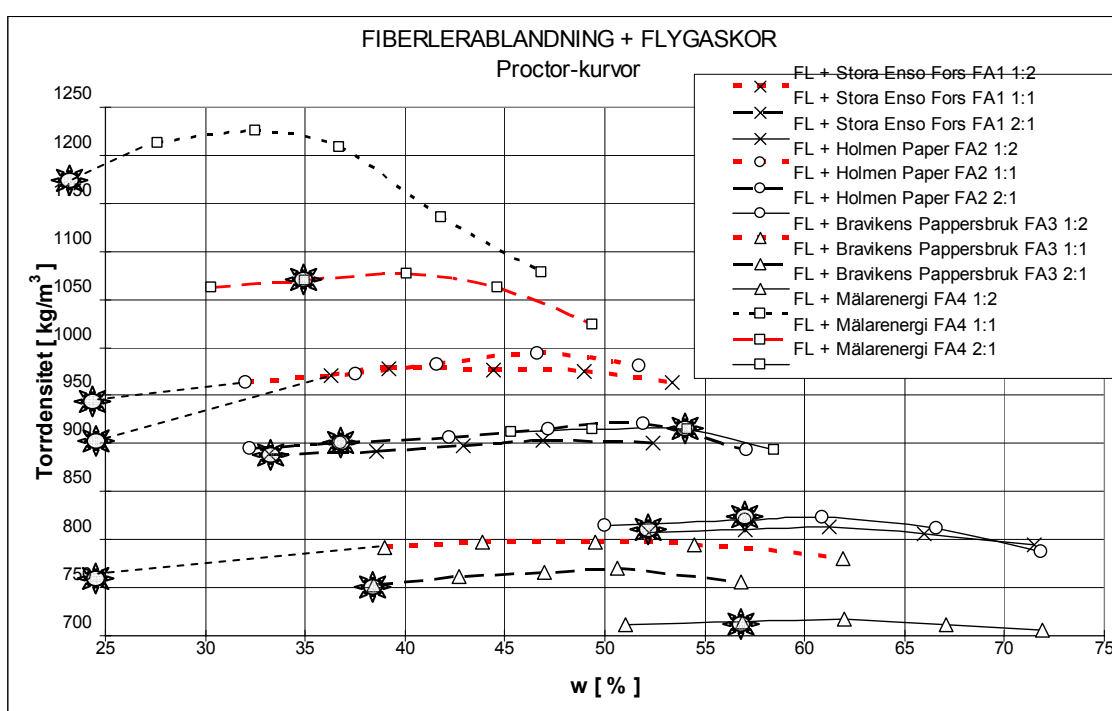
Fiberleror	Val för optimering	w [% TS]	LoI 800°C [% TS]	pH	Kommenter vs. byggnadsmaterial
Stora Enso, Grycksbo bruk	Inblandning 1:1:1:1 av dessa = Fiberlera av projektet	136	46,5	7,4	ok
Stora Enso, Fors bruk		116	81,7	7,8	ok, lätt att användas
Vargöns Pappersbruk		163	69,6	7,1	ok
Bravikens Pappersbruk		75	58,6	8,1	ok
Inblandning FL		117	63,7	7,4	

De fyra fiberlerorna i tabellen (8) inblandades och homogeniserades till ett material här betecknat som FL (fiberlera). Också FL karakteriserades. Dess vattenkvot var 117 %, glödningsförlust 63,7 % och pH 7.4.

5 Sammanblandnings optimering

Syftet med detta steg var att identifiera optimala fiberaskblandningar i laboratoriemiljö. Detta gjordes med hjälp av packningsförsök och andra geotekniska tester på de mest lovande blandningarna mellan fiberlera (FL) och fyra olika flygaskor (FA1 -4).

Proctor-tester gjordes på sammanlagt tolv blandningar av FL:FA1, FL:FA2, FL:FA3, och FL:FA4. Samtliga är med blandningsförhållanden 1:2, 1:1 och 2:1. Resultaten från proctorförsöken redovisas i Figur (2). Tecken [☀] antyder blandningens vattenkvot vid ursprunglig (leverans-) tillstånd. Det betyder, att alla blandningar med FL:FA 1:2 behöver tillsats av vatten.



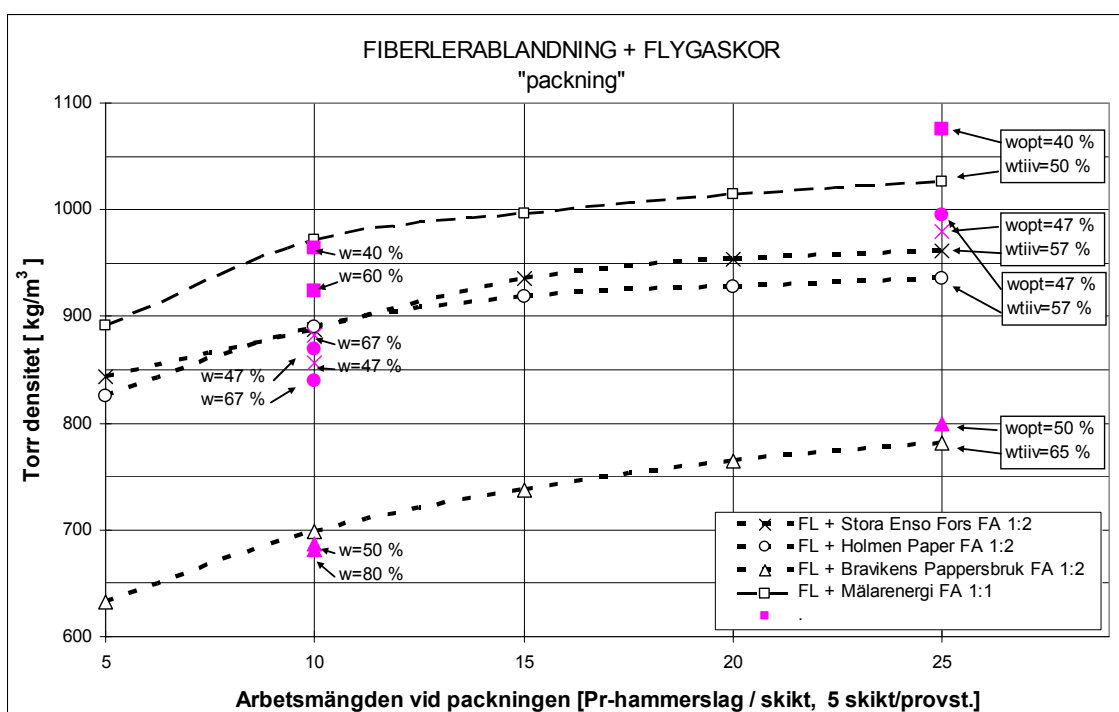
Figur 2. Resultat av Proctortester på olika fiberaskblandningarna; ☀ = vattenkvoten vid leveransen = ursprunglig vattenkvot / Proctor test results on different fibre-ash mixtures; ☀ = watercontent at the delivery = the original water content

Utifrån resultat från Proctortesterna valdes fyra blandningar (en av blandningsförhållandena per aska) på grund av tidigare erfarenheter. Ledmotivet för valet var att ha tillräckligt olika men användbara blandningar, där mängden av aska var stor (FA:FL, 2:1 vid våtmassa). En blandning skulle vara sådan, där mängden av aska och fiberlera var lika stor (vid våtmassa). Alternativa för detta fall var antingen FA1 eller FA4, då deras karaktär var närmast varandra – FA4 valdes för denna avvikande blandning (FL:FA4, 1:1). Packningsegenskaper av samtliga blandningar kontrollerades vid mindre och/eller större vattenkvoter än $w(\text{opt})$. Resultat ges i tabellen (9) och figuren (3) nedan. Provstyckena för fortsatta testerna gjordes vid $w(\text{packning})$, där flygaska och fiberlera hade blandats ihop vid deras ursprungliga (leverans-) vattenhalt och vatten hade tillagats vid behov. I

Figur (3) motsvarar arbetsmängden 10 slag/skikt den arbetsmängd som är möjlig att nå i praktiken.

Tabell 9: Vattenkvoter av fiberaskor: den optimala vattenkvoten och packnings vattenkvot / Water content of fibre-ashes: the optimum water content and water content at compaction

	w (opt)	w (packning)	Under sammanblandning
FL:FA1 1:2	47	57 %	utvecklar värme
FL:FA2 1:2	47	57 %	ingen värmeutveckling
FL:FA3 1:2	50	65 %	ingen värmeutveckling
FL:FA4 1:1	40	50 %	lite värmeutveckling



Figur 3. Resultat av packningstester på olika fiberaskablandningarna vid olika slag/skikt. Vattenkvoten vid optimum (w_{opt}) är lägre än vattenkvoten vid packningen av provstycken ($w_{packning} = w_{tiv}$) / Compaction test results on different fibre-ash mixtures by different blows/course. The optimal water content (w_{opt}) is lower than the water content used for the compaction of test pieces (w_{tiv}).

Provstycken gjordes vid vattenkvoten $w(\text{packning})$ för att bestämma sammanblandningarnas tryckhållfasthet, permeabilitet (hydraulisk konduktivitet) samt vattengenomträngnings beständighet. Testerna startades efter 28 dygns härdning. I tabellen (10) kan man se resultat av dessa tester.

Tabell 10: Resultat av tester på fiberaska sammanblandningar / Results of test on fibre-ash mixtures

Fiberaska	w (packning)	Torrdensitet ¹ γ_d (inom par. packnings- grad ³)	Tryckhåll- fasthet, σ , 28d	Permeabilitet, k-värde	Tryckhåll- fasthet efter permea- bilitetstesten, σ (och änd- ring)
	%	kg/m ³	kPa	m/s	kPa (%)
FL:FA1, 1:2	57	890 (91%)	580	8,3E-8	630 (9%)
FL:FA2, 1:2	57	890 (89%)	480	6,6E-8	390 (-19%)
FL:FA3, 1:2	65	700 (88%)	480	6,4E-6	590 (23%)
FL:FA4, 1:1	50	970 (90%)	560 ²	7,1E-8	620 (11%)

1) OBS: Torrdensiteten motsvarar läget under provstyckets tillverkning. Densiteten ändrar sig lite under härdningen samt under permeabilitetstesten för hydraulisk konduktiviteten

2) OBS: Ingen brytning av provstycket sker under testen (under belastningen). Hållfastheten motsvarar läget när deformationen är 10 %.

3) Packningsgrad: torrdensitets relation till den maximala torrdensiteten i Figuren 2

Materialets tryckhållfasthet ligger mellan 480 och 580 kPa. Materialets permeabilitet är högst för FL:FA3, $k \sim 10^{-5}$, med stor sannolikhet pga. att askan består av material i sandfraktion och har lägst torrdensitet. De övriga materialen är i siltfraktion och har lägre permeabilitet, $k \sim 10^{-7}$ m/s.

Testresultaten av fiberaskorna med askorna FA1 och FA4 tycks vara tämligen lika. Olika resultat av dessa fiberaskor beror på deras olika proportioner av flygaska vs. fiberlera (FL:FA1, 1:2 och FL:FA4, 1:1), inte på flygaskorna själva. Fiberlerans större andel i fiberaskan FL:FA4 medför, att materialet är mera deformationsbeständigt: provstycket kunde inte brytas vid tryckhållfasthetstesten (hållfasthetsvärden har givits vid 10 % deformationen).

Syftet med projektet har varit, att utveckla fiberaskor för väganläggningar. Blandningarnas permeabilitetsvärden tycks vara rätt bra för dessa ändamål. Fiberaskornas permeabilitet är rimligt låg. I fall fiberaskaskiktet har belagts med krossmaterial, rinner regnvattnet genom beläggningen och sedan längs fiberaskaskiktet till vägsidorna (alltså inte ner genom fiberaskaskiktet). Vattenhalten hos materialet under fiberaskaskiktet höjs därmed inte, vilket minskar risken för tjälskador.

Tryckhållfastheten hos prov vars permeabilitet har mäts, dvs. prov där vatten har strömmat igenom materialet, ökade något för FA1, FA3 och FA4, medan för FA2 minskade hållfastheten. En del av den höjda tryckhållfasthetsvärden har påverkats av testen själv, dvs. celltrycket riktat på provkroppen under testen.

6 Geotekniska stabiliseringsundersökningar

Till de färdiga fiberaskblandningarna tillsattes bindemedel i syfte att hitta de blandningar som har bästa beständigheten mot frost, frys och tiningscyklar och vatten. Fiberaskornas geotekniska egenskaper utan bindemedel redovisas i avsnitt 5.

I tabell (11, a - c) redovisas resultat från testerna på de fyra fiberaskblandningarna med följande bindemedel: byggcement (BCe) på alla fiberaskblandningarna och BCe + Merit 5000 samt BCe + kalk (CaO) på ett antal fiberaskblandningar. På några valda blandningar gjordes kontroll av packningsegenskaper med proctortesten. Testerna valdes med hänsyn till egenskaper som efterfrågas i en vägs bärlager. I figur (4) görs en jämförelse av tryckhållfasthetsvärden efter olika belastningstester och efter ingen belastning. Resultaten ger en fingervisning om de olika blandningarnas beständighet mot frost, frys och tiningscyklar, mätning av vatten och vattengenom trängning (vid permeabilitetstesten).

Inblandningar med bindemedlen gjordes i följande ordning: flygaska blandades med fiberlera vid deras våtmassa (se kapitel 5). Till blandningen tillsattes bindemedel och sedan vatten i de fall det behövdes. Mängden av bindemedel har uttryckts i förhållande till fiberaskblandningens våtmassa. De färdiga blandningarna har packats i provtuber med något högre vattenkvot än blandningarnas optimala vattenkvot (se förra avsnittet). Packningen har gjorts med en konstant arbetsmängd på 10 slag/skikt. Provstyckenas mått var: höjd 116 mm och diameter 102 mm. Provstyckena (dubbelprov) bevarades 28 dagar i rumstemperatur (~ 20°C) före testen.

FL:FA1, 1:2 (flygaska från Stora Enso, Fors) / Tabell 11a

Tillsats av cement påverkar inte blandningens hållfasthet. Materialets permeabilitetsbeständighet påverkas inte heller i någon större omfattning. Däremot förbättras materialets beständighet mot minusgrader, både vad gäller frostbeständighet och beständighet mot frys- och tiningscyklar. Även byggcement och Merit 5000 gav bättre beständighet.

Resultat som redovisas i tabell (10) visar att stabiliserad fiberaska (FL:FA1, 1:2) bryts ned av frys- och tiningscyklar, men att härdningen kan pågå under frostförhållanden, förutsatt att cement eller cement+Merit finns med som tillsatsmedel.

Segregationspotential $SPo = 0,18 \text{ mm}^2/\text{Kh} \dots 0,72 \text{ mm}^2/\text{Kh}$ indikerar, att alla material är endast lite känsliga för tjäle (Lahtinen 2001).

FL:FA2, 1:2 (flygaska från Vargöns Pappersbruk) / Tabell 11c

Tilllägg av byggcement förbättrar fiberaskans ursprungliga tryckhållfasthet och beständighet. I detta fall är bindemedlets effekt märkbar. Cementtilllägg förbättrar tryckhållfastheten (utan belastning) med upp till ca 79 %. Frysning-tiningbeständigheten blir också bättre, men den är i båda fall låg i jämförelse med tryckhållfastheten utan belastning.

FL:FA3, 1:2 (flygaska från Bravikens Pappesbruk) / Tabell 11b

Tillägg av byggcement och cement+Merit förbättrar fiberaskans ursprungliga tryckhållfasthet och beständighet. Utan tillsats av bindemedel är fiberaskans frysning-tiningsbeständighet 66 % av tryckhållfastheten utan belastning, vilket medför att fiberaskan kunde användas också utan bindemedelstillsats. Tillsats av cement och cement+Merit medför, att materialets hållfasthet inte påverkas mer än marginellt av vatten och minusgrader.

FL:FA4, 1:1 (flygaska från Mälarenergi, Västerås) / Tabell 11c

Materialet tycks ha en likartad beständighet mot frys- och tining som FL:FA3. Tillsats av cement medför ingen markant höjning av hållfastheten hos materialet, men materialets beständighet ökar. Under vattenbeständighets- och permeabilitetsförsöken ökar materialets tryckhållfasthet, dvs. härdning av materialet pågår. Någon otvetydig jämförelse med de andra fiberaskorna kan dock inte göras, då denna blandning har en olik proportion av flygaska och fiberlera än de andra (1:1 vs 2:1). Denna avvikelser kan bero på flygaskans egenskaper eller på den olika blandningsproportionen, men den kan prövas endast med tilläggsförsök.

Tabell 11: Resultat av geotekniska stabiliseringstester på / Results of geotechnical stabilisation tests on a) FL:FA1, 1:2, b) FL:FA3, 1:2, c) FL:FA2, 1:2 och FL:FA4, 1:1

a) FL:FA1, 1:2

Fiberaska			FL:FA1, 1:2			
Bindemedel BM ¹⁾ , 6 %			- ^{&}	BCe	BCe + Merit	BCe + CaO
Proctor	$\gamma_{d,max}$	kg/m ³		990		
	w_{opt}	%		44		
Densitet ²⁾	γ_d	kg/m ³	890	940	940	920
Tryckhållfasthet ⁴⁾	σ	kPa	580	580	550	460
	ϵ ³⁾	%		3-4	4-4,5	ca 3,5
Frysning-tiningsbeständighet	σ (efter testen)	kPa	200	330	360	
Vatten-beständighet	σ (efter testen) ⁵⁾	kPa		550	600	
Frost-beständighet	SPo	mm ² /Kh	0,3-0,35	ca 0,2	0,3-0,35	
	σ (efter testen)	kPa	390	630	610	
Hydraulisk kond.	k	m/s	8,3E-08	1,1E-07	1,3E-08	
	σ (efter testen)	kPa	630	720	640	

1) Mängd av bindemedel (6 % av fiberaskans våta massa); [&]Ingen tillsats av bindemedel; 2) Provstyckets densitet (torr); 3) Deformation vid brytning; *) ingen brytning; hållfastheten är vid $\epsilon=10\%$; 4) Tryckhållfastheten efter ingen belastning, endast förvaring i rumstemperaturen under 28 dagar; 5) Tryckhållfastheten efter belastningstesten, här impregnering med vatten;

b) FL:FA3, 1:2

Fiberaska	FL:FA3, 1:2
-----------	-------------

Bindemedel BM ¹⁾ , 6 %			-&	BCe	BCe + Merit	BCe + CaO
Proctor	$\gamma_{d,max}$	kg/m ³		840		
	w_{opt}	%		52		
Densitet ²⁾	γ_d	kg/m ³	700	730	730	730
Tryckhållfasthet ⁴⁾	σ	kPa	480	720	640	670
	$\epsilon^3)$	%		2,5-3	3-3,5	ca 3
Frysning-tinings-beständighet	σ (efter testen)	kPa	320	550	520	
Vatten-beständighet	σ (efter testen) ⁵⁾	kPa		720	650	
Frost-beständighet	SPo	mm ² /Kh				
	σ (efter testen)	kPa				
Hydraulisk kond.	k	m/s	6,4E-06	6,6E-06	4,0E-06	
	σ (efter testen)	kPa	590	810	740	

1) Mängd av bindemedel (6 % av fiberaskans våta massa); *Ingen tillsats av bindemedel; 2) Provstyckets densitet (torr); 3) Deformation vid brytning; *) ingen brytning; hållfastheten är vid $\epsilon=10\%$; 4) Tryckhållfastheten efter ingen belastning, endast förvaring i rumstemperaturen under 28 dagar; 5) Tryckhållfastheten efter belastningstesten, här impregnering med vatten;

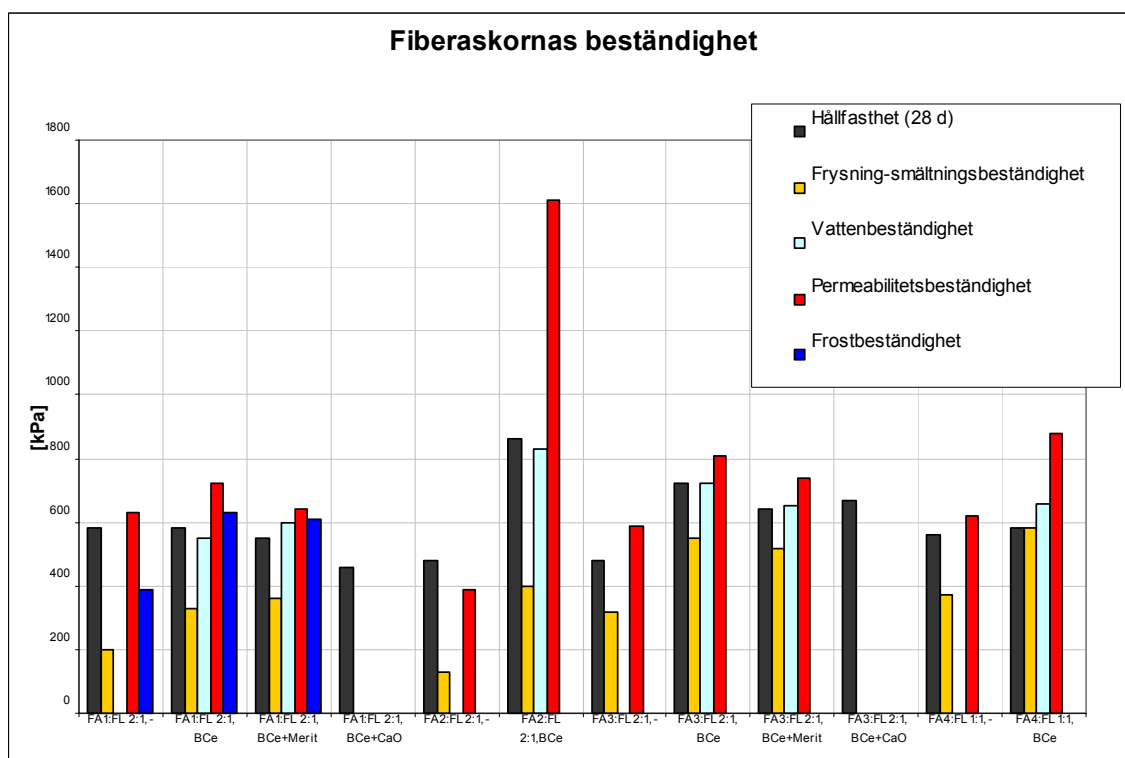
c)

Fiberaska			FL:FA2, 1:2		FL:FA4, 1:1	
Bindemedel BM ¹⁾ , 6 %			-&	BCe	-&	BCe
Proctor	$\gamma_{d,max}$	kg/m ³				
	w_{opt}	%				
Densitet ²⁾	γ_d	kg/m ³	890	920	980	1010
Tryckhållfasthet ⁴⁾	σ	kPa	480	860	560*	580
	$\epsilon^3)$	%		1,5-2		7-10
Frysning-tinings-beständighet	σ (efter testen)	kPa	130	400	370	580
Vatten-beständighet	σ (efter testen) ⁵⁾	kPa		830		660
Frost-beständighet	SPo	mm ² /Kh				
	σ (efter testen)	kPa				
Hydraulisk kond.	k	m/s	6,6E-08	< 1,0E09	7,1E-08	1,3E-09
	σ (efter testen)	kPa	390	1610	620	880

1) Mängd av bindemedel (6 % av fiberaskans våta massa); *Ingen tillsats av bindemedel; 2) Provstyckets densitet (torr); 3) Deformation vid brytning; *) ingen brytning; hållfastheten är vid $\epsilon=10\%$; 4) Tryckhållfastheten efter ingen belastning, endast förvaring i rumstemperaturen under 28 dagar; 5) Tryckhållfastheten efter belastningstesten, här impregnering med vatten;

Tabell 12: Ändring av tryckhållfastheten efter belastningstester för blandningar av FL:FA1, 1:2. Tryckhållfastheten efter belastningstester jämförs här med tryckhållfastheten utan belastning / Changes of the compression strength after freeze-thawing and frost resistance tests on FL:FA1, 1:2, in relation to the compression strength without any climatic loads

	Frysning-tiningstest	Frostbeständighetstest
Fiberaska utan bindemedel	- 65 %	- 33 %
Fiberaska med BCe	- 43 %	+ 9 %
Fiberaska med BCe+Merit	- 34 %	+ 11 %



Figur 4. Beständigheten enligt tryckhållfastheten av olika fiberaskblandningarna efter olika tester: utan belastning under 28 dygn, frysning-tinings- (frysning-smältnings-) beständighet, vattenbeständighet, permeabilitets- (vattengenomträngnings-) beständighet och frostbeständighet / The resistance against different types of load of fibre-ash mixtures: storage without load for 28 days, and resistance against freeze-thawing cycles, saturation with water, infiltration of water and frost.

7 Geotekniska kontrolltester

För kontrolltester valdes fiberaskan med Stora Ensos flygaska stabiliserad med byggcement + Merit 5000. Vid kontrolltesterna stabiliserades fiberaskan med olika mängder av bindemedlet (4,5 %, 6 % och 8 % av fiberaskans våta massa). Alla stabiliserade prov testades för tryckhållfasthet (utan belastning). Utöver detta undersöktes frys- och tinningsbeständigheten, permeabiliteten och beständigheten efter vattengenomträngning hos provstycket stabiliserat med 4,5 % bindemedel (Bce+Merit). Fiberaskan med 4,5 % bindemedel testades också för härdningsutvecklingen under tiden av 0 ... 90 dygn. Härdningsutvecklingen undersöktes också hos fiberaskan med 6 % bindemedel efter 28 dygn och 90 dygn (28 dygns resultat utan bindemedel och med 6 % bindemedel har man också fått under tidigare undersökningar). Resultat redovisas i tabellen (13) samt i figuren (5).

Tabell 13: Påverkan av bindemedlets mängd på fiberaskans egenskaper. Fiberaskblandningen är FL+FA1, 1:2 (FA1 är Stora Ensos aska) och bindemedlet är Bce+Merit 5000 (1:1). Bindemedlets mängd är given som % av fiberaskblandningens våta massa. Tabellen innehåller också resultat från tidigare tester. / Effect of binder amount on the properties of fibre-ash. Fibre-ash is FL+FA1, 1:2 (FA1 is the fly ash from Stora Enso) and the binder is cement+Merit 5000 (1:1). Binder amount is calculated as per cent of the fibre-ash mixtures wet weight. The table includes also results of earlier tests.

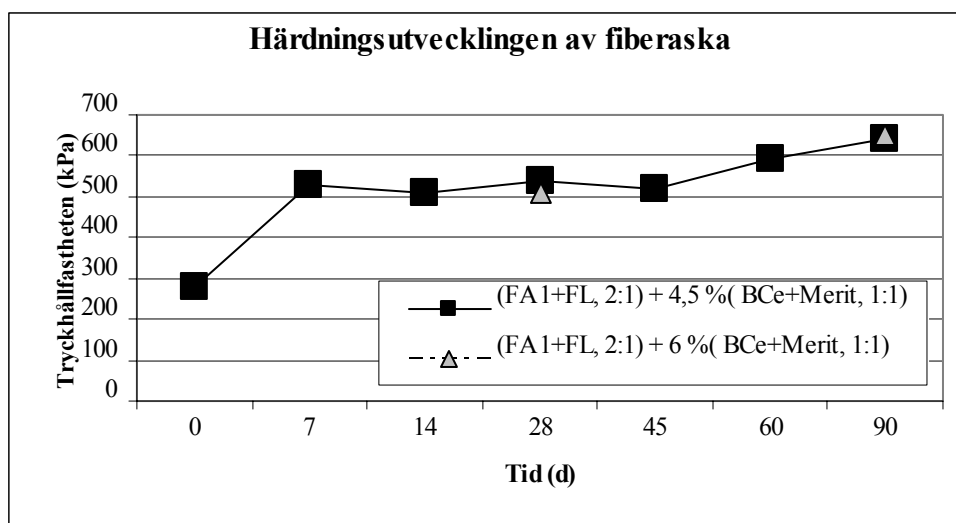
Test	Symbol	Enhet	Bindemedlets mängd			
			0 %*	4,5 %	6 %**	8 %
Tryckhållfasthet, 28 d	σ	kPa	580	540	510 (550)	510
	ε	%		3,5-4	3,5-4,5	4-5
Frysning-tinnings beständighet	$\sigma_{\text{efter testen}}$	kPa	200	280	(360)	
Vattenbeständighet	$\sigma_{\text{efter testen}}$	kPa			(600)	
Frostbeständighet	SPo	mm ² /Kh	0,3-0,35		(0,3-0,35)	
	$\sigma_{\text{efter testen}}$	kPa	390		(610)	
Hydraulisk konduktivitet	k	m/s	8,3E-08	2,0E-07	(1,3E-08)	
	$\sigma_{\text{efter testen}}$	kPa	630	690		

*tidigare resultat

** tidigare resultat inom parentes

Resultat i tabellen (13) indikerar, att bindemedlets mängd inte märkbart påverkar tryckhållfastheten (utan belastning) eller frostbeständigheten, men påverkar frysning-tinningsbeständighet. På grund av dessa resultat är påverkan på frysning-tinningsbeständigheten den väsentliga utgångspunkten för valet av bindemedelsmängden. Dessa resultat indikerar också att en mängd av bindemedel mellan 3 – 5 % kan vara tillräckligt för den härdningsutveckling, som behövs för vägbyggandet.

Resultat i figur (5) visar att härdningen med tiden fortsätter under vissa förhållanden minst 90 dygn efter byggandet. Tidigare FoU har visat, att det är särskilt masugnslagg (t.ex. Merit 5000), som uppvisar långsamma härdningsreaktioner som tar längre tid än en månad.



Figur 5. Härtningsutvecklingen av fiberaska FA1+FL, 2:1 stabiliserad med 4,5 % och 6 % Bce+Merit 5000 / Development of the strength of the fibre-ash FA1+FL, 2:1 stabilised with 4,5 % and 6 % Bce+Merit 5000

8 Miljötester av fiberaskblandningar

Miljötesterna bestod av analyser av totalhalten i restprodukterna och lakningstester av flera fiberaskor.

8.1 Totalhalten

Totalhalten av oorganiska ämnen bestämdes hos de komponenter som har använts vid stabiliseringsundersökningarna: fyra flygaskor och en fiberlerablandning. Fiberlerablandningens innehåll av TOC (innehåll av total organiskt kol) bestämdes enligt standarden ISO 10694 och vattenlösligt TOC enligt standarden SFS-EN 1484:1997. Oorganiska ämnen bestämdes med ICP-AES/MS efter torkning vid 40 °C, finfördelning (< 2 mm) och extrahering i salpetersyra i mikrovågsugnen enligt EPA-3051. Resultat ges i tabellen (12). I tabellen har dessa resultat jämförts med finska riktvärden för ren och förorenad jord (Sorvari 2000) samt med de svenska riktvärdena som gäller vid mindre känslig markanvändning.

Generellt sett motsvarar flygaskornas totalhalter de totalhalter som är vanliga hos de finska flygaskorna från biobränsle. I tabell (14) görs en jämförelse mellan de undersökta flygaskornas halter av metaller och de svenska riktvärdena som gäller vid känslig markanvändning (KM) och mindre känslig markanvändning (MKM). Dessa riktvärden nyttjas här enbart i syfte att utgöra jämförelser. I följande fall överskrider riktvärdena för MKM:

- FA1 med avseende på B, Ba och Zn
- FA2 med avseende på As, B, Ba, Cd, Pb, och Zn
- FA3 med avseende på B, Ba, Cu, Pb och Zn
- FA4 med avseende på As, B, Ba, Cd, Pb, och Zn

Halterna av zink och arsenik i FA2 är ovanligt höga.

Fiberleran har låga halter av tungmetaller, men också flera av dess halter överskrider de finska riktvärdena för ren jord. Halten av organiskt kol (i torrsubstansen över 300 g/kg, och vattenlösligt 16 g/kg) är mycket hög i fiberleran. Detta indikeras också av karakteriseringsresultat för fiberleror, där glödningsförlust för fiberleran ligger mellan 46 och 82 %.

Tabell 14: Totalhalten av oorganiska i flygaskor och fiberlerablandningen, samt organiskt kol (TOC) i fiberlerablandningen (mg/kg, TS). FA = flygaska, FL = fiberlerablandningen. / The total content of inorganic substances in the fly ashes (FA) and fibre clay (FL), and TOC of the fibre clay (mg/kg, DS)

Ämne	Analyserat material och dess ursprung					Riktvärden	
	FA1	FA2	FA3	FA4	FL	Ren jord (Sorvari 2000)	Förorenad jord [#] / MKM
	Stora Enso Fors	Vargöns Pappers- bruk	Braviken Pappers- bruk	Mälar- energi	(flera)		
Ag	2,09	1,86	1,47	0,76	0,22		
Al	104 000	40500	55000	20900	30000		
As	8,85	281	23,90	77,70	0,99	4	40
B	503	419	99,70	180	71,80	5	50 [#]
Ba	1100	2950	1050	1940	57,90	600	600 [#]
Be	0,43	0,46	0,96	1,09	0,19	1	10 [#]
Bi	0,90	19,20	12,30	9,99	1,20		
Ca	201 000	206 000	237 000	200 000	95800		
Cd	7,40	40,90	5,78	10,30	0,17	0,15	12
Co	8,04	16	7,64	15,40	0,71	50	250
Cr	121	227	101	174	14	37	250
Cu	218	254	457	219	55,20	18	200
Fe	19700	13200	7500	23500	1540		
K	26300	58400	9010	23500	436		
Li	13,50	15,50	27,80	14,70	5,51		
Mg	14600	25800	19400	23700	1780		
Mn	6030	14400	1750	4180	266		
Mo	7,48	11,70	4,17	5,46	0,65	5	200 [#]
Na	13900	6260	5150	6630	764		
Ni	51,80	103	48,30	49,30	1,87	19	200
P	10100	14300	1890	6280	795		
Pb	174	466	839	550	6,10	15	300
Rb	112	285,00	89,90	93,10	4,39		
S	17600	46000	4480	30500	3780		
Sb	0,57	3,14	0,44	1,16	0,02	5	40 [#]
Se	0,96	4,61	0,86	3,45	0,50	1	10 [#]
Si	383	499	351	350	408		
Sr	592	773	526	471	171		
Th	6,89	8,83	13,80	8,57	5,34		
Ti	924	906	945	1430	46,40		
Tl	2,02	9,94	1,09	0,75	0,05		
U	1,60	2,23	2,95	3,18	0,95		
V	28,80	85,70	13,00	39,50	7,37	50	200
Zn	1530	9030	1590	3300	48	23	700
TOC1*					310 000		
TOC2*					16000		

*TOC1 har bestämts enligt ISO 10694 (TOC av torrt material) och TOC2 har bestämts enligt SFS-EN 1484:1997 (vattenlösigt TOC)

Finska riktvärden för ren jord där det saknas svenska riktvärden.

8.2 Lakning

Lakningstester utfördes på samma fiberaskor som undersöktes i steget ”stabiliseringsundersökningar” (se kapitel 6). Lakningsförsöken utfördes med hjälp av skakningstest enligt standarden SFS-EN-12457-2 och kolonntest enligt den holländska standarden NEN 7343. Oorganiska ämnen bestämdes med ICP-MS/AES metoden och TOC enligt standarden SFS-EN 1484:1997. Resultat för L/S = 10 ges i tabeller (15 och 16), och den kumulativa lakningen beskrivs också i figuren (6) beträffande organiskt kol. Lakningsresultaten har jämförts med förslag till finska riktvärden (Sorvari 2000) samt med EU-kommissions beslut för inert och icke-farligt avfall (2003/33/EC).

Den kumulativa lakningen av oorganiska ämnen är mycket låg. I flera fall var halten av analyserade ämnen mindre än detektionsgränsen för analysmetoden (i tabeller indikeras med ”<”). I dessa fall är det omöjligt att jämföra resultaten med några riktvärden. Däremot är den urlakade halten av organiskt kol stor för den fiberaska (FL:FA1), som inte har stabiliserats med cement+Merit 5000 (se figur 6).

Lakningsresultat har också jämförts med den teoretiska totalhalten i fiberaskorna som förhållande lakning/totalhalt i tabeller (17 och 18). Totalhalter har kalkylerats med hänsyn till resultat från kap. 8.1 utan hänsyn till bindemedlets effekt. Både cement och masugnslagg innehåller dock tungmetaller och andra oorganiska ämne. Tabellen (17) jämför lakningen med totalhalten enligt skakningstesten, och tabellen (18) jämför det samma enligt kolonntesten. Det är tydligt, att de flesta ämnen är i ett relativt olösligt tillstånd. Varierande och också relativt stor löslighet kan märkas t.ex. hos K, Na och Se. Selen kan lakas ut helt (100 %). Organiskt kol tycks vara i ett relativt olösligt tillstånd, fastän dess urlakade mängd är högt. Tabellen (18) indikerar också, att tillägg av cement och Merit minskar urlakningen, men detta är dock inte entydigt enligt skakförsöken (tabellen 15).

Av resultaten från kolonn- och skaktesterna framgår att kolonntesten ger lägre metallhalter och konduktivitet än skaktest. Det är ganska normalt, då skaktesten SFS-EN 12457 liknar tillgänglighetstester, t.ex. NEN 7341. I verkligheten kommer materialet att laka ännu mindre än vid kolonnförsöket. Däremot kan eventuell översvämning orsaka lakningsförhållanden som kan likna de förhållanden som råder vid kolonn och skakförsöken.

Resultaten tyder på att urlakning av metaller, som finns i förhöjda halter i både flygas-kan och fiberleran, binds till fiberaskan. Följande ämnen förekommer i förhöjda halter i fiberaskan: As, B, Ba, Cd, Cu, Pb, och Zn (dessa ämnen finns i halter som överskrider svenska och finska riktvärden för förorenad jord). Resultat från kolonnförsöken visar att de kumulativa halterna vid L/S = 10 ligger under detektionsgränsen för As, B, Cd, Cu, och Zn. Det är enbart Ba och Pb som finns i detekterbara halter. Halterna ligger på < 1/10 av de riktvärden som gäller för inert avfall. Detta kopplat med att materialet i vissa fall har låg permeabilitet ger att urlakningen av oorganiska ämnen är liten.

Tabell 15: Lakning av oorganiska ämnen och organiskt kol från fiberaskorna enligt skakförsök SFS-EN 12457-2 vid L/S = 10 (mg/kg, TS). / Leaching of inorganic substances and organic coal from the fibre-ashes according to SFS-EN 12457-2 at L/S = 10 (mg/kg, DS)

Aska→ FA:FL→	FA1			FA2	FA3	FA4	Gränsvärden (Sorvari 2000)		Avfallskriterier 2003/33/EC	
	BCe, 6%	BCe+ Merit, 6%	-	-	-	-	1)	2)	3)	4)
TS (%)	66	67	66	66	63	69				
pH (-)	12,2	12,1	12,1	12,3	11,8	11,4				
EC (mS/m), 25°C	707	713	638	1330	335	497				
Ag	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05				
Al	635	801	2580	191	179	185				
As	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,4	0,1	0,2	0,14	0,85	0,5	2
B	1,4	1,3	0,4	1,0	0,7	0,6				
Ba	0,2	< 0,1	0,7	0,9	3,5	3,4	10	28	20	100
Be	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05				
Bi	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05				
Ca	732	784	1190	243	830	701				
Cd	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,011	0,015	0,04	1
Co	0,1	0,1	0,05	< 0,4	< 0,1	< 0,2	1,1	2,5		
Cr	1,5	1,4	0,3	4,6	0,9	2,6	2	5,1	0,5	10
Cu	12	12	7,2	10	5	11	1,1	2	2	50
Fe	0,1	0,3	0,1	1,5	0,3	5,0				
K	7073	7391	6970	33109	3620	9995				
Mg	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	3,4				
Mn	1	0,1	< 0,05	0,3	0,2	1,3				
Mo	1,1	1,0	0,5	2,4	0,9	0,6	0,31	0,50	0,5	10
Na	4042	4200	3840	3011	1510	3069				
Ni	0,2	0,2	< 0,1	0,7	0,1	0,6	1,2	2,1	0,4	10
P	3,2	3,2	1,3	4,6	2,1	11				
Pb	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	1	1,8	0,5	10
S	468	388	90	6442	94	1169				
Sb	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,12	0,4	0,06	0,7
Se	0,2	0,2	0,2	0,8	0,2	1,4	0,06	0,098	0,1	0,5
Si	28	21	3,4	107	39	48				
Tl	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05				
U	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05				
V	0,1	0,1	0,05	2,6	0,1	0,4	2,2	10		
Zn	< 0,2	< 0,2	< 0,2	1,4	< 0,2	0,4	1,5	2,7	4	50
DOC	2101	2200	1500	2701	1300	4598			500	800

Gränsvärden:

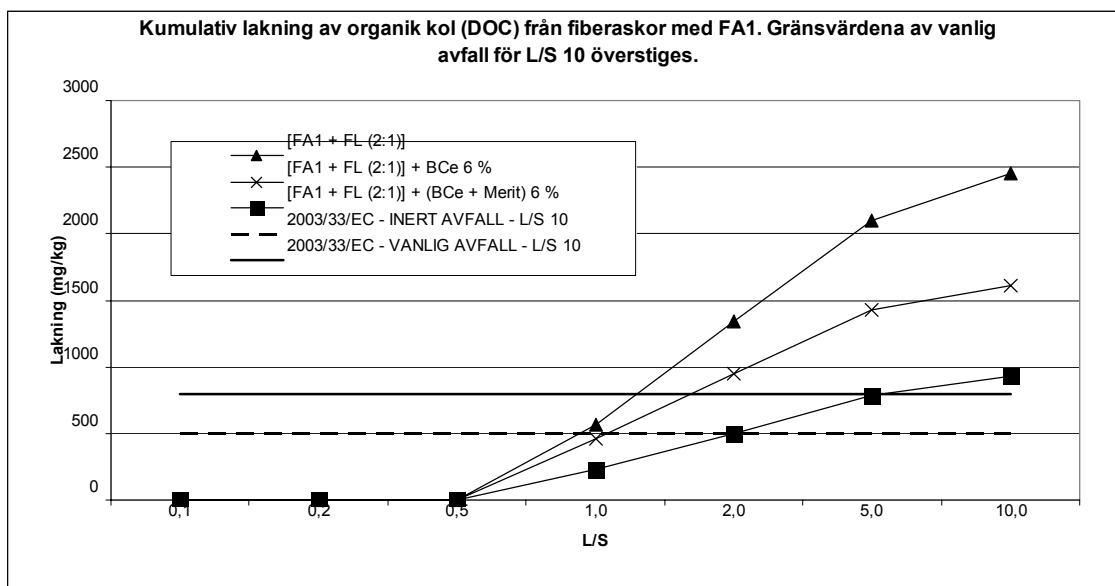
- 1) Finska förslag; konstruktion behöver ingen beläggning
- 2) Finska förslag; konstruktion måste ha beläggning
- 3) för inert avfall
- 4) för icke-farligt ("vanligt") avfall

Tabell 16: Kumulativ lakning av oorganiska ämnen och organiskt kol från fiberaskorna enligt kolonntesten NEN 7343 vid L/S = 10 (mg/kg, TS) / The cumulative leaching of inorganic substances and organic coal from fibre-ashes according to the column test NEN 7343 at L/S = 10 (mg/kg, DS)

Aska→ FA:FL→ Binde- medel→	FA1			Gränsvärden (Sor- vari 2000)		Avfallkriterier 2003/33/EC	
	-	BCe 6 %	BCe + Merit, 6 %	1)	2)	3)	4)
pH (-)	12,4	12,6	12,5				
EC (mS/m), 25°C	320	460	390				
Ag	< 0,004	< 0,002	< 0,002				
Al	3866	694	1040				
As	< 0,04	< 0,021	< 0,02	0,14	0,85	0,5	2
B	< 4	< 2,4	< 2				
Ba	2,351	0,652	1,102	10	28	20	100
Be	< 0,1	< 0,05	< 0,05				
Bi	< 0,02	< 0,01	< 0,01				
Ca	861	885	865				
Cd	< 0,013	< 0,009	< 0,005	0,011	0,015	0,04	1
Co	< 0,052	0,09	< 0,02	1,1	2,5		
Cr	< 4	< 2,5	< 2	2	5,1	0,5	10
Cu	< 12,3	< 12,7	< 5,33	1,1	2	2	50
Fe	< 5,6	< 3	< 3				
K	14389	8386	7301				
Li	0,062	< 0,03	< 0,04				
Mg	< 19	< 10	< 10				
Mn	< 19	< 10	< 10				
Mo	< 1	< 1,16	< 0,5	0,31	0,50	0,5	10
Na	7808	4433	3914				
Ni	< 0,243	< 0,22	0,118	1,2	2,1	0,4	10
P	< 10	< 7,5	< 5,3				
Pb	0,12	0,067	0,05	1	1,8	0,5	10
Rb	101,5	42,44	38,9				
S	185	334	89,7				
Sb	0,06	< 0,021	< 0,014	0,12	0,4	0,06	0,7
Se	< 0,94	< 0,5	< 0,5	0,06	0,098	0,1	0,5
Si	< 13	< 16	< 8,34				
Sr	32,4	13,6	23,3				
Th	< 0,004	< 0,002	< 0,002				
Tl	0,013	0,008	0,004				
U	< 0,002	< 0,001	< 0,001				
V	0,06	0,06	< 0,02	2,2	10		
Zn	< 1,9	< 1,02	1,03	1,5	2,7	4	50
DOC	2451	1613	933			500	800

Gränsvärden:

- 1) Finska förslag; konstruktion behöver ingen beläggning
- 2) Finska förslag; konstruktion måste ha beläggning
- 3) för inert avfall
- 4) för icke-farligt ("vanligt") avfall



Figur 6. Resultat av kolonttesten. Kumulativ lakning av organiskt kol (DOC) från de testade fiberaskablandningarna. Gränsvärdena för icke-farligt(vanligt) avfall överstiges av DOC från alla fiberaskor, men minst av fiberaskan, som är stabiliserad med BCe+Merit / Results of the column test. The cumulative leaching of organic coal (DOC) from the tested fibre-ash mixtures. The limit values for non-hazardous waste have been exceeded by DOC from all fibre ashes but least from the fibre-ash stabilised with cement+Merit.

Tabell 17: Förhållandet lakning/totalhalt, när lakningstesten har varit SFS-EN 12457-2. Totalhalten av fiberaskorna har kalkylerats enligt resultat från kap. 8.1 / The relation of leaching (SFS-EN 12457-2) to the total content of the fibre-ash

Aska→	Total halt, teoretisk				Lakning/totalhalt (%)			
	FA1	FA2	FA3	FA4	FA1	FA2	FA3	FA4
FA:FL→	2:1	2:1	2:1	1:1	2:1	2:1	2:1	1:1
Bindemedel→	-	-	-	-	-	-	-	-
Ag	1,47	1,31	1,05	0,49	3,4	3,8	4,8	10,2
Al	79 300	37 000	46 700	25 450	3,3	0,5	0,4	0,7
As	6,23	188	16,3	39,4	0,8	0,2	0,6	0,5
B	359	303	90	126	0,1	0,3	0,8	0,5
Ba	753	1986	719	999	0,09	0,05	0,5	0,3
Be	0,35	0,37	0,70	0,64	14,3	13,5	7,1	7,8
Bi	1,0	13,2	8,6	5,6	5,0	0,4	0,6	0,9
Ca	165 900	169 300	189 900	147 900	0,7	0,1	0,4	0,5
Cd	5,0	27,3	3,9	5,2	1,0	0,2	1,3	1,0
Co	5,6	10,9	5,3	8,1	0,9	3,7	1,9	2,5
Cr	85	156	72	94	0,4	3,0	1,3	2,8
Cu	164	188	323	137	4,4	5,3	1,6	8,0
Fe	13 647	9 313	5 513	12 520	0,00	0,02	0,01	0,04
K	17 679	39 079	6 152	11 968	39	85	59	83
Mg	10 327	17 793	13 527	12 740	0,01	0,01	0,01	0,03
Mn	4 109	9 689	1 255	2 223	0,00	0,00	0,02	0,06
Mo	5,2	8,0	3,0	3,1	9,6	30,0	30,0	19,6
Na	9 521	4 428	3 688	3 697	40	68	41	83
Ni	35	69	33	26	0,3	1,0	0,3	2,4
P	6 998	9 798	1 525	3 538	0,02	0,05	0,14	0,31
Pb	118	313	561	278	0,17	0,06	0,04	0,07
S	12 993	31 927	4 247	17 140	0,7	20,2	2,2	6,8
Sb	0,4	2,1	0,3	0,6	13	2	30	10
Se	0,8	3,2	0,7	2,0	25	25	27	71
Si	391	469	370	379	0,9	22,8	10,5	12,7
Tl	1,4	6,6	0,7	0,4	3,7	0,7	6,7	12,5
U	1,4	1,8	2,3	2,1	3,6	2,8	2,2	2,4
V	22	6/	11	23	0,2	4,4	0,9	1,7
Zn	1 036	6 036	1 076	1 674	0,02	0,02	0,02	0,02
DOC	103 300	103 300	103 300	155 000	1,5	2,6	1,3	3,0

Tabell 18: Förhållandet lakning/totalhalt, när lakningstesten har varit kolonnstesten NEN 7343. Fiberaskans totalhalt har kalkylerats enligt resultat från kap. 8.1 utan hänsyn till bindemedlets effekt / The relation of leaching (column test NEN 7343) to the total content of the fibre-ash

	Total halt, teoretisk	Lakning/totalhalt (%)	Lakning/totalhalt (%)	Lakning/totalhalt (%)
Aska→	FA1	FA1	FA1	FA1
FA:FL→	2:1	2:1	2:1	2:1
Bindemedel→	-	-	BCe, 6%	BCe+Merit, 6 %
Ag	1,47	0,26	0,14	0,14
Al	79 300	4,90	0,88	1,31
As	6,23	0,61	0,33	0,32
B	359	1,10	0,66	0,56
Ba	753	0,31	0,09	0,15
Be	0,35	27	14	14
Bi	1,0	1,90	1,00	1,00
Ca	165 900	0,52	0,53	0,52
Cd	5,0	0,25	0,18	0,09
Co	5,6	0,92	1,60	0,50
Cr	85	4,40	2,90	2,40
Cu	164	7,50	7,80	3,30
Fe	13 647	0,04	0,02	0,02
K	17 679	81	47	41
Mg	10 327	0,18	0,10	0,10
Mn	4 109	0,46	0,24	0,24
Mo	5,2	19	22	9
Na	9 521	82	47	41
Ni	35	0,69	0,61	0,34
P	6 998	0,14	0,11	0,08
Pb	118	0,10	0,06	0,04
S	12 993	1,4	2,6	0,7
Sb	0,4	16	5,40	3,50
Se	0,8	100	62	62
Si	391	3,4	4,1	2,1
Tl	1,4	0,93	0,60	0,32
U	1,4	0,14	0,07	0,07
V	22	0,27	0,28	0,10
Zn	1 036	0,18	0,10	0,10
DOC	103 300	2,4	1,6	0,9

Resultaten som redovisas i tabell 18 tyder på att med tillsats av cement och eller cement/Merit minskar lakbarheten av tungmetaller och lösligheten av organiskt kol.

9 Resultatanalys

Undersökningarna indikerar att det är möjligt att få fram användbara fiberaska material för vägbyggandet av de undersökta fiberaskorna. Fiberaskornas tryckhållfasthet utan bindemedelstillsats ligger på ≥ 480 kPa, vilket är en mycket bra utgångspunkt för praktiska tillämpningar. Vattenmätning vid vattenbeständighetstesten eller vattengenomträngning vid permeabilitetstesten tycks inte påverka fiberaskornas tryckhållfasthet.

Frysning-tiningsbeständigheten är den mest kritiska egenskapen med hänsyn till fiberaskornas långsiktiga beständighet. Här avviker de olika flygaskorna från varandra (se tabellen 12):

- Fiberaskorna med FA1² (Stora Enso, Fors) och FA2 (Vargöns Pappersbruk) utan bindemedelstillsats förlorar över 60 % av dess ursprungliga tryckhållfasthet, dvs. dess tryckhållfasthet efter frysning-tiningstesten är 27 – 34 % av tryckhållfastheten (28 d).
- Fiberaskorna med FA3 (Bravikens Pappersbruk) och FA4 (Mälarenergi, Västerås) utan bindemedelstillsats förlorar mindre än 40 % av dess ursprungliga tryckhållfasthet, dvs. dess tryckhållfasthet efter frysning-tiningstesten är över 60 % av tryckhållfastheten (28 d).

Baserat på dessa resultat rekommenderas att fiberaskorna med FA1 och FA2 används med bindemedelstillsats, antingen med byggcement (BCe) eller byggcement blandad med Merit 5000 (BCe+Merit). En tillräcklig mängd bindemedel kan vara mellan 3 och 5 % med avseende på fiberaskans ursprungliga våtmassa. Däremot är det möjligt att använda fiberaskatyper med FA3 eller FA4 utan bindemedelstillsats, men också dessa fiberaskor blir mera beständiga mot minusgrader med en mindre bindemedelstillsats.

Frostbeständighetstesten utfördes endast med en fiberaska (FL:FA1, 1:2) utan och med bindemedelstillsats. Tryckhållfastheten på fiberaskan utan bindemedelstillsats blev efter testen ca 67 % av den ursprungliga tryckhållfastheten, vilket betyder att redan en frysning-tiningscykel påverkar beständigheten.

Vid frostbeständighetstesten bestämdes också segregationspotentialen (SPo) hos fiberaskan. Fiberaskans SPo är $\sim 0,3$ mm²/Kh vilket kan anses som tillräckligt lågt för fiberaskor både utan och med bindemedelstillsats för en applikation i en vägkonstruktion. Tillsats av byggcement tycks förbättra materialets frostbeständighet (lägre SPo). Erfarenheter indikerar att ju större andelen av flygaska i blandningen är desto bättre (dvs. mindre) blir fiberaskans SPo-värde.

Tre olika bindemedels påverkan på fiberaskornas egenskaper har undersökts i projektet. Valet av bindemedel baseras på Ramboll Finlands erfarenheter. Möjligheter att göra jämförelser var dock relativt små, men i alla fall bevisar projekts resultat, att både byggcement (BCe) och dess blandning med Merit 5000 (BCe+Merit) fungerar bra. Byggcements blandning med CaO tycks inte vara så övertygande. Med hänsyn till FoU i Fin-

² OBS. i texten FA = flygaska och FL= fiberlera (eller fiberslam)

land och finska erfarenheter är det sannolikt att härdningsutveckling fortsätter under flera år, när BCE+Merit används som bindemedel.

Bindemedelstillsats förbättrar i synnerhet fiberaskornas frysning-tiningsbeständighet. Geotekniska stabiliseringsundersökningar samt kontrolltester (kapitel 6 och 7) visar, att det behövs relativt lite, 3 – 5 %, bindemedel. En större mängd skulle inte ge någon motsvarande större nytta.

Miljöbedömning har gjorts med hänsyn till komponenternas (flygaskornas och fiberlerablandningens) totalhalter och i synnerhet med hänsyn till fiberaskornas lakning. I tabellen (14) har gjorts en jämförelse mellan de undersökta flygaskornas halter av metaller och de svenska riktvärdena som gäller vid känslig markanvändning (KM) och mindre känslig markanvändning (MKM). Riktvärdena för MKM överskrids med avseende på t.ex. As, B, Ba, Cd, Cu, Pb och Zn. Halterna av zink och arsenik i FA2 är ovanligt höga. Däremot har fiberleran låga halter av tungmetaller. Halten av organiskt kol (i torrsubstansen över 300 g/kg, och vattenlösligt 16 g/kg) är mycket hög i fiberleran.

Lakningsresultaten tyder på att metaller binds till fiberaskan. Resultat från kolonnförsöken visar att de kumulativa halterna vid L/S = 10 ligger under detektionsgränsen för As, B, Cd, Cu, och Zn vid lakning i kolonn. Det är enbart Ba och Pb som finns i detekterbara halter. Halterna ligger på < 1/10 av de riktvärden som gäller för inert avfall. Detta kopplat med att materialet i vissa fall har låg permeabilitet ger att urlakningen av oorganiska ämnen är marginell.

10 Förslag till fortsatt arbete

Undersökningen på fiberaskor var begränsade i projektet med hänsyn till mängden möjliga variabler, dvs. val av olika komponenter som flygaska och fiberlera, val av olika bindemedels påverkan och mängd bindemedel, och urvalet av kontrolltester. Trots detta ser resultaten mycket lovande ut, vilket innebär att det finns behov och möjlighet att utvidga undersökningen. En del av detta utvidgningsbehov kan sammanfattas i följande punkter:

- Materialen (fiberaskorna) skulle testas för de olika beständighetsegenskaperna också efter tre och sex månaders härdning. Vid rapporterade projektet har undersökningar gjorts i laboratoriet och på fiberaskor efter 28 dygns härdning. Enligt erfarenheter fortsätter flygaskornas härdning också länge därefter, och därmed blir materialet beständigare t.ex. mot frysning-smältningssyklar.
- Undersökningar med torr TVL flygaska (F5) (blandad med olika typer av fiberleror). Flygaskan F5 kunde inte användas i projektet p.g.a. dess låga reaktivitet och höga vattenkvot.
- Undersökning av fiberaskor med olika fiberleratyper blandade med olika flygaskor är av intresse för enstaka producenter.
- Undersökning av fiberaskor med olika proportioner av fiberlera och flygaska. Dessa undersökningar skulle kunna förbättra möjligheten till optimering för olika omständigheter.
- Det behövs en fortsatt optimering av bindemedeltillsatsen. Undersökning med olika bindemedelstyper och olika bindemedelsmängder (mellan 1,0 och 4,5 %) är av intresse. Projektets resultat tyder på att tillsats av lämpligt bindemedel förbättrar fiberaskas beständighet i minusgrader.
- Frostbeständigheten har undersökts i begränsad omfattning, dvs. med en fiberaska. Denna undersökning ger viktigt och grundläggande information om fiberaskors egenskaper och bör utföras på flera olika alternativa fiberaskor.
- Baserat på projektets resultat kan provbyggandet påbörjas med följande omfattning: fiberaska som en provvägs bärlager bestående av FL:FA1(1:2) och/eller FL:FA2 (1:2) stabiliserade med 4 % BCE eller hellre med 4 % BCE+Merit, och ostabiliserade fiberaskor FL:FA3 (1:2) och FL:FA4 (1:1).
- Viktiga kontrolltester vid och för provbyggandet är
 - Påverkan av vattenkvoten och packningsgraden på fiberaskans uppförande och egenskaper
 - Påverkan av flygaskans vattenkvot (mängd vatten) och härdningstiden före användning på fiberaskans uppförande och egenskaper
 - Påverkan av fiberaskans (färdigblandat material) mellanlagringstid på dess packnings- osv. egenskaper
- Livscykelkostnader av olika fiberaskor i jämförelse med andra, mera konventionella alternativ behöver kalkyleras för att bedöma fiberaskornas ekonomiska fördelar. Sådana LCC-kalkyler är relativt omfattande och behöver utföras som ett separat projekt efter eller vid sidan om provbyggandet (som skulle producera en del data för dessa kalkyler).

11 Slutsatser

Projektets syfte var att utveckla konstruktionsmaterial för väganläggningar baserade på fiberaskor, dvs. blandningar av fiberleror och flygaskor med eventuella bindemedel. Det finns flertal möjligheter att variera fiberaskans egenskaper genom val av flygaska i blandningen, detta genom olika bränslen och förbränningsprocesser som producerar flygaskor. Motsvarande variation finns för fiberleror från olika producenter, där variabeln är papperstillverkningsprocessen som producerar fiberleror. Dessutom kan proportionen att blanda dessa två komponenter med varandra varieras. Därtill kommer t.ex. bindemedelstillsatsen, både vad gäller kvalitet och mängd. Värmeforsks undersökningsprojekt på "Produkter baserade på blandningar av flygaska och fiberslam för vägbyggande" hade grundats på de erfarenheter, som redan finns med avseende på fiberaskor hos i synnerhet Ramboll Finland. Tack vare detta var det möjligt att starta med de mest potentiella blandningarna för fiberaskor och med ett begränsat testprogram. Undersökningarna har pågått c. tio månader, och resultaten är lovande för att fortsätta med provbyggandet och, om möjligt, med utvidgade laboratorietester.

Undersökningarna har omfattat geotekniska och miljöundersökningar på fyra olika flygaskor, en fiberlerablandning samt deras olika inblandningar utan och med bindemedelstillsats. Utöver dessa undersökningar behöver även ekonomiska kalkyler, liksom en LCC, göras separat t.ex. vid sidan av provbyggandet.

Projektets resultat är att flera tekniskt, miljömässigt och ekonomiskt potentiella fiberaskablandningar har tagits fram och förslag till vidareutveckling har presenterats. Förslag till fortsatta arbeten inkluderar vidare laboratorieundersökningar med olika flygaskor, olika fiberleror och bindemedel i olika proportioner och mängder. Därtill kommer provbyggandet samt en LCC-kalkyl. Provbyggandet är en viktig del i utvecklingsprocessen, som behövs för att utarbeta en vägledning för fiberaskavägar och överhuvudtaget att väcka producenters, entreprenörers, vägverkets och kommunernas intresse för fiberaskabyggandet.

12 Litteraturreferenser

- [1] Mácsik, Josef, Lenströmer, Stina och Nilsson, Thomas 2004. FACE; Flygaska i geotekniska anläggningar. Etapp 1; Inventering/Tillämplighet. Rapport 870. Värmeforsk Service AB. 2004. www.varmeforsk.se.
- [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*.

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk 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