

Potentialbedömning av flygaskor som bindemedelskomponent för stabilisering och solidifiering (s/s) av muddermassor

Anna Wilhelmsson, Göran Holm, Johan Lagerlund, Aino Maijala, Josef Mácsik

**Potentialbedömning av flygaskor som
bindemedelskomponent för stabilisering och
solidifiering (s/s) av muddermassor**

**Potential assessment of using fly ash as a binding
agent for stabilization and solidification of dredged
material**

Anna Wilhelmsson, Göran Holm, Johan Lagerlund,

Aino Maijala, Josef Mácsik

Q9-706

Förord

Föreliggande projekt har utförts som ett samarbete mellan Ramböll Sverige AB, Eco-loop, Sveriges Geotekniska Institut, SGI, Vattenfall och Ramboll Finland OY i syfte att bedöma potentialen för flygaska som bindemedelskomponent för stabilisering och solidifiering (s/s) av muddermassor.

I projektgruppen ingick Anna Wilhelmsson, projektledare, Ramböll Sverige AB, Josef Mácsik, Eco-loop, Göran Holm, SGI, Johan Lagerlund, Vattenfall Research and Development AB, Aino Maijala, Ramboll Finland OY.

Projektet har finansierats av Värmeforsk askprogrammet, Gävle Hamn AB, Vattenfall AB, Nordic Heat Uppsala, Mälarenergi AB och AB Fortum Värme. Ett stort tack till er.

I projektets referensgrupp har ingått Stig Jansson, Cements AB, Olle Jidinger, Vattenfall, Harald Svensson, AB Fortum Värme, Lale Andreas, Luleå Tekniska Universitet, Mats Carlsson, Stora Enso Fors AB, Claes Ribbing och Birgitta Strömberg, Värmeforsk. Ett stort tack för alla värdefulla kommentarer från er i referensgruppen!

Göteborg februari 2010

Anna Wilhelmsson

Abstract

Under kommande år kommer mycket omfattande muddringar i hamnar och farleder att behöva göras. De muddrade sedimenten är delvis förorenade av t.ex. tungmetaller, PCB, PAH och TBT. Genom stabilisering/solidifiering möjliggörs ett nyttiggörande av dessa muddermassor vid uppbyggandet av exempelvis nya hamnområden. Bindemedlet utgör en stor kostnadsdel och utförda laboratorieförsök i detta projekt visar att användning av flygaska som en del av bindemedlet kan ge en stor kostnadsbesparing samtidigt som erforderliga geotekniska och miljömässiga egenskaper uppnås.

Sammanfattning

Under de närmaste åren kommer 200 000–800 000 m³ förorenade sediment med gytjig konsistens, hög vattenkvot och låg hållfasthet att muddras årligen vid utbyggnad av hamnar samt underhållsmuddring av farleder. Dumpning till havs begränsas av att muddermassorna är förorenade och deponering på land kräver transporter och landareal och innebär därmed höga kostnader. Vid uppbyggnad av nya hamnområden används stora volymer bergkross med mera som konstruktionsmaterial. Dessa material kan ersättas av stabiliserade och solidifierade muddermassor, med modifierade geotekniska egenskaper. Metoden att stabilisera/solidifiera förorenade muddermassor har använts under lång tid internationellt [6 och 7] och under senare år även i Norden. I Sverige har bl.a. Gävle Hamn AB och Oxelösunds Hamn AB har fått tillstånd för att återanvända s/s-behandlade muddermassor i hamnkonstruktioner. Återanvändning av de stabiliserade/solidifierade massorna i en geokonstruktion stöds av nya ramdirektivet (2008/98/EG) för avfall där stor vikt läggs vid återvinning

I projektet inventerades flygaskor med avseende på lämplighet och tillgänglighet. Fem flygaskor, enskilda och blandningar, undersöktes i laboratorium som bindemedel, där bindemedelsmixen bestod av 50 % cement, 20 % Merit 5000 och 30 % flygaska. Sediment från Gävle Hamn stabiliserades med en bindemedelsmängd på 150 kg/m³. Tillverkade prov undersöktes med avseende på hållfasthet, permeabilitet och lakningsegenskaper. Potentialbedömningen utgick från teknik, miljö och ekonomi samt marknadens behov och acceptans för stabiliserade och solidifierade muddermassor som konstruktionsmaterial.

Resultaten visar att flygaskor i en bindemedelsmix med byggcement och Merit 5000 har god potential som bindemedel. Det finns ett klart samband mellan CaO-halt hos flygaskorna och tryckhållfasthet hos de stabiliserade proverna, högst tryckhållfasthet erhöles med flygaska med högst halt av CaO. Samtliga stabiliserade prov klarade grundkriteriet på tryckhållfasthet > 140 kPa, med lägst värde på 300 kPa och ett medianvärde på drygt 500 kPa efter 91 dygn. Proven hade låg permeabilitet, mellan 10⁻⁸ m/s och 10⁻⁹ m/s. Lakningsförsöken visar att det stabiliserade materialets utlakning av metaller var låg och organiska föroreningar var knappt detekterbara. En bindemedelsmix med 30 % flygaska ger en kostnadsreduktion för bindemedlet som är i storleksordningen 25 %.

Det ställs höga krav på hamnkonstruktioner vilket innebär höga krav även på kvaliteten hos de bindemedel som används vid stabilisering och solidifiering. Därför krävs det robusta bindemedelsblandningar som klarar variation av flygaskornas och sedimentmaterialens kvalitet, samt eventuell variation av inblandad bindemedelsmängd i det stabiliserade materialet. Behovet av stora bindemedelsvolymer innebär att bindemedelsleverantörerna måste samarbeta och att logistiken för att säkerställa leverans av flygaska i ett s/s-projekt är en process som kräver god framförhållning.

Short English Summary

Over the next few years, about 200 000–800 000 m³ of contaminated sediments, with a muddy, slimy texture, high water ratio and low strength, shall be dredged annually in the development of ports and maintenance dredging of navigable waterways. Dumping at sea is limited since the dredged materials are contaminated. Land disposal requires transports and land area and is thus high in costs. In the construction of new port areas, large volumes of crushed rock, etc. are normally used as construction filling materials. These materials can be replaced by stabilised and solidified dredged materials, with modified geotechnical properties. The method of stabilising / solidifying (s/s) contaminated dredged materials has been used internationally for a long period of time, Holm et al. (2009) and, in more recent years, even in the Nordic countries. In Sweden, for instance, the Port of Gävle and the Port of Oxelösund have received permissions to reuse s / s-treated contaminated dredged materials in the port structures. Reuse of the stabilised / solidified masses in a geotechnical structure is supported by the new Framework Directive (2008/98/EC) on waste where great emphasis is placed on recycling.

Within the project, fly ashes were inventoried with respect to suitability and availability. Five fly ashes, both individual fly ashes and mixtures of different fly ashes, were investigated in the laboratory as a binder component in a binder mix consisting of 50% cement, 20% Merit 5000 and 30% fly ash. Sediment from the Port of Gävle were stabilised with a binder mixture amount of 150 kg/m³. Produced samples were examined in terms of strength, permeability and leaching. An assessment of the fly ashes' potential was performed based on technological, environmental and economical aspects, as well as market demand and the acceptance of stabilised and solidified dredged materials as construction material.

The results show that fly ash, together in a binder mixture with construction cement and Merit 5000, has good potential as a binder. There is a clear correlation between the CaO content of fly ashes and compressive strength of the stabilised samples, whereas maximum compressive strength was obtained with the fly ash with a maximum content of CaO. All stabilised samples passed the basic criterion of compressive strength > 140 kPa, with the lowest value being 300 kPa and with a median of just over 500 kPa after 91 days. The samples had a low permeability between 10⁻⁸ m / s and 10⁻⁹ m / s. Leaching tests showed that the stabilised material's leaching of metals was low and that organic pollutants were barely detectable. A binder mixture with 30% fly ash provides a cost reduction of the binder of approximately 25%.

High standards are required for port constructions, which means high demands on the quality of the binders used in the stabilisation and solidification processes. Therefore, a sturdy binder mixture that is capable of handling a variation in the quality of fly ash and sediment materials, plus a variation in the binder quantity involved in the stabilised material. The need for large volumes of binders means that binder suppliers must cooperate and that the logistics needed to ensure delivery of fly ash in an s / s project is a process that requires good preparation.

Executive Summary

Background

Dredging for the development of ports and the maintenance dredging of waterways and ports means that large volumes of contaminated sediment need to be taken care of. The most troublesome are the sediments that are fine-grained and contaminated with metals, organic or organometallic (e.g. organotin) contaminants. Over the next few years, about 200 000–800 000 m³ of contaminated sediments have to be handled annually due to maintenance dredging and port expansions. Gävle Port alone shall dredge up to 1 million m³ of metal contaminated sediments during the years 2012–2014. These dredged materials are characterized by a muddy texture, high water ratio and low strength. The possibility of dumping at sea is limited since the dredged materials are contaminated. Moving the dredged materials to disposal sites on shore requires transportation and land area resulting in high costs. There is a great need to expand ports which means that large volumes of crushed rock and other earth materials are required to be transported to the port for the use in conventional construction of new port areas.

The project STABCON (www.stabcon.com) has shown that a binder consisting of cement (construction cement) and Merit 5000 (steel slag), after stabilisation and solidification (s / s), can modify dredged materials so that predetermined geotechnical and environmental characteristics can be achieved. These masses can be used as filling materials in port structures and even replace crushed rock as filling material. Binder recipes are site specific and depend on, for example, sediment type/ dredged materials, contaminant type, contaminant content, etc. Stabilisation and solidification (s / s) means that binder is added to soft sediment / dredged materials in order to modify the strength, permeability and leaching characteristics. Stabilisation means that contaminants are chemically transformed into less mobile forms whilst solidification is a process which transforms the masses into a solid form leading to an increased strength, improved deformation characteristics and reduced permeability of dredged materials. The use of s / s treated contaminated dredged material in geotechnical constructions have been described in STABCON by Holm et al. (2009).

Aims & Objectives

The aim of this project was, from technical, environmental and economic aspects, to investigate the potential for a fly ash, or a combination of fly ashes, to be used as the components of a binder in the stabilisation and solidification of contaminated dredged material.

The target audience has principally been port owners and other commercial proprietors whom are facing projects where contaminated sediments are to be disposed of. Binder producers, specifically fly ash producers, are also naturally targeted.

Potential Assessment

This Potential assessment has been carried out on five different fly ashes in a binder mix together with construction cement and Merit 5000 for s /s contaminated sediments from the Port of Gävle. The fly ashes' potential was evaluated both by an inventory based on literature studies and interviews with fly ash producers and by laboratory

investigations (characterisation) of fly ashes, sediments and mixtures of binders and sediment. This capability assessment has been based on engineering, environmental, economic and market needs and acceptance. The project also presents results from laboratory tests on fresh and wet storage of fly ash as a binder component in a mixture with only construction cement (Fossenstrand 2009).

Fly Ash as a Binder Component

Selection of appropriate binders and binder amount is site-specific since sediment water ratio, mineral composition, grain size distribution of organic content and the contaminant content varies from place to place. Through a series of laboratory and pilot testing in the field a suitable binder composition and binder quantity is developed for each project based on functional requirements of the design. To demonstrate that performance requirements are met, the stabilised material's strength, permeability, etc. must reach predetermined levels. The required compressive strength is typically between 100 and 300 kPa and permeability should normally be $<10^{-8}$ m / s. In addition, the leaching of pollutants shall be tolerably low. Construction cement (C) and Merit 5000 (M) are the most commonly used binders today (www.stabcon.se). In a series of laboratory tests, various fly ashes' potential to replace some of the C / M in the binder has been studied. The fly ashes, which have been part of the capability assessment, are from Vattenfall Uppsala, Västerås Mälarenergi, Fortum Värtan, Katrinefors Värmeverk (Power plant), Stora Enso Fors AB and Stora Enso Hylte, see Table 1.

Table 1 Fly ashes which were studied in the capability assessment.

Producer	Oven Type	Fuel
Vattenfall Uppsala Thermal Power Plant	Powder	Peat and timber shavings
Mälarenergi Västerås	CFB	Biofuel, recycled timber & peat
Fortum Värtan	Pressurised CFB	Coal + (olive seeds)
Katrinefors Kraftvärme AB	BFB	Sludge + recycled paper
Stora Enso Fors AB	CFB	Bark, pellet, wood chips
Stora Enso AB Hylte	CFB	Sludge + RT-chips

The following fly ashes and mixtures of fly ashes were investigated:

- A1 – Vattenfall Uppsala Thermal Power Plant
- A2 – Mälarenergi Västerås
- A3 – Fortum Värtan
- A4 – Mixture of A1/A2/A3 with the proportions 33/33/33 %
- A5 – Mixture of 50 % A4 and 50 % fly ashes from Stora Enso Hylte/Stora Enso Fors/Katrinefors Värmeverk with the proportions 33/33/33 %.

The results show that all the stored dry fly ashes are fine-grained in silt fraction with very small variations in grain size distribution. It is noted that the wet storage of fly ashes leads to a slight increase in particle size. Wet storage, with a water content of about 20% during less than three months, leads to the fly ash losing some of its hardening capacity and its pH decreases. Even access to the free lime (CaO) decreases during storage. The fly ash's loss of ignition (LOI) increases with the formation of crystalline water during wet storage while its CaO (active) content decreases. This may have implications leading to a need for an increase in the quantity of cement to obtain the neces-

sary compressive strength. The results show that the compressive strength decreases if wet-stored fly ash is used in the stabilised samples compared with the use of dry fly ash instead.

Sediment

Sediments from the Port of Gävle entry channel are sulphatic silty sediments with approximately 5% organic content (TOC). Water quota is between 329 and 370%. The sediment's pollutant content and pollutant levels were compared to those in some other Swedish ports and therefore can be considered representative of sediment in Swedish ports.

S / S Treatment – Properties in Terms of Technology and Environment

Fly ashes A1–A5 were used as a binder together with C / M. No clear correlation between the key parameters of fly ashes and the obtained compressive strengths of the stabilised samples can be identified, except that the minimum compressive strength was obtained with the fly ash with lowest CaO content and the maximum compressive strength with a maximum content of CaO. The binder composition was 50% cement, 20% Merit 5000 and 30% fly ash (A1–A5). The amount of binder was 150 kg/m³. Figure 1 presents the compressive strength results summarized for the stabilisation of the two sediments and the five different binder mixtures. All binder mixtures A1–A5 passed the basic criterion of compressive strength > 140 kPa after 91 days, see Figure 1. The median of the investigated sediments' compressive strength was more than 500 kPa after 91 days and the minimum compressive strength was about 300 kPa, which was achieved with A2. The highest value was achieved with A1, around 780 kPa. All samples yielded permeability values between 10⁻⁸ m / s and 10⁻⁹ m / s after 91 days. Since batch test were performed on the stabilised material, the leaching of organic pollutants is barely detectable. Even the leaching of metals was low in these tests.

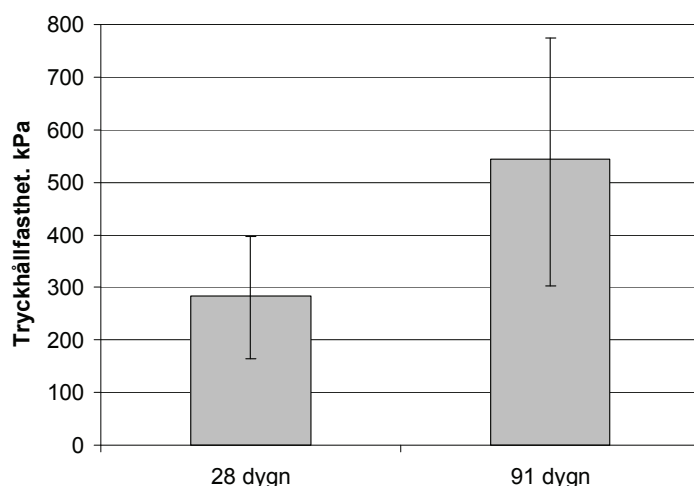


Figure 1 Compressive strength results as median, maximum and minimum values of the binder mixtures A1–A5 for the investigated sediments. The amount of binders was 150 kg/m³ – the recipe mixture was C / M / A (50/20/30), where A is A1–A5.

Finances

In a s / s project, there are usually large volumes of dredged material to be stabilised, which require large volumes of binders. Normally, the binder quantity is 100–200 kg/m³

dredged material but also up to 300 kg/m³ can occur. With traditional commercial binders such as cement and Merit 5000, with a market value of approximately 800 Swedish krona/tonne, the cost of 100–200 kg/m³ binders are around 80–160 Swedish krona/m³ dredged material. The cost of binders represents about 80% of the total cost of stabilising and may vary depending on the price of cement and Merit 5000. The cost of fly ash has been estimated at 100–200 Swedish krona/tonne. Additional factors affecting the cost are transportation, storage, etc. If a portion of the binder consists of fly ash a significant cost reduction can be obtained. A binder amount of 150 kg/m³, which comprises 30% fly ash, creates a cost reduction of the binders by 25%. It is possible that an optimization of the binder recipe may cause the proportion of fly ash to be > 30%. Large cost reductions are therefore possible.

Use of multi-component binders requires logistical competence. The need for good logistics is large, since several manufacturers of fly ash are needed to deliver sufficient quantities during a limited time period. Since several fly ashes may be relevant for use, the complexity of the project increases, which may lead to increased costs. Transport of dry fly ash and the dry storage of fly ash, have corresponding requirements, as for cement and Merit 5000. The cost of transport depends primarily on the distance between the fly ash supplier and the current port. Transport of wetted fly ash (5–20%) can be done in the “bulk” and can be stored on site, which means a lower cost than for a completely dry fly ash. The storage period is limited by the fly ash’s reactivity, i.e. how quickly the fly ash hardens and the amount of water added. If there is a sufficiently low water ratio, all the “free” lime will not react with the added water. The need for quality assurance increases if the fly ash is stored wet compared to dry.

Market – Needs and Acceptance

The method of stabilising / solidified contaminated dredged materials has been used for a long time internationally, Holm et al. (2009) and, in recent years, even in the Nordic countries. In Sweden, there are several examples of planned projects in the ports that have been authorized to use the s / s method for the disposal and recycling of material, including the Port of Gävle AB and Oxelösunds Port AB. The Port of Gävle AB received permission in 2008 after only making one application to the Environmental Court. Oxelösunds Port AB's permission to use s / s method was later upheld after an appeal and finally established at the Environmental Supreme Court. Since the method has been accepted by the Supreme Court, a praxis has been established to use the method in future permit application processes. Another important aspect is that s / s treatment of dredged material, and the use of the stabilised / solidified masses in geo-technical structures, means that the masses are reused, which is supported by the new Framework Directive (2008/98/EC) on waste where great emphasis is placed on recycling. The Framework states that disposal should only be accepted in cases where other options are impossible.

When selecting the method for taking care of contaminated dredged materials, a holistic approach should be applied, i.e. technological, economical, environmental and social aspects should be considered. A decision tool based on this approach (Multi-Criteria Decision-tool) has indicated that s / s method is the most suitable methodology. s / s method can be said to be the best available technology (BAT). Many ports have shown

great interest in the s / s method, not least because it allows utilization of the contaminated masses and simultaneously reduces the need to use finite resources and reduce the environmental impact from transport.

Conclusions and Further Investigations

The conclusion is that the project, through conducted laboratory studies, has shown that there is potential for the use of dry fly ash as a binder component in s/s- projects. The project has also shown that wet storage of fly ash has a potential as a binder component in s / s projects. This is especially interesting because thermal power plants do not produce fly ash from May to October, which means that there will be a need to store fly ash. Wet storage, however, affects the quality of fly ash, in part through reduced hardening ability. There is therefore a need to further investigate how wet storage of fly ash shall be quality assured, and how different properties are affected by wet storage. It would also be of interest to investigate different methods to activate a wet stored fly ash.

Generally, high demands and standards are required of geotechnical structures built in ports, which subsequently means high demands on the quality of the binders used for stabilisation / solidification. A quality assurance of the binder mixture means that the binder mixture shall meet the requirements of each individual project, and be a sturdy binder mixture that is capable of meeting variations in

- the fly ash quality,
- the sediment quality,
- the binder amount in the stabilised material (this depends on the choice of the stabilisation method).

Mixtures of various different fly ashes will often be needed to meet project production rate, which accentuates the quality and accuracy requirements even more. The need for large volumes of binders means that binder suppliers must cooperate and that the logistics needed to ensure delivery of fly ash in an s / s project is a process that requires good preparation.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	SYFTE OCH MÅL	1
1.3	METOD OCH TILLVÄGAGÅNGSSÄTT	1
1.4	UNDERLAG OCH PARALLELLA PROJEKT.....	2
1.5	AVGRÄNSNING.....	2
2	STABILISERING OCH SOLIDIFIERING AV FÖRORENADE MUDDERMASSOR	3
2.1	FRAMTIDA MUDDRINGSVOLYMER	3
2.2	HANTERING AV FÖRORENADE MUDDERMASSOR	4
2.3	STABILISERING/SOLIDIFIERINGSMETODEN	5
3	LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR	11
3.1	ARBETSMETOD	11
3.2	INGÅENDE MATERIAL.....	12
3.3	BEDÖMNINGSKRITERIER FÖR SEDIMENT, BINDEMEDEL OCH STABILISERAT SEDIMENT	17
4	RESULTAT OCH ANALYS	19
4.1	KARAKTÄRISERING AV SEDIMENT OCH BINDEMEDEL	19
4.2	S/S-BLANDNINGAR.....	22
4.3	ANALYS.....	34
5	BEHOV OCH TILLGÅNG PÅ LÄMPLIGA FLYGASKOR.....	39
5.1	POTENTIellt BEHOV AV FLYGASKOR SOM KOMPONENT I BINDEMEDEL	39
5.2	TILLGÄNGLIGHET AV FLYGASKOR – EN INVENTERING	39
6	POTENTIALBEDÖMNING.....	42
6.1	TEKNISKA OCH MILJÖTEKNISKA EGENSKAPER HOS S/S-BEHANDLADE MUDDERMASSOR	42
6.2	TEKNISKA ASPEKTER PÅ BINDEMEDELSKOMPONENTEN FLYGASKA	46
6.3	EKONOMISKA ASPEKTER.....	48
6.4	ACCEPTANS FÖR S/S-METODEN	49
6.5	KVALITETSASPEKTER I BYGGANDE.....	50
7	DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	51
7.1	KRITERIER	51
7.2	BYGGPROCESSEN.....	53
8	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSARBETE.....	55
9	LITTERATURREFERENSER	56

Bilagor

1	PM1 INVENTERING
2	GEOTEKNISKA RESULTAT (TOTALHALTER ASKOR, KORNFÖRDELNINGSKURVOR FÖR ASKOR OCH SEDIMENT SAMT TRYCKHÅLLFASTHET OCH PERMEABILITETSTESTER PÅ BLANDNINGAR)
3	SAMMANSTÄLLNING AV TOTALHALTER I SEDIMENT SAMT LAKNINGRESULTAT

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Gävle hamn kommer tillsammans med Sjöfartsverket utföra en muddring för att förbättra sjösäkerheten i inseglingsrännan under perioden 2012–2014. Den totala volymen förorenade muddermassor har beräknats till 1 miljon m³.

Huvudkomponenterna i bindemedel som användas för att stabilisera och solidifiera muddermassor är normalt cement och merit. Beroende på typ av sediment, dess geotekniska egenskaper och föroreningssituation kan också andra komponenter i bindemedlet aktualiseras för att åstadkomma en optimal lösning, egentligen en optimal bindemedelsmix. I projektet STABCON har flera av dessa identifierats, exempelvis aktivt kol, flygaska och järnsulfat (www.stabcon.com, www.stabilgrunn.no).

Med tanke på de stora volymerna muddermassor som ska s/s-behandlas i Gävle hamn och de stora kostnader förknippade med användningen av bindemedel har ett starkt önskemål varit att undersöka möjligheterna att använda flygaskor som ett kompletterande bindemedel. Resultaten skulle även kunna appliceras på andra hamnar i liknande situation.

1.2 Syfte och mål

Syftet med detta projekt var att utifrån tekniska, miljömässiga och ekonomiska aspekter utreda potentialen för en flygaska eller en kombination av flygaskor att nyttjas som ingående komponent i ett bindemedel vid stabilisering och solidifiering av förorenade muddermassor.

I projektet ingår även att lyfta fram kritiska frågeställningar vid användning av flygaska som bindemedel som är viktiga att utreda i fortsatta arbeten.

Målgruppen har främst varit hamnägare och andra byggherrar som står inför projekt där förorenade sediment ska omhändertas. Bindemedelsproducenter och då specifikt flygaskaproducenter tillhör självklart också målgruppen.

1.3 Metod och tillvägagångssätt

Projektet har genomförts enligt följande tillvägagångssätt:

1. Stabilisering och solidifiering – metod och erfarenheter
2. Laboratorieundersökningar
3. Utvärdering av laboratorieresultat
4. Behov och tillgång på lämpliga flygaskor
5. Potentialbedömning inkl diskussion och slutsatser
6. Nyckelfrågor för fortsatta arbeten

Rapporten följer i princip samma upplägg.

För att utvärdera de i projektet ingående flygaskornas lämplighet i s/s-blandningar har både en inventering och laboratorieförsök utförts. Laborationsarbetet har delats upp i huvudsak tre delar, karaktärisering av sediment respektive askor samt försök på stabiliserat sediment.

Behov och tillgång på lämpliga flygaskor har undersökts genom litteraturstudier och intervjuer i inventeringsdelen.

Potentialbedömningen har utförts på sediment från Gävle hamn. Detta sediment har bedömts vara representativt för svenska förhållanden vilket visas i rapporten. Baserat på erhållna resultat kan Gävle Hamn ta fram optimerat recept och underlag till ett planerat pilotförsök som kommer att utföras under 2010.

1.4 Underlag och parallella projekt

Detta projekt har genomförts parallellt med ett projekt för Gävle hamn, Gävle hamn (2009), som syftar till att finna ett bindemedelsrecept med optimal bindemedelsmängd för stabilisering av förorenade muddermassor från hamnen. I bindemedlet är önskemålet att flygaska ska ingå. I detta projekt (Potentialbedömning) har några utvalda resultat från "Gävleprojektet" för bindemedelsmixar med tre andra flygaskor också presenterats.

På initiativ av Vattenfall Research and Development (R&D) har examensarbetet "Stabilisering och solidifiering av muddermassor i Gävle hamn", Fossenstrand (2009) genomförts. Syftet med examensarbetet har varit att undersöka möjligheten att använda bio-flygaska och stenkolsflygaska, både färsk och lagrad producerad av Vattenfall, i olika kombinationer med cement för s/s-behandling av sediment från Gävle hamn.

Ett norsk-svenskt samarbetsprojekt benämnt STABCON¹ pågår och har arbetat med utveckling och kommersialisering av den s.k stabiliserings- och solidifieringsmetoden. Vunna erfarenheter i STABCON utgör en ytterligare utgångspunkt för arbeten i detta projekt.

1.5 Avgränsning

I projektet görs en potentialbedömning. Att ta fram ett optimerat recept för bindemedel utifrån kravspecifikation avseende geotekniska egenskaper och lakningsegenskaper måste ske genom fördjupade studier i varje enskilt projekt.

Flygaskor avses utgöra en delmängd av bindemedlet. I projektet har ingått att bedöma potentialen att kunna nyttja flygaskor från olika producenter som ett bindemedel enskilt eller i en kombination av askor från olika producenter. Detta innebär vidare att ingen direkt jämförelse görs mellan ett bindemedel bestående av enbart cement/merit eller enbart flygaska.

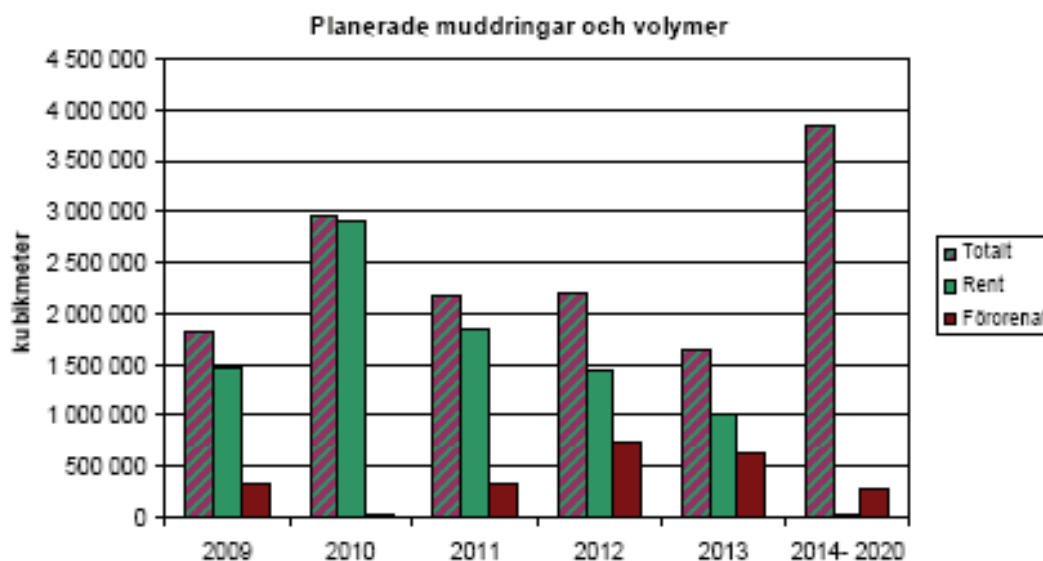
¹ STABCON, www.stabcon.com och/eller www.stabilgrunn.no

2 Stabilisering och solidifiering av förorenade muddermassor

2.1 Framtida muddringsvolym

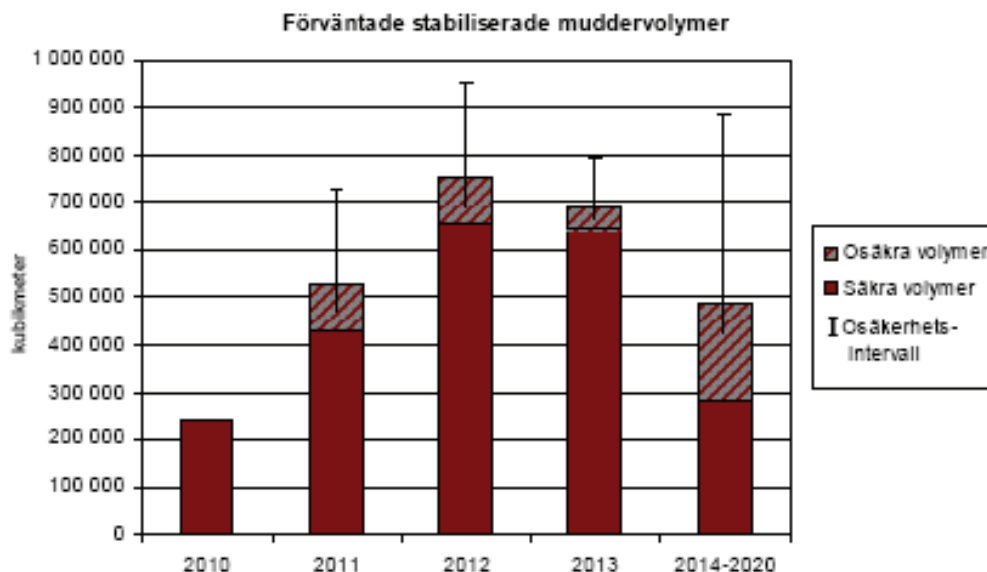
I många svenska hamnar och farleder finns det förorenade sediment. Behovet av muddring i Sverige och i våra nordiska grannländer kommer under de närmaste åren att omfatta miljontals kubikmeter muddermassor. Muddring behöver utföras dels som underhållsmuddring, periodiskt till följd av naturlig avsättning av sediment, dels på grund av fartyg med större djupgående och ökat krav på "clearance" (fritt avstånd mellan fartygsbotten och havsbotten) och naturligtvis även i samband med utbyggnad av hamnar och breddning av farleder.

För att undersöka svenska hamnars muddringsbehov har vid tre olika tillfällen (2005, 2008 och 2009) inventeringar genomförts dels på initiativ av Cementa och dels inom STABCON projektet (www.stabcon.com). I inventeringen 2009 (Svedberg och Erlandsson et al) konstaterades att nästan alla hamnar som var i behov av muddring alternativt hade planer på att utöka hamnverksamheten var intresserade av s/s-tekniken. I inventeringen har volymerna muddermassor som förväntas genereras under kommande år sammanställts, både totalt och enbart förorenade muddermassor, se figur 2.1 och 2.2. Volymerna baseras på 28 planerade muddringsåtgärder.



Figur 2.1 Planerade muddermassvolymerna kommande år. Gröna staplar står för rena massor, röda för förorenade massor och randiga för totala volymen muddermassor (Svedberg och Erlandsson et al, 2009).

Estimated volumes of dredged material in future years. The green bars represent non polluted sediments, the red bars polluted sediments and streaky bars the total volume of dredged material (Svedberg and Erlandsson et al, 2009).



Figur 2.2 Förväntade årliga muddervolymer som kan tänkas stabiliseras. Röda staplar är "säkra" volymer och randiga staplar "osäkra" volymer angivna av de kontaktade hamnarna (Svedberg och Erlandsson et al, 2009).

Estimated annual volumes of dredged material that can be stabilized and solidified. Red bars are "fixed" volumes and streaky bars are "unsure" volumes from the contacted ports (Svedberg and Erlandsson et al, 2009)

Det som kunde konstateras i inventeringen var att hamnarnas kunskap om s/s-tekniken har ökat från 2005 till 2009 och att de volymer muddermassor som förväntas uppkomma är relativt stora de närmaste åren. s/s-tekniken övervägs i dessa sammanhang.

2.2 Hantering av förorenade muddermassor

Det finns ett antal huvudspår för hantering av muddermassor som uppkommer i samband med ett muddringsprojekt. Vilken metod som tillämpas beror på föroreningshalten i muddermassorna, kostnad i relation till nyttan av att använda en viss metod samt de platsspecifika förutsättningarna. De vanligaste metoderna som används i Sverige redovisas i nedanstående tabell samt eventuella krav eller förutsättningar för hanteringen.

Tabell 2.1 Alternativa metoder för hantering av förorenade muddermassor.

Alternative methods for handling polluted dredged material.

Metod	Krav/Förutsättningar	Relativ kostnadsnivå
Tippning till havs	Föroreningshalten i sedimenten måste vara låg för att inte orsaka olägenhet för människors hälsa och miljön. Dispens utfärdad av Naturvårdsverket krävs.	låg
Deponering på land	Uppläggning inom område som utgörs av deponi. Särskilda krav på geologiska barriärer för att hindra läckage. Massornas föroreningsinnehåll avgörande för typ av deponi samt kravnivå.	hög
Utfyllnad av land/vattenområde	Utfyllnad med obehandlade massor av vatten- eller landområde. Kan ske under förutsättning att föroreningsrisken är liten (låga föroreningshalter). Kan kräva invallning.	låg

Metod	Krav/Förutsättningar	Relativ kostnadsnivå
Anläggande av ytor/kajer med s/s-behandlade massor	Inblandning av bindemedel för stabilisering och solidifiering. Kan användas på massor med höga föroreningshalter.	medel

2.3 Stabilisering/solidifieringsmetoden

2.3.1 Princip

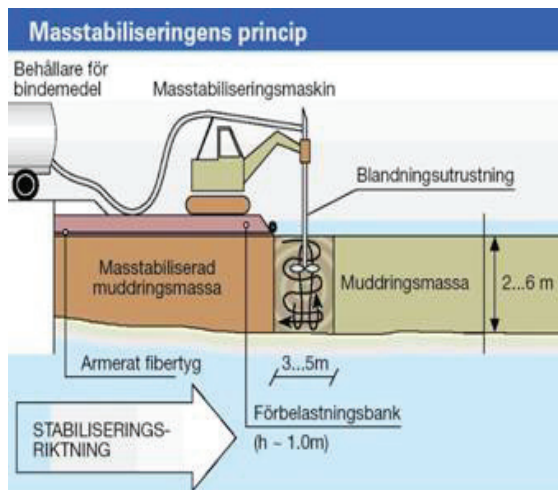
Metoden benämns s/s-metoden (stabilisering/solidifiering) och innebär att man blandar massorna med bindemedel. Stabilisering innebär att föroreningarna kemiskt transformeras till en mindre mobil form och solidifiering att massorna antar en fast form vilket ger en ökad hållfasthet samt förbättrade deformationsegenskaper hos muddermassorna. Härigenom får de sådana egenskaper som möjliggör ett nyttiggörande av de förorenade muddermassor som konstruktionsmaterial vi t.ex. skapande av nya områden på land och exploatering av nya ytor för hamnverksamhet eller annan markanvändning.

I ett s/s-projekt utförs laboratorieförsök och fullskaleförsök för att ta fram mest lämpliga bindemedelrecept (mängd och typ av bindemedel/bindmedelskomponenter). Utgångspunkten för försöken är fastställda kravspecifikationer med beaktande av egenskaper hos de behandlade muddermassorna samt teknik, miljö och ekonomi. Dessa försök ger svar på hur den tänkta konstruktionens ingenjers- och miljöegenskaper utvecklas i materialet/konstruktionsdelen på relativt kort sikt, upp till några månader till år.

2.3.2 Utförande

Rent praktiskt kan s/s-metoden förenklat delas upp i in-situ, ex-situ off-site och ex-situ on-site, där in-situ innebär att muddermassorna stabiliseras där de ligger utan muddring. Ex-situ on-site innebär att massorna stabiliseras efter muddring och placeras som fyllningsmaterial inom invallning eller dylikt inom hamnområdet, medan ex-situ off-site innebär att stabiliseringen utförs på annan plats. Själva stabiliseringen/solidifieringen kan utföras antingen som masstabilisering eller som processtabilisering.

Masstabilisering innebär att en grävmaskin med blandningsutrustning på sin arm blandar in bindemedlet i muddermassorna. Ett bindemedel kan bestå av ett, två eller kanske tre komponenter, t.ex. cement, Merit 5000 (GGBS) och flygaska. Det finns dock en begränsning av vad en masstabiliseringsutrustning klarar av att blanda och det är i nuläget två komponenter. För ett bindemedel med tre komponenter krävs då att t.ex. Merit 5000 och cementen blandas antingen i ett mobilt blandarverk eller på fabrik och blir transporterat till plats. Då ges möjligheten att blanda in flygaska och färdigblandad cement/GGBS direkt i muddermassorna med masstabiliseringsutrustningen enligt figur 2.3. Masstabilisering kan utföras in-situ och ex-situ.



Figur 2.3 Principskiss över masstabilering.
Principle sketch for mass stabilization.

Processtabilering innebär att de förorenade muddermassorna lastas direkt från pråm till processtabileringsutrustningen och i den blandas sedimenten med bindemedlet bestående av en, två eller tre komponenter. Skillnaden mot masstabilering är att inblandningen blir mer "industrialiserad" och därmed blir kvalitén på inblandningen högre, det vill säga mer homogen. Innan inblandning av bindemedel tas prov på muddermassorna vilket avgör hur inblandningen skall korrigeras för att optimera resultatet. Efter inblandningen av bindemedel transporteras massorna till platsen för utfyllnaden.

Som exempel kan nämnas att processtabileringsutrustningen i Åbo, Finland blev försörjd av tre olika bindemedel, flygaska, GGBS och cement. GGBS och cement förvarades i silos och matades därifrån in i anläggningen. Flygaskan förvarades på upplag och transporterades via transportband in i anläggningen. Figur 2.4 visar processtabileringsanläggningen och dess enheter som användes i Åbo.



Figur 2.4 Processtabilisering i Åbo. EU Life-Project Stable. (Life 06 ENV/FIN/195.)
 Process stabilization in the port of Åbo. EU Life-Project Stable. (Life 06 ENV/FIN/195.)

2.3.3 Livslängd – beständighet

Faktorer som kan potentiellt kan ha inverkan, positivt eller negativt, på en s/s-konstruktions livslängd och beständighet anges i tabell 2.2.

Tabell 2.2 Faktorer som inverkar på en s/s-konstruktions livslängd och beständighet.
 Factors that affect the life and durability of an s/s construction.

	Positiv inverkan	Negativ inverkan
Geotekniska egenskaper		
<i>Material, Konstruktionsdel & konstruktionen</i>	Kompression Härdning Permeabilitet Temperatur	Deformationer Sprickbildning Mekanisk/fysikalisk nötning/nedbrytning Tjäle
Miljötekniska egenskaper		
<i>Material, Konstruktionsdel & konstruktionen</i>	Mineralbildning Nedbrytning av organiska föroreningar Adsorption etc.	Kemisk (Vitrering) Svällning/Krympning Utlakning Biologisk nedbrytning etc.

Tidigare erfarenheter från laboratorieundersökningar med cement och Merit 5000 som bindemedel visar att s/s-behandlade muddermassor har mycket låg permeabilitet efter kompression och härdning. Stabiliserade muddermassor som har undersökts har visat sig vara beständiga mot sulfatangrepp, svällning och krympning. Stabiliserade muddermassor bör placeras under frostfritt djup eftersom materialet inte är frostbeständigt.

2.3.4 Kostnadsbild utförda projekt med stabilisering-/solidifieringsmetoden

Kostnaden för efterbehandling genom s/s-är mycket platsspecifik. Många faktorer styr kostnadsnivån varför denna inte kan ges för olika typer av s/s. I tabell 2.3 [5] ges dock kostnader som endast gäller för respektive projekt och kan inte användas för framtida projekt.

Tabell 2.3 Kostnader, behandlade volymer med mera för ett antal nordiska projekt där s/s-metoden använts.

Costs, treated volumes etc for a number of Nordic projects where the s/s method has been used.

Objekt	År	s/s	Förorening	Total volym (m ³)	Bindemedelsmängd (kg/m ³)	Projektkostnad (Euro)
Trondheim	2001	Ex-situ	PCB, PAH, TBT metaller	15 000	180	0,45 milj
Hammerfest	2006	Ex-situ	Metaller, org ämnen	5 000	100	0,21 milj
Barum	2008	Ex-situ	TBT	3 500	160	0,11 milj
Sörnäs strand,	2000	Ex-	Metaller,	10 000	110	0,3 milj

Objekt	År	s/s	Förorening	Total volym (m ³)	Bindemedels-mängd (kg/m ³)	Projektkostnad (Euro)
Helsingfors		situ	PCB			
Nordsjö hamn, Helsingfors	2005	Ex-situ	TBT, PCB och metaller	500 000	130	10 milj
Åbo	2008	Ex-situ	TBT	88 000	250	4,7 milj
Öserumsviken, Västervik	2002	Ex-situ	PCB	160 000	70	7 milj

Variationen i kostnad beror på flera faktorer och är platsspecifik. Ett riktvärde som ofta anges är 100–200 kg bindemedel per m³ behandlade massor. Detta ger en kostnad på 80–160 kr/m³ om bindemedlet kostar ca 800 kr/ton. Kostnaden inklusive blandning per behandlad m³ muddermassor ligger mellan 300–400 kr i snitt. Det största projektet i tabellen ovan sett till behandlad volym, Nordsjö hamn, var kostnaden ca 200 kr/m³. Det kan antas vara rimligt att kostnaden per behandlad m³ massor är lägre i större projekt.

2.3.5 Utförda s/s-projekt

Nedan redovisas några intressanta projekt som genomförts de senaste åren.

Nordsjöhamn

I Nordsjöhamn, Helsingfors, användes s/s-metoden för att behandla muddermassor förorenade med TBT, PCB och metaller. Sedimentet bestod av mjuk lera. Bindemedlet bestod av enbart cement. De stabiliserade muddermassorna placerades i två bassänger. Bassängerna angränsar inte direkt hamnbassängen, men utgör en del av hamnkonstruktionen vilket innebär att de stabiliserade massorna kunde ersätta stora mängder krossad sten och andra material som annars behövs för konstruktionen. Muddringen utfördes genom miljömuddring för att minimera risken för spridning av föroreningarna. Detta projekt har satt nivån för efterföljande s/s-projekt i Finland. Se länken:

http://www.portofhelsinki.fi/content/pdf_pa_svenska/julkaisut/TBT-esite_2004SVE.pdf.

Åbo hamn

Det senaste finska projektet är i Åbo hamn från 2008. Detta projekt har genomförts som ett EU-Life projekt där man för första gången använde processtabilisering. Sedimenten som skulle stabiliseras var kraftigt förorenade med främst TBT och bestod huvudsakligen av mjuk lera och lerig gyttja. Bindemedlet bestod av en blandning av snabbcement, masugnsslagg och flygaska. Flygaskan var en fuktad kolflygaska (vattenhalt ca 20 %) som lagrats på plats mellan 1 vecka upp till 6 månader innan användning. De stabiliserade muddermassorna placerades innanför sprängstensvallar tätade med silt och sand som avgränsade mot strandlinjen. Resultat från fältkontroller visar på att hållfasthetsutvecklingen i fält verkar överensstämma väl med den som uppmätts i laboratorium. Se länken <http://projektit.ramboll.fi/life/stable/>.

Generellt när det gäller de finska projekten har myndigheternas krav varit att det s/s-behandlade materialet skulle klara ett fastställt permeabilitetskrav ($1 \cdot 10^{-8}$ till $1 \cdot 10^{-9}$ m/s). Inga specifika krav avseende halter i lakvattnet har funnits. I både Nordsjöhamn och Åbo hamn var det stabilisering av TBT-föroreningarna som var målet. Laboratorie-

resultat visar att TBT-utlakningen kan reduceras kraftigt efter stabilisering och att flygaskan bidrog till ytterligare reduktion jämfört med enbart cement som bindemedel.

Bærum

I Bærums kommun utanför Oslo genomfördes vintern 2008/2009 ett projekt där ca 3500 m³ förorenade sediment muddrades upp och placerades innanför en spontvägg av betong. Innanför spanten placerades en geotextil som primärt skulle förhindra partiklar från att spridas innan själva stabiliseringen av muddermassorna genomfördes. De stabiliserade massorna skall utgöra grunden för en ny strandpromenad och gästbrygga. Sedimenten innehöll mycket organiskt material. Bindemedelsmängden bestämdes genom laborieförsök till 160 kg/m³ med 50 % cement och 50 % Merit 5000.

Se länken <http://www.stabilgrunn.no/>

Hammerfest

I Hammerfest, Norge genomfördes 2006 ett projekt där ca 5000 m³ stabiliserade/solidifierade förorenade sediment och jord användes i en konstruktion i anslutning till hamnen, ett arktiskt kulturcenter. Kulturcentret har fundament av pelare som vilar på stabil morän. De stabiliserade massorna består i huvudsak av sand och ligger innanför existerande konstruktioner. Massorna var förorenade med organiska ämnen och tungmetaller. Bindemedelsmängden var 100 kg/m³ cement för att klara projektets kvalitetskrav. Se länken <http://www.stabilgrunn.no/>.

3 Laboratorieundersökningar

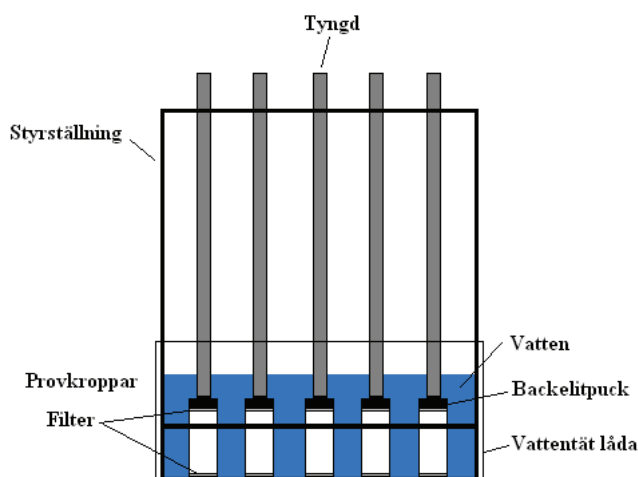
3.1 Arbetsmetod

För att testa de olika askornas lämplighet i s/s-blandningar har både en inventering och laborieförsök utförts. Laborationsarbetet har delats upp i huvudsak tre delar: karakterisering av sediment respektive askor samt försök på stabiliserat sediment.

All tillverkning av provkroppar, geoteknisk utvärdering samt skakförsök är utförda i Vattenfall Research & Development laboratorium i Älvkarleby. SGI i Linköping har utfört provning av provkropparnas permeabilitet och SWECO Geolab har utfört proc-topackning av askorna. För analyser av lakvatten har ALS Scandinavia anlåtats.

3.1.1 Beredning och lagring av provkroppar

Den praxis som tagits fram inom STABCON-projektet har används för provberedning och lagring. Som kvalitetskontrollant har SGI deltagit vid den första beredningen av provkroppar. Proverna har blandats i en hobartblandare under 5 minuters tid. Därefter har de direkt packats ner i provrör. Provrören är av PVC, diameter 50 mm och längd 160 mm, och ett filter är placerat i varje ände för att tillåta dränering av provet. En timme från blandningens början placeras provrören i belastningsutrustningen, se figur 3.1, där de omedelbart belastas. Provkropparna är från och med denna stund helt under vatten. Vatten tillåts komma i kontakt med provet både från under- respektive översidan. Detta möjliggör även att vatten och luft, inneboende i provkroppen, tillåts att dräneras ur under tiden för pålastning. Eftersom provkropparna dräneras har även konsolideringen noterats inför varje tryckförsök.



Figur 3.1 Principskiss utvisande prover under härdning inklusive belastningsutrustningen.

Principle sketch of samples during curing and the loading equipment.

Samtliga prover har under hela sin härdningstid belastats med 18kPa. Provkropparna har vilat i vattenbad i ett kylrum med en temperatur på mellan 6–7°C. Ingen luft har under lagringstiden kommit i kontakt med provkropparna.

Examensarbetet

I examensarbetet ”Stabilisering och solidifiering av muddermassor i Gävle hamn” (Fossenstrand 2009) har provberedningen genomförts på något annorlunda sätt. Provkropparna packades på liknande men ingen belastning påfördes under härdning. Provkropparna låg ej heller i vattenbad. Inom examensarbetet stabiliserades enbart sediment 3 (se nedan i avsnitt 3.2.1).

3.2 Ingående material

I detta avsnitt behandlas vilka material som ingått i laborationsserierna samt de provningar som är utförda på dem. Ingående material är:

- Sediment
- Aska
- Stabiliserat sediment

För samtliga analyser är dubbelprovning utförd om inget annat nämns.

3.2.1 Sediment

Till projektet har två olika sediment från Gävle hamns inseglingränna använts. Dessa betecknas som sediment 2 och sediment 3.

3.2.1.1 Karaktisering sediment

Undersökta värden för båda sedimenten är:

- Skrymdensitet
- Glödförlust (LOI)
- Vattenkvot/vattenhalt
- Odränerad skjuvhållfasthet
- Konflytgräns
- Kornstorleksfördelning (enkelprov)

En miljömässig karaktisering av sedimenten är gjord med avseende på följande parametrar:

- pH
- Elektrisk konduktivitet
- TOC (enkelprov)
- Metaller (totalhalt och skakförsök) L/S=10
- PAH (totalhalt och skakförsök) L/S=10
- PCB (totalhalt och skakförsök) L/S=10
- TBT (totalhalt)

Använda standarder för denna provning finns i tabell 3.1.

Tabell 3.1 Tabell över använda standarder för rutinundersökningarna.
Table showing the standard methods.

Undersökning	-	Standard
Skrymdensitet	Skrymdensitet	SIS-CEN ISO 17892-2
Glödförlust	LOI	SS-EN 15169:2007
Vattenkvot	-	SIS-CEN ISO 17892-1
Skjuvhållfasthet	Konförsök	SIS-CEN ISO 17892-6
Konsistensgräns	Flytgräns	SIS-CEN ISO 17892-12
Kornfördelning	Tvättstikt med sedimentation	SS EN 933-1, SS 027124
pH	-	SS-ISO 10390:2007
Elektrisk konduktivitet	-	SS-ISO 11265
TOC	Leco analys	CSN ISO 10964 och CSN EN 13137
Skakförsök	L/S=10	SS EN 12457-2
Metaller	Totalhalter	*1
Metaller	Lakvatten	*2
PAH	Totalhalter	*3
PAH	Lakvatten	CSN EN ISO 11396
PCB	Totalhalter	EN DIN ISO10382
PCB	Lakvatten	DIN EN 26468, US EPA 8080A och 8081
TBT	Totalhalter	DIN ISO 23161 DAR

*1- Vid analys av As, Cd, Cu, Co, Hg, Ni, Pb, B, Sb, S, Se och Zn gäller: Analysprov har torkats vid 50°C och elementhalterna har TS-korrigerats till 105°C. Upplösning har skett i mikrovågsugn i slutna teflonbehållare med salpetersyra / vatten 1:1. För Sn har analys skett efter uppslutning med omvänd Aqua Regia. För övriga grundämnen gäller : 0.125 g torkat prov smälts med 0.375 g LiBO₂ och upplöses i HNO₃. Analys har skett enligt EPA –metoder (modifierade) 200.7 (ICP-AES) och 200.8 (ICP-MS).

*2- Analys av vattenprov utan föregående uppslutning. Provet har surgjorts med 1 ml salpetersyra(suprapur) per 100 ml. Detta gäller dock ej prov som varit surgjort vid ankomsten till laboratoriet. Vid analys av W har provet ej surgjorts. Vid analys av Se har provet uppslutits med HCl i autoklav (120°C) i 30 minuter. För analys av Ag har provet konserverats med HCl. Analys har skett enligt EPA-metoder (modifierade) 200.7 (ICP-AES) och 200.8 (ICP-SFMS). Analys av Hg med AFS har skett enligt SS-EN ISO 17852:2008

*3- Bestämning av polycykliska aromatiska kolväten, PAH (16 föreningar enligt EPA) Proven extraheras med aceton/hexan/cyklohexan (1:2:2).Mätning utförs med GC-MS.PAH cancerogena utgörs av benzo(a)antracen, krysen, benso(b)fluoranten, benso(k)fluoranten, benso(a)pyren, dibenso(ah)antracen och indeno(123cd)pyren.

Analys av metaller, TOC, PAH, PCB och TBT utförs av ALS Scandinavia AB i Luleå och Täby.

3.2.2 Flygaskor

Samtliga fem ingående askor undersöks. Dessa kommer att betecknas A1, A2, A3, A4, A5. De har alla olika ursprung:

- A1 – bioflygaska, Uppsala värmeverk
- A2 – bioflygaska, Mälarenergi, Västerås
- A3 – kolflygaska, Fortum, Värtan
- A4 – Blandning av A1/A2/A3 med proportioner 33/33/33
- A5 – Blandning av A4/A5b där A5b består av askor från bioflygaskor från Stora Enso Hylte/Stora Enso Fors/Katrinefors kraftvärme. A5b har proportioner 33/33/33 och blandningen A4/A5b har proportioner 50/50

Resultat för ytterligare tre flygaskor från examensarbetet (Fossenstrand 2009) redovisas också:

- A6 lagrad A1 under 3 månader med 20 % vattentillsats
- A7 kolflygaska från Vattenfall Danmark och har kvalitetsklass F (antracit aska)
- A8 kolflygaska från Vattenfall Danmark kvalitetsklass F (antracit aska) som lagrats i 6 månader.

En mer detaljerad beskrivning av deras ursprung inklusive bränsle, typ av panna etc. står att finna i avsnitt 5.2 och tabell 5.1. I bilaga 1, avsnitt 6.2, beskrivs även översiktligt skillnaden mellan kol- och bioflygaska.

3.2.2.1 Karakterisering aska

Karaktärisering av askan utförs på följande parametrar:

- Vattenkvot
- Optimal vattenkvot (proctorpackning)
- Tryckhållfasthet, 28 dygn (torr aska blandat med vatten vid optimal vattenkvot)
- Kornstorleksfördelning (enkelprov)
- Glödgningsförlust (LOI)
- pH
- Elektrisk konduktivitet
- Totalhalter av metaller
- Organiskt innehåll (TOC) (enkelprov)
- Andel aktivt CaO (enkelprov)

Använda standarder för denna provning finns i tabell 3.2.

Tabell 3.2 Tabell över använda standarder för rutinundersökningarna.

Table showing the standard methods

Undersökning	Metod	Standard
Rutin	Vattenkvot	SIS-CEN ISO 17892-1
Packningsegenskaper	Optimal vattenkvot	Proctor
Packningsegenskaper	Maximal skrymdensitet	Proctor
Tryckhållfasthet	Enaxligt tryckförsök	SS 02 71 28
Kornfördelning	Sedimentationsförsök	SS 027124
Glödförlust	LOI	SS-EN 15169:2007
pH	-	SS-ISO 10390:2007
Elektrisk konduktivitet	-	SS-ISO 11265
Metaller	Totalhalter	*4
Organiskt innehåll	TOC	ISO 13137
Andel aktivt CaO	CaO-bestämning	Nordkalk

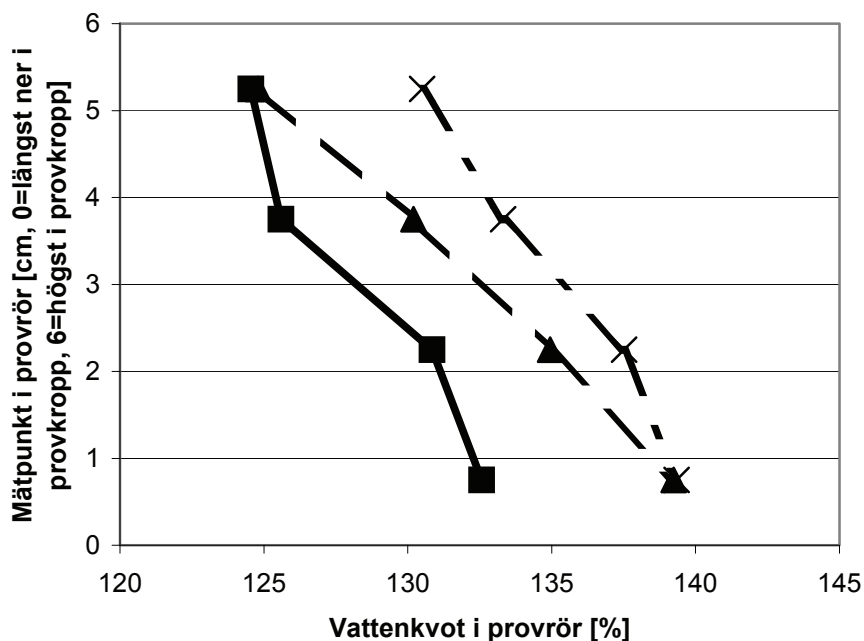
*4- Vid analys As, Cd, Cu, Co, Hg, Ni, Pb, Sb, S, Se, Sn och Zn gäller: Analysprov har torkats vid 50°C och elementhalterna har TS-korrigerats till 105°C. Upplösning har skett enligt ASTM D3683 (modifierad). För övriga grundämnen har upplösning skett enligt ASTM D3682 (LiBO₂ – smälta). Analys har skett enligt EPA –metoder (modifierade) 200.7 (ICP-AES) och 200.8 (ICP-SFMS).

3.2.3 Stabiliserade provkroppar

Tillverkning av provkroppar sker genom inblandning av flygaska eller blandningar av flygaskor med cement (Byggcement CEM II/A-LL 42,5 R) och GGBS (Mald granulerad masugnsslagg, här Merit 5000) i sedimentet. I recepten förkortas cement med C, Merit 5000 med M och flygaska med A. I detta projekt är den totala bindemedelsmängden 150 kg/m^3 . I recepten var andelarna/mängderna konstanta av cement (50 %) och Merit 5000 (20 %) och aska (30 %). Fem olika flygaskor/ nyttjades i försöken.

Vid provtryckning tas provkropparna direkt från belastningsutrustningen till tryckmaskinen. Provkropparna skärs ner till en längd av $100\text{mm} \pm 4\text{mm}$ samt vägs och mäts innan tryckförsöket utförs. Provets tryckhållfasthet utvärderas ur försökets belastning-deformationssamband.

Från resterna av det krossade provet tas ett litet delprov (ca 10g) för vattenkvotsbestämning. Detta delprov tas centralt ur provkroppen då vattenkvoten varierar linjärt med höjden av provkroppen vilket framgår av figur 3.2. Vattenkvoten är högre i botten och minskar med höjden.



Figur 3.2 Vattenkvotens variation i provkropp (längd 160 mm initialt). X-axeln visar vattenkvoten och y-axeln provpunktens position i provkropp. Vid nollpunkt är man längst ner i provkroppen och vid 6 är man högst upp, invid pålasten. Linjerna visar några exempel på hur vattenkvoten kan variera. The water quota's variation in the sample (initial length 160 mm). X-axis showing the water quota and y-axis the position of the test point within the sample. Zero corresponds to the lower part and 6 corresponds to the highest part of the sample, next to the loading. The lines show some examples on how the water quota can vary.

Av de övriga resterna krossas resterna ner till en fraktionsstorlek på <4mm. Detta material används till skakförsöken. Vid skakförsöken blandas det krossade materialet med avjoniserat vatten och får sedan rotera i en trumma på 10 varv/minut under 24h. Denna produkt filtreras därefter och lakvattnet samlas upp på flaskor. Mätning sker direkt av lakvattnets pH och elektriska konduktivitet. Därefter skickas flaskorna för analys.

För celltrycksprovningen (permeabilitet) krossas aldrig provkropparna. Efter 28d har provkropparna transporterats samma dag till SGI där försök påbörjats direkt.

3.2.3.1 Karakterisering stabiliserade sediment

Utvärdering av stabiliserade sediment har skett med avseende på dess **geotekniska** egenskaper samt deras **miljöegenskaper** (skakförsök).

För den geotekniska utvärderingen undersöks följande parametrar. Alla tester sker efter både 28 och 91 dygn. Permeabiliteten har enbart testats efter 28 dygn.

- Tryckhållfasthet
- Densitet
- Vattenkvot
- E-modul
- Permeabilitet

För provkropparnas miljöegenskaper undersöks följande parametrar baserat på skakförsök efter 28d härdning.

- pH
- Elektrisk konduktivitet
- Metaller L/S=10
- PAH L/S=10
- PCB L/S=10

Använda standarder för denna provning finns i tabell 3.3.

Tabell 3.3 Tabell över använda standarder för rutinundersökningarna.

Table showing the standard methods.

Undersökning	Metod	Standard
Tryckhållfasthet	Enaxiellt tryckförsök	SS 02 71 28
Densitet	-	SIS-CEN ISO 17892-2
Vattenkvot	-	SIS-CEN ISO 17892-1
Permeabilitet	Celltryckspermeameter	SGI, Linköping
Skakförsök	L/S=10	SS EN 12457-2
pH	-	SS EN 12457-2
Elektrisk konduktivitet	-	SS EN 12457-2
Metaller	Lakvatten	*5
PAH	Lakvatten	CSN EN ISO 11396
PCB	Lakvatten	DIN EN 26468, US EPA 8080A och 8081

*5 Analys av vattenprov utan föregående uppslutning. Provet har surgjorts med 1 ml salpetersyra(suprapur) per 100ml. Detta gäller dock ej prov som varit surgjort vid ankomsten till laboratoriet. Vid analys av W har provet ej surgjorts. Vid analys av Se har provet uppslutits med HCl i autoklav (120°C) i 30 minuter. För analys av Ag har provet konserverats med HCl. Analys har skett enligt EPA-

metoder (modifierade) 200.7 (ICP-AES) och 200.8 (ICP-SFMS). Analys av Hg med AFS har skett enligt SS-EN ISO 17852:2008.

Analysen i enlighet med ovanstående parametrar utförs av ALS Scandinavia AB i Täby (PAH, PCB) och Luleå (metaller).

Inom examensarbetet har de geotekniska utvärderingarna utförts på provkroppar lagrade i 7, 28 respektive 56 dygn. För miljöegenskaperna valdes vissa serier ut och testades efter 28 dygns härdning med avseende på lakvattnets innehåll av metaller efter skakförsök.

3.3 Bedömningskriterier för sediment, bindemedel och stabiliserat sediment

I detta projekt har bedömningskriterier för sediment, bindemedel och för stabiliserade sedimenten fastställts. I nedanstående avsnitt redovisas:

- att det sediment som använts är representativt för svenska hamnar generellt
- parametrar som påverkar flygaskans kvalitet
- olika provserier av blandningen C/M/A
- krav på det stabiliserade sedimentmaterialet

3.3.1 Sediment

Sedimentmaterialets vattenkvot, organiska innehåll och kornstorlekssammansättning är viktiga faktorer. I detta projekt var kriteriet att använda sediment från Gävle Hamn. Sedimentmaterialet var lerig siltig gyttja med högt sulfidinnehåll och vattenkvot mellan 150 – 400 %. De sediment som användes i försöken hade en vattenkvot mellan 320 och 380 %.

Sedimentet från Gävle hamn har jämförts med sediment från 5 andra hamnar längs Sveriges kust, se bilaga 1.2. I jämförelsen redovisas torrhalt, totalt organiskt innehåll, innehåll av metaller, PCB, PAH och tennorganiska föreningar för respektive hamn samt variationen av medelvärdena för dessa parametrar. Slutsatsen av jämförelsen är att sedimentet från Gävle hamn kan anses vara representativt för svenska hamnsediment.

3.3.2 Flygaskor

Flygaskors kvalitet varierar beroende bl.a. på bränsle, panntyp och förvaring. Därför har det ingått i undersökningen att registrera de olika flygaskornas geotekniska egenskaper som vattenkvot, halt av TOC och CaO med mera. Enbart bio-, torv- och/eller kolflygaskor ingår i försöken.

3.3.3 Stabiliserade muddermassor

I projektet redovisas undersökningar olika provserier (1–3) med varierande bindemedelsmängd och sammansättning:

1. bindemedel bestående av cement (50 %), Merit 5000 (20 %) och flygaska, A1–A5, (30 %), med tillsatsmängd 150 kg/m³.
2. bindemedel bestående av cement (50–80 %), Flygaska A1, A7 och A8 (20–50 %) (*Fossenstrand 2009*)

3. bindemedel bestående av cement (50 %), Merit 5000 (20 %) och flygaska, A6 (30 %), med tillsatsmängd 150 kg/m³ (Gävle hamn).

Provserie 3 (Gävle hamn) redovisas endast översiktligt.

I Gävle Hamn kommer de stabiliserade muddermassorna att nyttjas som konstruktionsmaterial i hamnkonstruktion. Här gäller högt ställda kvalitetskrav på den slutliga konstruktionen. Det ska dock framhållas att såväl de tekniska som miljömässiga kraven i ett projekt där s/s-tekniken ska tillämpas beslutas utgående från platsspecifika förutsättningar och behov.

Grundkriteriet för de stabiliserade muddermassorna i den applikation som blir aktuell för Gävle Hamn är att tryckhållfastheten efter 91 dygns härdning ska vara ≥ 140 kPa. Jämna sättningar är tillåtna i materialet och den färdiga konstruktionen kommer att asfalteras ca ett år efter stabiliseringsåtgärden är utförd. Det stabiliserade materialets permeabilitet ska ha värden $<10^{-8}$ m/s.

Ur miljösynpunkt ska stabilisering leda till att:

1. Lakningsegenskaperna efter stabilisering ska vara likvärdiga eller bättre än före stabilisering.
2. Om kravnivå 1 inte uppfylls ska halterna vara lägre än mindre än ringa risk som anges i Naturvårdsverkets handbok 2010:1, Återvinning av avfall i anläggningsarbeten.
3. Om enstaka ämnen överstiger kriterievärdena i punkt 1 och 2 måste en bedömning göras utifrån ett helhetsperspektiv där hela konstruktionen med dess täthet och beständighet tas med. De s/s-behandlade muddermassorna bildar en monolit efter stabilisering varför lakningsegenskaperna även bör utvärderas med diffusionstest (oförstörande metod). Med helhetsperspektivet avses konstruktionens påverkan på omgivningen och det intressanta är då den totala utlakningen och dess påverkan i förhållande till befintliga förhållanden, dvs projektets miljövinst.

4 Resultat och analys

4.1 Karaktärisering av sediment och bindemedel

4.1.1 Karaktärisering sediment

I detta kapitel följer all data från karaktäriseringen av de två olika sedimenten.

4.1.1.1 Geoteknisk klassificering

Sediment från två olika punkter har karaktäriserats. Orienteringen av dessa två punkter står att finna i Bilaga 1.

Tabell 4.1 Resultat avseende sediment 2 och 3. (Trippelprov.)
Results for sediment 2 and 3 (triple test).

Sediment nr:	2	3
Skrymdensitet [t/m^3]	1,1	1,1
Glödgningsförlust (LOI) [%]	17	14
Vattenkvot [%]	374	329
Odränerad skjuvhållfasthet [kPa]	0,03	0,07
Konflytgräns [%]	201	178

Sedimenten från de två punkterna är snarlika. Båda är av typ lerig siltig gyttja, är lösa i konsistensen och har en lätt odör av svavelväte. Utifrån en geoteknisk klassificering bör sedimenten anses mycket höglplastiska och mycket lösa. Utöver detta klassas dessutom samtliga sediment som mineralisk organisk jord. Ovanstående data tyder på att sedimenten är tagna högt upp i havsbottenprofilen vilket är fördelaktigt, då det är just dessa sediment som avses att stabiliseras. Sedimenten blir vid uttorkning lätt rostfärgad vilket tyder på ett betydande sulfidinnehåll. Detta bekräftas av svavelhalten, se bilaga 1.2.

4.1.1.2 Kornfördelningskurva

Kornstorleksfördelningen av de två sedimenten återfinns i bilaga 2. De två undersökta sedimenten har i storleksordning samma ler- och silthalt och är mycket snarlika. Sedimenten benämns som lerig siltig gyttja.

4.1.2 Miljömässig karaktärisering av sediment

Sedimenten har karaktäriserats avseende totalhalter av metaller, PAH, PCB och TBT föroreningar samt pH, TOC (total organic content) och ledningsförmåga. I bilaga 1.2 redovisas alla dessa resultat för sediment 2 respektive 3. I bilaga 1.2 redovisas även en sammanställning av typiska föroreningshalter från 7 hamnar längs Sveriges kust. Av denna tabell framgår att föroreningshalterna i Gävle hamn är representativa för förhållandena i hamnarna längs Sveriges kust.

I de fall totalanalyser och lakvattenanalyser redovisas används ofta termen *TS*. Denna term syftar på Torr Substans.

4.1.3 Karaktärisering av flygaskor

En fullständig karaktärisering har gjorts av totalt fem askor (A1–A5). En närmare beskrivning av askorna A1, A2, A3, A4 och A5 finns i avsnitt 3.2.2 och i 5.2. I tabellen nedan redovisas även aska A6 och A7 från Gävle projektet och A8 från examensarbetet. Flygaskans kvalitet utvärderas utgående från tekniska data [3] och avfallskaraktärisering (totalhalter), se Bilaga 2.

I tabell 4.2 redovisas de olika askornas egenskaper såsom vattenkvot, optimal vattenkvot, tryckhållfasthet, LOI, pH, elektrisk konduktivitet, TOC och aktiv CaO.

Tabell 4.2 Karaktärisering av samtliga askor. A6 ingår i Gävle Hamnsprojektet markeras med lila raster och A7 och A8 i examensarbetet markerat med blått raster.

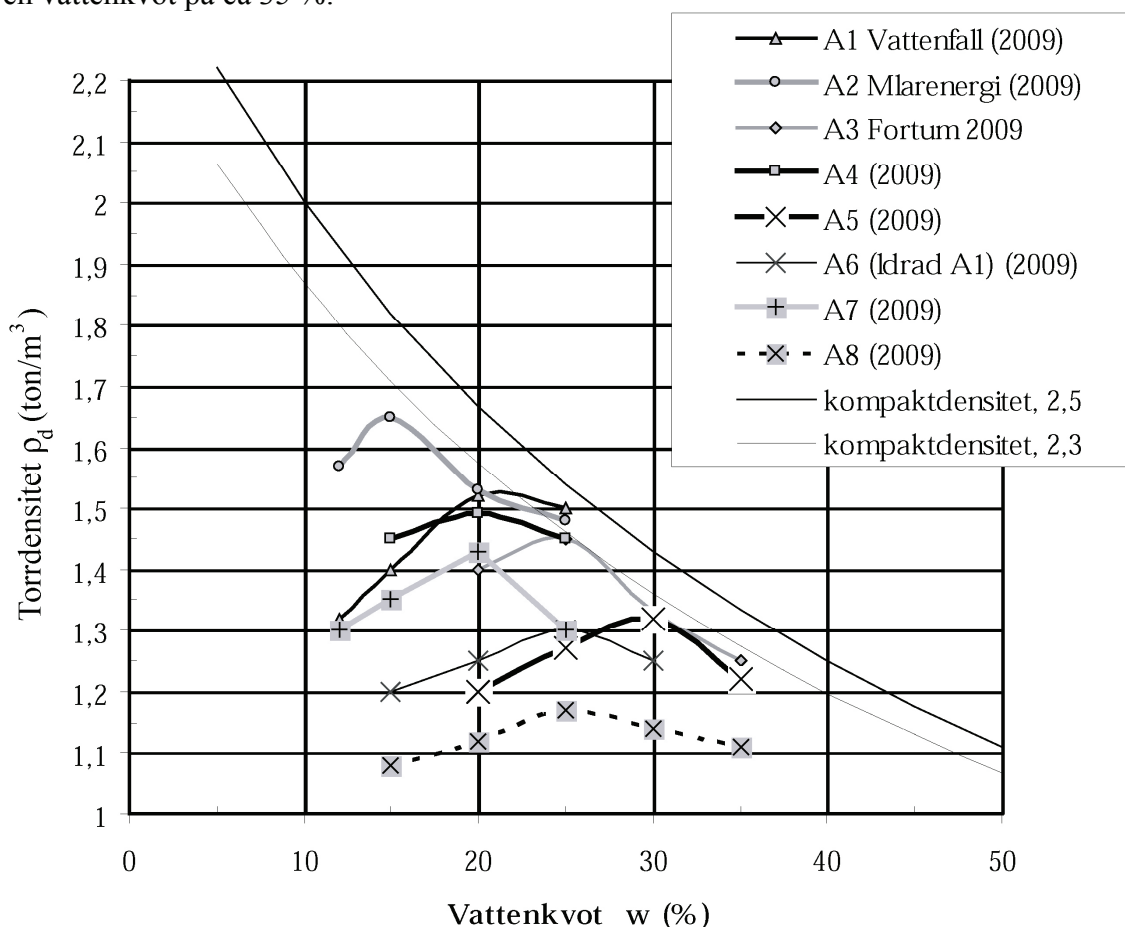
Characterization of all fly ashes. A6 is from the Gävle port project, marked with purple breaks and A7 and A8 are from the diploma work, marked with blue breaks.

Mätning	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Enhet
Vattenkvot	0,0	0,3	0,2	0,2	0,2	6,0	0,1	35,3	%
Opt. Vattenkvot ¹⁾	20	15	25	20	30	25	20	27	%
Torrdensitet	1,52	1,65	1,45	1,49	1,32	1,30	1,43	1,17	ton/m ³
Tryckhållfasthet	654	342	703	327	958	39	216	0	kPa
LOI	11,7	4,8	19,1	11	8,4	19,9	2	7,2	% TS
pH	13,0	12,6	12,8	12,8	12,8	12,8	11,9	10,4	-
E. Konduktivitet	114 9	589	785	767	888	749	1315	24,6	mS/m
TOC	<1,0	2,5	12,3	4,3	2	<1,0	1,9	4,7	% TS
Aktiv CaO	13,1	3,3	4,1	4,8	7,6	6,9	2,4	2,5	% TS

¹⁾ Optimal vattenkvot efter torkning vid 105 grader under 24 h utan hänsyn till vatten som binds till flygaskan och avdunstar på grund av värmeutveckling.

Som det framgår i Tabell 4.2 är flygaskorna A1–A5 och A7 torra. A6 är en befuktad och lagrad flygaska från Vattenfall Uppsala (A1). A8 är en lagrad kolflygaska, men är från en annan anläggning än A7. Flygaskan befuktades till ca 20 % vattenkvot och lagrades sedan under tre månader. Vid packningstillfället var flygaskans vattenkvot ca 6 % och dess halt av aktivt CaO sjönk från 13,1 till ca 6,9 % av TS. De optimala vattenkvoterna ligger mellan 15 och 30% och redovisas närmare i figur 4.1. Flygaskornas torrdensitet varierar mellan 1,17 och 1,65 ton/m³. Lägst torrdensitet har de lagrade/åldrade flygaskorna. Det bör noteras att flygaskornas optimala vattenkvot bestämdes med hjälp av torkning (105 °C) efter packning. Därmed underskattas den optimala vattenkvoten i och med att vatten som binds till flygaskan och vatten som avdunstar inte är inräknad. Vid tillverkning av provkropparna packades flygaskorna för hand, om tre lager där varje lager belastats med 200 kPa (ej med proctor). Att askornas packningsgrad ligger mellan 90–95% beror därmed dels att proverna tillverkades för hand och vid vattenkvot som var lägre än den som krävs för att få igång härdning. A3 (Fortum) har ett högt innehåll av organiska föreningar vilket syns både genom mätning av LOI och TOC. Det prov av A3 som använts har dock en högre organisk halt (oförbränt) än genomsnittet från Fortums anläggning som ligger på 8,7 %. pH värden för A1 (Uppsala) är högt vilket tyder på ett stort kalkinnehåll.

Det bör noteras att våtlagring med en låg vattenkvot på 6 % av A1 under tre månader medför att torrdensiteten minskar från 1,52 ton/m³ till 1,3 ton/m³. Den lägsta densiteten, 1,17 ton/m³, hade A8 som är en kolflygaska som har våtlagrats under sex månader med en vattenkvot på ca 35 %.



Figur 4.1 De undersökta flygaskornas packningsegenskaper (Svedberg et al 2007).
The compaction properties for the examined fly ashes.

4.1.3.1 Kornstorleksfördelning

Kornstorleksfördelning för askor finns i Bilaga 2 Flygaskorna A1–A5 är i siltfraktion och kornstorleksmässigt är snarlika. Mellan 93 och 100 % av partiklarna hos A2–A6 är inom kornstorleksintervallet 2–63 µm. Hos A1 är ca 80 % av partiklarna inom ovan nämnd intervall medan A6 (A1 åldrad vid ca 20 % w under tre månader) var det ca 97 % av partiklarna i intervallet alltså en agglomerering av partiklarna. I A8 är ca 58 % av partiklarna inom intervallet. A4 och A7 har en hackig sedimentationskurva vilket försvårar tolkningen av resultatet.

4.1.4 Miljömässig karaktärisering av flygaskor

En fullständig redovisning av totalhalterna av metaller i askorna finns i bilaga 2.

Innehållet av metaller är snarlik men noterbart är att aska A1 har en betydande större andel av Ca. Man kan också spåra skillnader mellan bioaskorna (A1, A2, A4, A5 och A6) och kolaskorna (A3, A7 och A8). Exempelvis är innehållet av Si mycket högre i kolflygaskorna A7 och A8 än bioflygaskorna. Detta gäller dock inte för kolaskan A3.

4.2 s/s-blandningar

5 st provserier med totalt 18 provkroppar, 9 st per sediment, med olika bindemedel provades enligt nedan:

- 2 st till tryckning vid 28d
- 2 st till tryckning vid 91d
- 3 st för skakförsök
- 1 st för celltryckspermeameter
- 1 st reserv

De fem provserierna hade följande recept:

Tabell 4.3 Provseriernas recept, proportioner samt inblandningsmängd.
The recipes for the mixtures, proportions and total binder amount.

Provserie	Recept	Proportioner	Inblandningsmängd
1	C/M/A1	50/20/30	150 kg/m ³
2	C/M/A2	50/20/30	150 kg/m ³
3	C/M/A3	50/20/30	150 kg/m ³
4	C/M/A4	50/20/30	150 kg/m ³
5	C/M/A5	50/20/30	150 kg/m ³

C = cement, M = Merit, A = aska

Inom examensarbetet utfördes följande blandningar för tre olika inblandningsmängder, 120, 150 och 180 kg/m³, se tabell 4.4.

Tabell 4.4 Recept inom examensarbetet. BiA = bioaska och KA = kolaska.
Bindemedelsmängderna var 120, 150 och 180 kg/m³.

Recipes from the diploma work. BiA=bio fly ash and KA=coal fly ash. The binder amounts were 120, 150 and 180 kg/m³.

BiA / KA	Cement/aska 80 / 20	Cement/aska 70 / 30	Cement/aska 60 / 40	Cement/aska 50 / 50
100 / 0	80 / 20 / 0	70 / 30 / 0	60 / 40 / 0	50 / 50 / 0
70 / 30	80 / 15 / 5	70 / 20 / 10	60 / 30 / 10	50 / 35 / 15
50 / 50	80 / 10 / 10	70 / 15 / 15	60 / 20 / 20	50 / 25 / 25
30 / 70	80 / 5 / 15	70 / 10 / 20	60 / 10 / 30	50 / 15 / 35
0 / 100	80 / 0 / 20	-	-	50 / 0 / 50

4.2.1 Tryckhållfasthet, densitet och vattenkvot

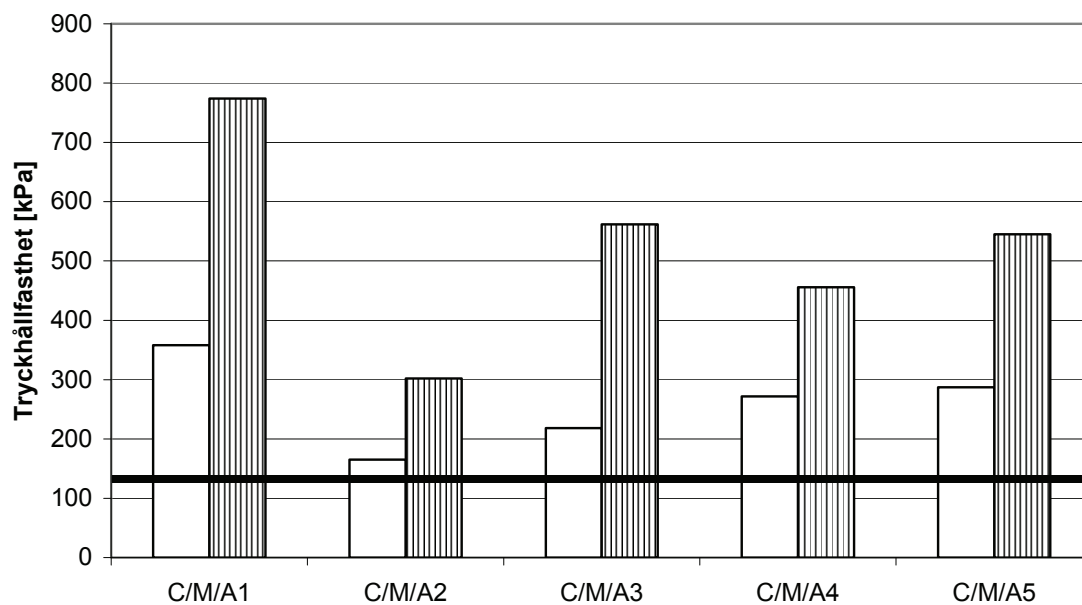
Samtliga redovisade resultat är baserade på dubbelprover. För varje enskilt provs uppmätta värden finns resultaten i bilaga 2.

Vattenkvoterna var överlag mycket jämna med värden mellan 151 och 166 % efter 28d. Efter 91d härdning låg provkropparnas vattenkvoter i intervallet 139–167 %. Efter 91d har i stort sett samtliga vattenkvoter sjunkit jämfört med 28d och en ökad spridning har noterats.

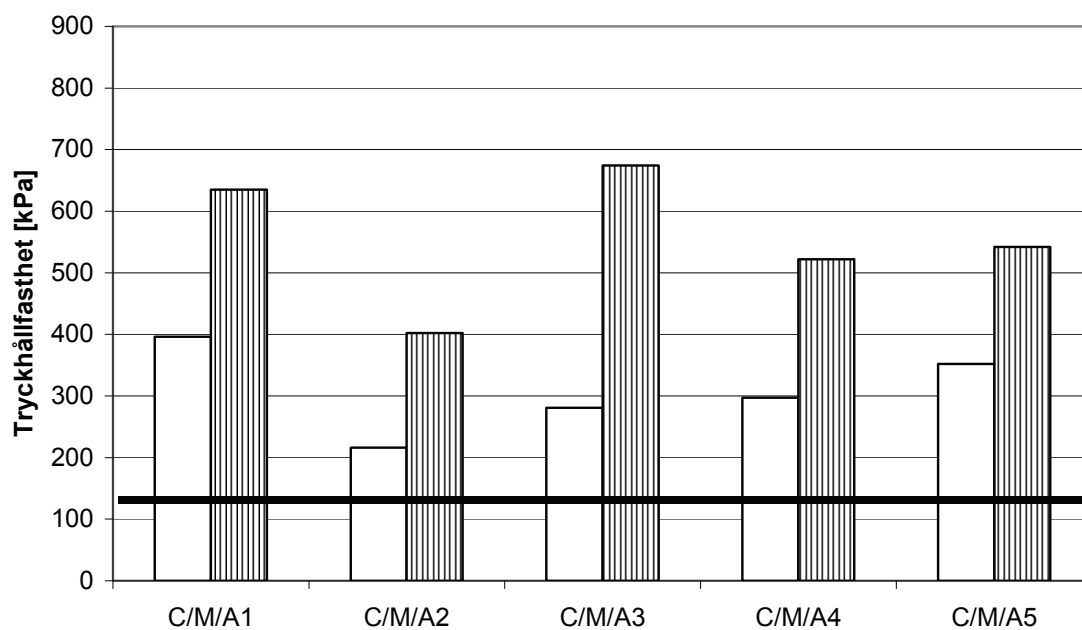
Densiteten hos provkropparna ligger mellan 1,26 och 1,33 t/m³. Det är svårt att uttyda någon skillnad i densitet mellan 28 och 91d med bakgrund av utförd laborationsserie.

Tryckhållfastheterna är höga. Samtliga inblandade askor ger provkroppar vars tryckhållfasthet överstiger 140 kPa vid 91d. Noterbart är att sediment 3 ger högre hållfastheter än då sediment 2 stabiliseras. Denna skillnad beror på sedimentens vattenkvot där sediment 3 har en lägre vattenkvot än sediment 2. Tryckhållfastheterna för respektive sediment och ingående aska redovisas i figur 4.2.

Tryckhållfasthet 28-91d, Sediment 2

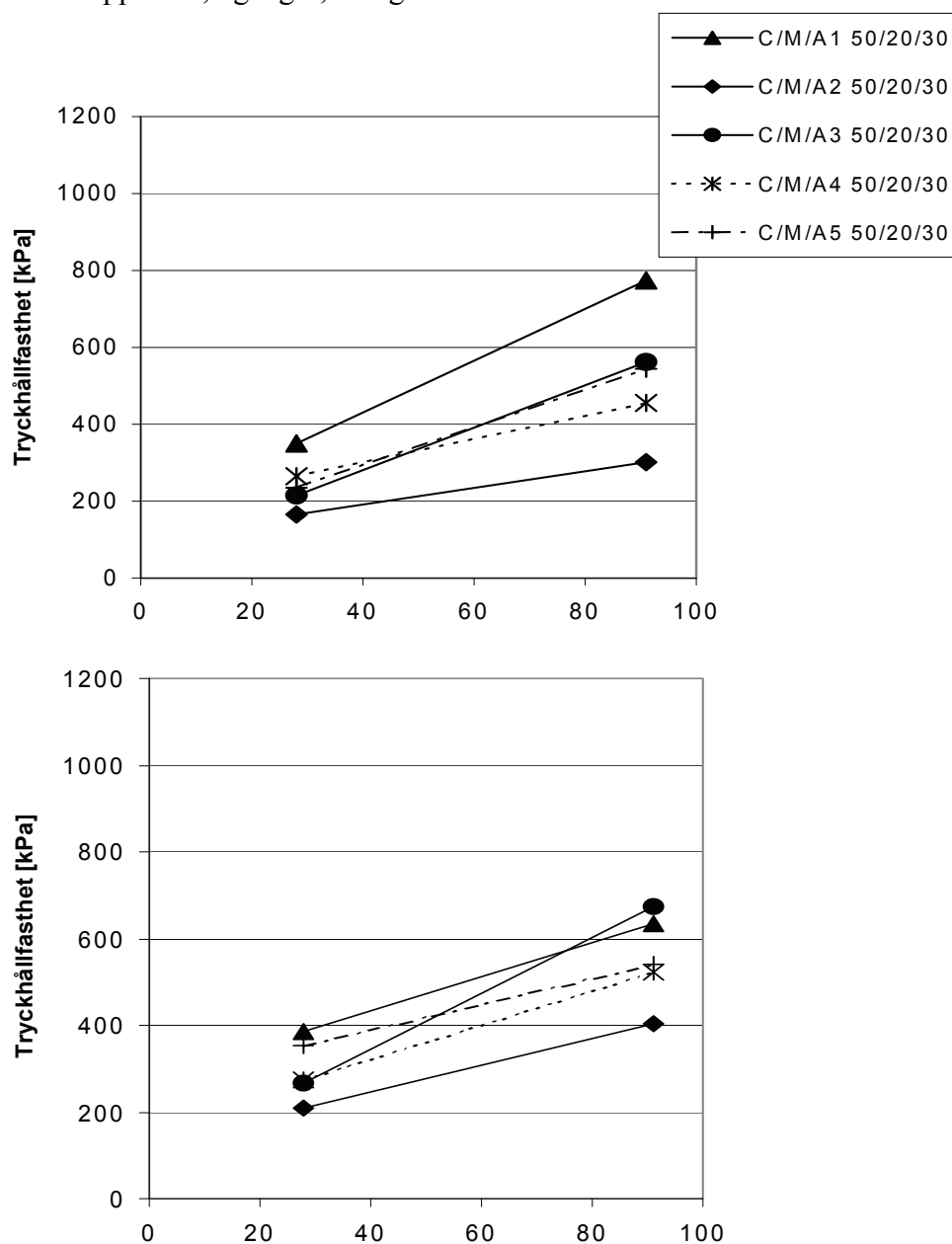


Tryckhållfasthet 28-91d, Sediment 3



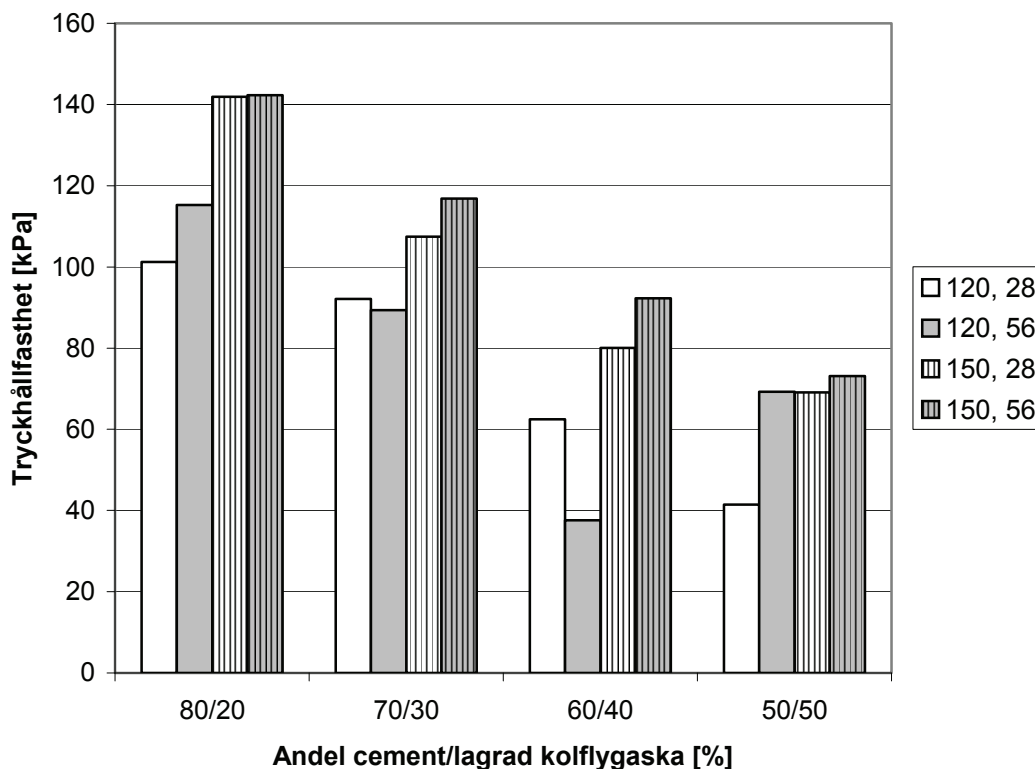
Figur 4.2 Uppnådda tryckhållfastheter vid 28 (vit) samt 91d (raster) för respektive sediment kravnivå för tryckhållfasthet, 140 kPa. (sediment 2 har $w=374\%$ och sediment 3 har $w=329\%$). Compression strength at 28 days (white) and 91 days (streaky) for the two sediments and required level for compression strength of 140 kPa (sediment 2 having a water quota of 374% and sediment 3 329%)

De puzzolana reaktionerna (hållfasthetsökningen efter längre tid, se bilaga 1) påvisas tydligt då hållfasthetsvärden mellan 28 och 91 dygn jämförs. För samtliga blandningar utom då A3 (Fortum) ingår ligger ökningen på ca 1,9 gånger. Då A3 används ökar hållfastheten upp till 2,5 gånger, se figur 4.3.



Figur 4.3 Utveckling av hållfasthet mellan 28–91d för båda sedimenten. Inverkan av de puzzolana reaktionerna syns tydligt på den kraftiga hållfasthetsökningen. X-axeln är härdningstid i dygn. Det översta diagrammet visar sediment 2 och understa sediment 3. Development of compression strength during 28-91 days for the two sediments. The Impact of the puzzolan reactions is clearly visible in sharp increase in strength. X-axis is showing curing time in days. The top diagram is showing sediment 2 and bottom diagram sediment 3.

För examensarbetet (Fossenstrand 2009) uppmättes tryckhållfastheter som framgår av figur 4.4 då inblandningsmängd på 120 samt 150 kg/m³ användes. Provkropparna har lagrats utan belastning och flygaskan är lagrad kolflygaska (lagringstid > 6 mån, wN=36 %).

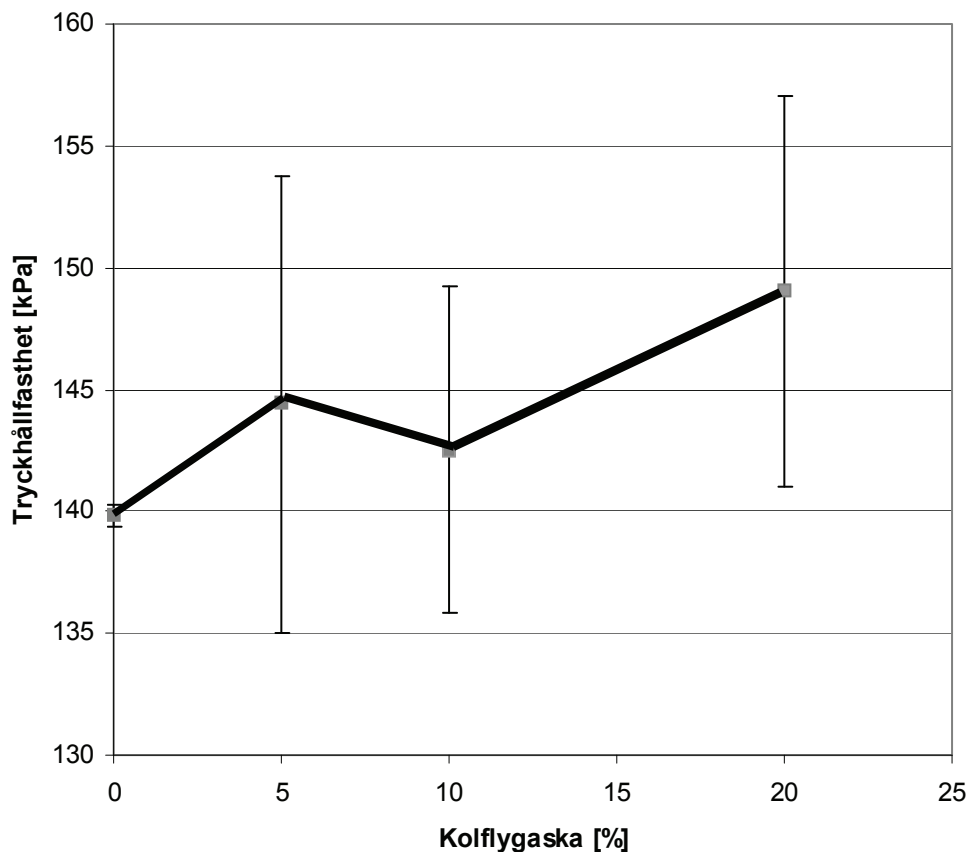


Figur 4.4 Uppmätta tryckhållfastheter efter 56 dygn och utan belastning. Härdningstid 28 och 56 dygn. (Fossenstrand 2009.)

The compression strength after 56 days without loading. Curing time is 28 and 56 days (Fossenstrand 2009).

Noterbart är att det är svårt att spåra en hållfasthetsökning från 28d till 56d. Det kan konstateras att ju högre cementmängd desto högre hållfasthet och ju högre total bindemedelsmängd desto högre hållfasthet. Den lagrade kolflygaskan har använts med sin ursprungliga vattenkvot på 36 %.

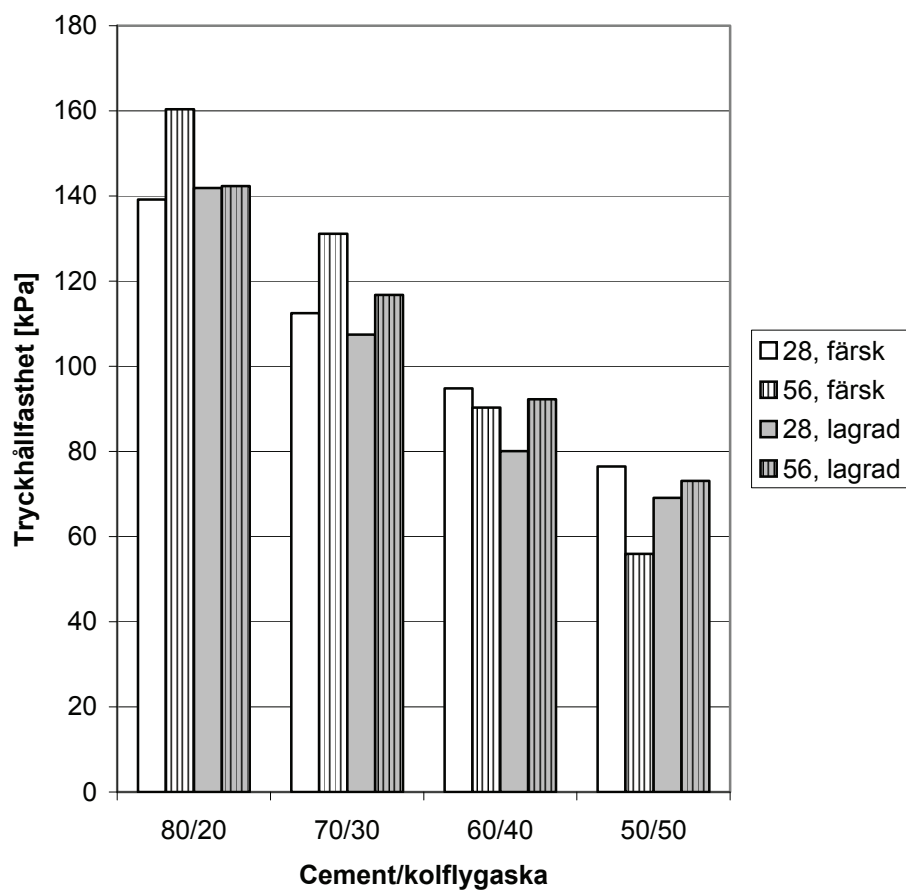
I examensarbetet (Fossenstrand 2009) har även påverkan av ändrad relation mellan bioaska/kolaska på tryckhållfastheten undersökts. Resultat visas i figur 4.5.



Figur 4.5 Figur över uppnådd tryckhållfasthet, blandning 80/20, 150kg/m³, obelastade prover. Kolaskan är lagrad. Summan av askorna är alltid 20 % av det totala dvs, då 5 % kolaska (A8) är inblandat utgörs resterande 15 % av bioaska (A1). Trippelprov (Fossenstrand 2009).
Figure showing compression strength for mixture 80/20, 150 kg/m³, unloaded samples. The coal fly ash is stored. The sum of the ashes is always 20 %, i.e. when 5% is coal fly ash (A8) the remaining 15% is bio fly ash (A1). Triple sample (Fossenstrand 2009)

Figur 4.5 ovan indikerar att bindemedel med lagrad kolaska ger högre hållfasthetsvärden än då färsk bioflygaska används då sediment stabiliseras, dock med större variation än då enbart bioflygaska använts. Slutsatsen är att det krävs 20 % tillsats av lagrad kolflygaska (dvs bioflygaskan ersätts helt) för att vara säker på att tryckhållfastheten inte försämras jämfört med bioflygaskan. En blandning av bioflygaska och lagrad kolflygaska ger större variation i tryckhållfasthet och kan till och med ge lägre värden.

Flygaska A7 och A8 är från två olika kolkraftverk i Danmark och är alltså inte samma flygaska. Dessutom är A8 en lagrad flygaska med 36 % vattenkvot. Av figur 4.6 framgår att tryckhållfasthetsvärdena är jämförbara med marginellt högre tryckhållfasthetsvärden för den färska flygaskan.

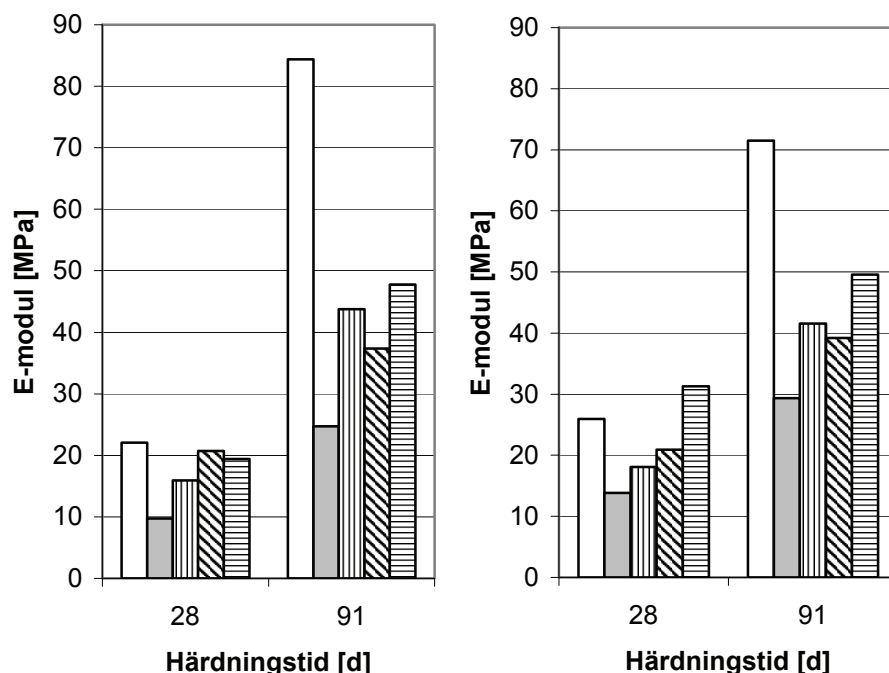


Figur 4.6 Skillnad mellan lagrad (A8) och färsk kolaska (A7) 150 kg inblandningsmängd. Recept på x-axeln (Fossenstrand 2009).

Difference between stored (A8) and fresh coal fly ash (A7) at 150 kg/m³ binder amount. The recipes on the x-axis (Fossenstrand 2009).

I figuren 4.6 ovan framgår att när mängden flygaska i förhållande till mängden cement ökar så sjunker tryckhållfastheten.

4.2.2 E-Modul



Figur 4.7 E-modul för stabiliserade provkroppar med respektive sediment efter 28 respektive 91 dygn. Serierna består av aska A1, A2, A3, A4 och A5 från vänster till höger. Den vänstra bilden visar E-modul för sediment 2 och den högra för sediment 3.

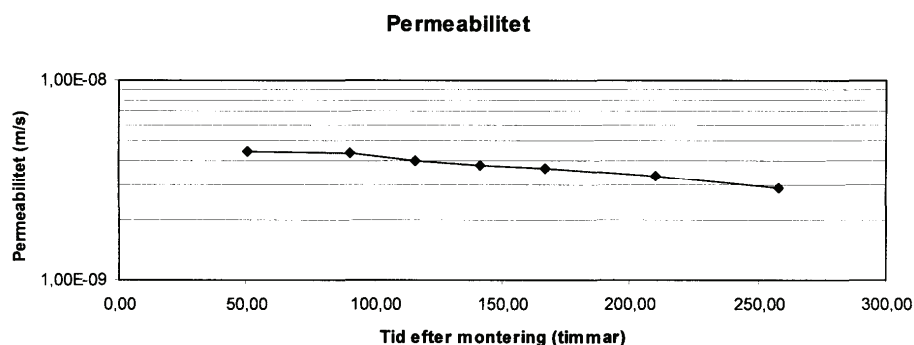
E-module for stabilized samples with the two sediments after 28 and 91 days. The series consists of fly ash A1, A2, A3, A4 and A5 from left to right. The left picture shows the E-module for sediment 2 and the left for sediment 3.

För en jämförelse mellan provkroppar med olika bindemedelsrecept har E-modulen utvärderats som pålagd kraft vid brott och provkroppens brottdeformation. E-modulen beskriver de stabiliserade provkropparnas styvhet där ett högt värde indikerar att provkropparna är styva. De elastiska sättningarna hos en stabiliserad monolit kan grovt uppskattas utifrån den på laboratoriekroppar utvärderade E-modulen.

Förändring i E-modul mellan 28 och 91 dygns härdning följer ett liknande mönster som för tryckhållfastheten. Ökningen av E-modulen blir något kraftigare då sediment 2 stabiliseras jämfört med sediment 3.

4.2.3 Permeabilitet

För mätning av de härdade provkropparnas permeabilitet efter 28d användes celltrycks-permeameterprovning. Endast enkelprover är utförda för varje blandning och sediment. Provningstiden är från 0 till ca 11 dygn. Eftersom permeabiliteten sjunker relativt linjärt med tiden under försökets gång, se figur 4.8, redovisas endast det första samt det sista värdet under mätserierna. Anledningen till den kontinuerliga sänkningen av permeabiliteten är troligtvis en effekt av de puzzolana reaktionerna i provkropparna. För noggrannare redovisning finns de kompletta mätningarna i bilaga 2.



Figur 4.8 Typiskt beteende för permeabilitetens utveckling med permeabilitetsförsökets gång. Figuren visar C/M/A1 50/20/30, sediment 2. Typical behavior of the development of permeability during the experiment. The figure shows C/M/A1 50/20/30, sediment 2.

Tabell 4.5 Permeabilitet hos stabiliserade provkroppar. Sediment 2. Enkelprov. Samtliga värden redovisas i enhet m/s. Permeability of the stabilized samples. Sediment 2. Single sample. All values are shown in unit m/s.

Tid	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5
1 dygn	4,4E-9	1,2E-8	1,0E-8	3,9E-9	1,6E-8
11 dygn	2,9E-9	4,4E-9	6,7E-9	2,8E-9	1,1E-8

Tabell 4.6 Permeabilitet hos stabiliserade provkroppar. Sediment 3. Enkelprov. Samtliga värden redovisas i enhet m/s. Permeability of the stabilized samples. Sediment 3. Single sample. All values are shown in unit m/s.

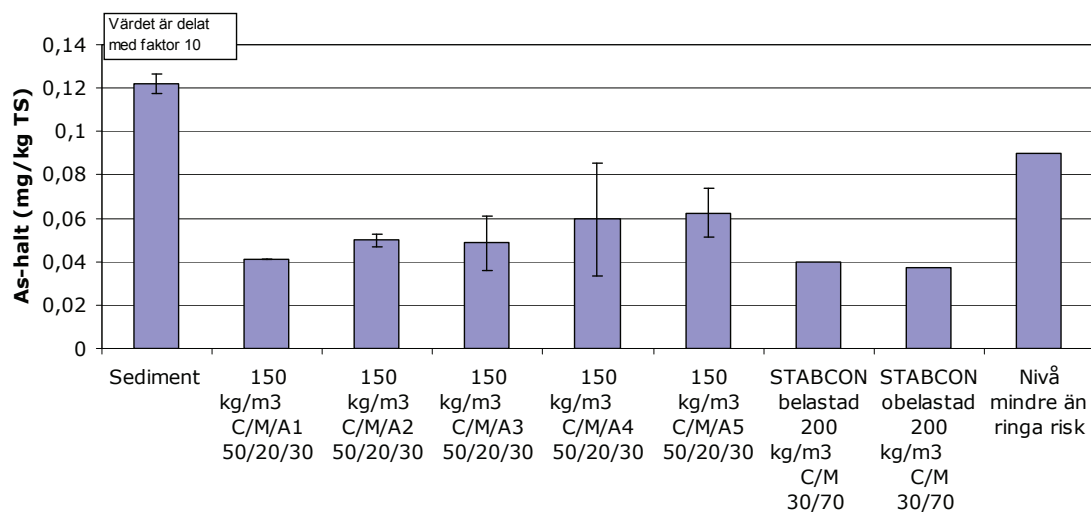
Tid	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5
1 dygn	1,1E-9	6,5E-9	9,1E-9	2,4E-8	3,7E-9
11 dygn	4,7E-10	3,3E-9	6,0E-9	2,4E-8	1,7E-9

4.2.4 Lakningstester på stabiliserat sediment

Sedimenten har karaktäriserats avseende totalhalter av metaller, PAH, PCB och TBT föroreningar samt pH, TOC (total organic content) och ledningsförmåga. Lakningsförsök med skaktest vid L/S=10 har genomförts på sedimentet för att kunna jämföra lakningsegenskaperna före och efter stabilisering. I bilaga 3 redovisas alla dessa resultat för sediment 2 respektive 3. I tabellerna redovisas även resultat från STABCON-projektet för stabiliserat sediment från Gävle hamn där en blandning av cement och Merit 5000 använts som bindemedel.

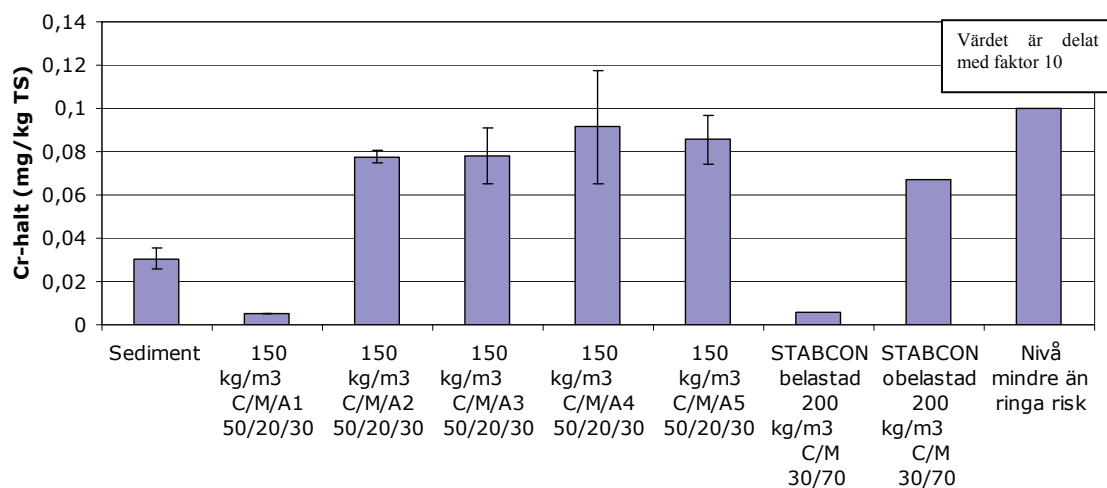
I nedanstående diagram, se figur 4.9–4.15, redovisas ett medelvärde för sediment 2 och 3 samt för de stabiliserade sedimenten. Av diagrammen framgår även max- och minvärde. Diagram har tagits fram för metaller som förekommer i relativt höga halter i sedimentet (enligt totalhalterna) samt för Hg och Ni. De halter som ligger under sin detektionsgräns har redovisats som detektionsgränsen vilket alltså ger ett högre värde än det verkliga. Det ger dock en indikation om nivå. I diagrammen, 4.9–4.15, framgår även nivåer för mindre än ringa risk enligt Handbok 2010:1[8] som jämförelse.

Av resultaten kan konstateras att kvicksilver (Hg) och nickel (Ni) ökar mest i förhållande till det ostabiliserade sedimentet. Flygaska A2 ger de högsta halterna avseende dessa metaller. Flygaska A5 ger de lägsta halterna avseende Hg.



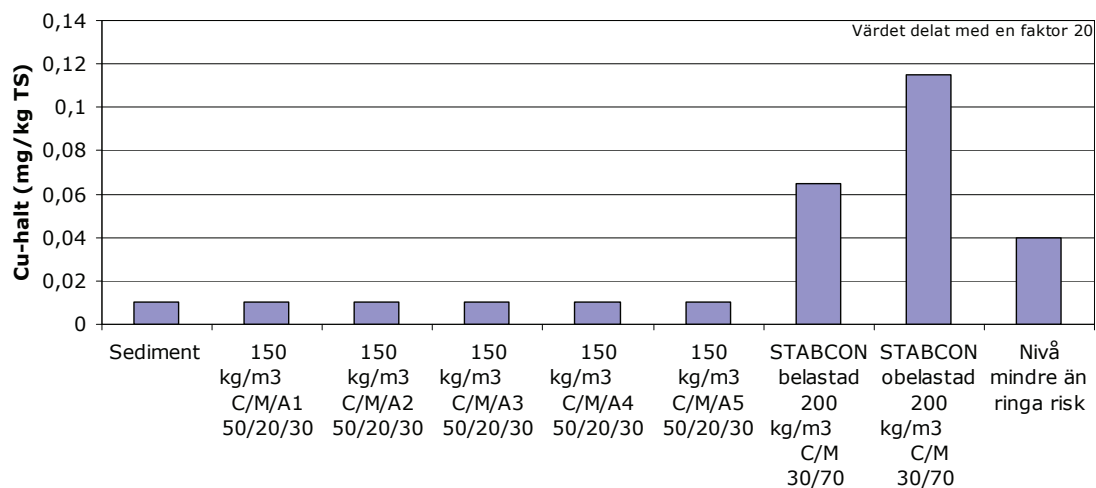
Figur 4.9 Utlakad As vid L/S=10 för ostabiliserat sediment, för blandningar, resultat från STABCON samt nivå för mindre än ringa risk. As-halten från ostabiliserat sediment är delad med en faktor 10.

Leached As at L/S=10 for unstabilized sediment, for mixtures, results from STABCON project and level of less than low risk. As-content for unstabilized sediment is divided with a factor 10.



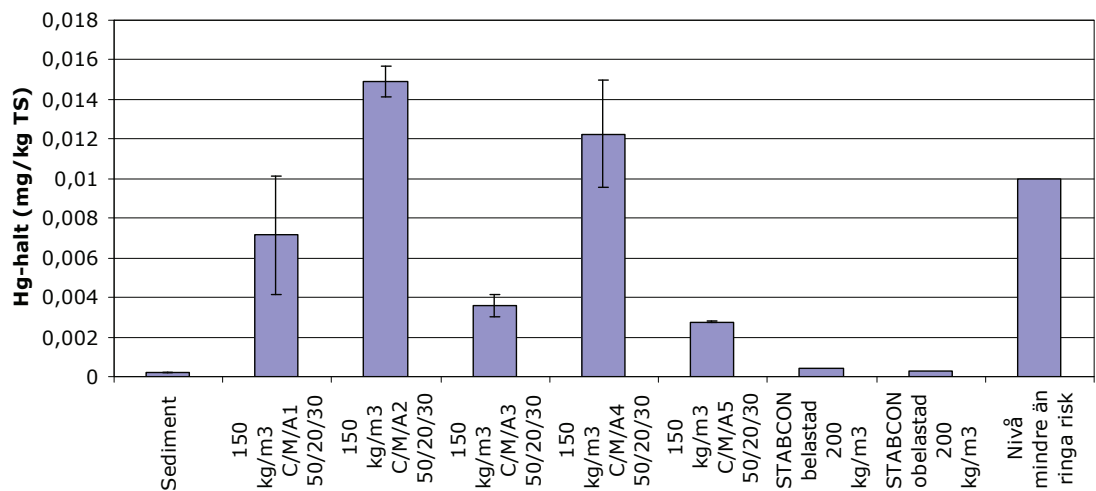
Figur 4.10 Utlakad Cr vid L/S=10 för ostabiliserat sediment, för blandningar, resultat från STABCON samt nivå för mindre än ringa risk. Cr-halten för nivå för mindre än ringa risk är delad med faktor 10.

Leached Cr at L/S=10 for unstabilized sediment, for mixtures, results from STABCON project and level of less than low risk. Cr-content for unstabilized sediment is divided with a factor 10.



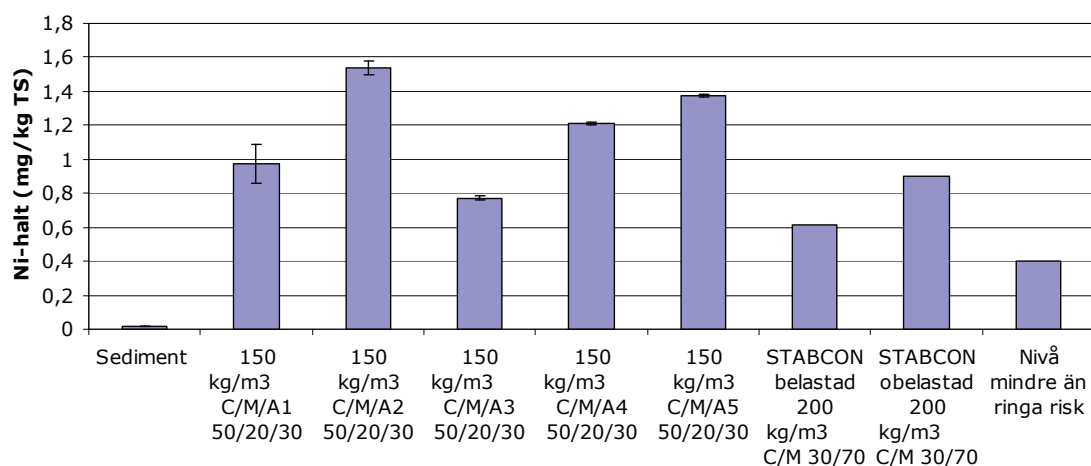
Figur 4.11 Utlakad Cu vid L/S=10 för ostabiliserat sediment, för blandningar, resultat från STABCON samt nivå för mindre än ringa risk. Cu-halten för STABCON obelastad och nivå mindre än ringa risk är delat med en faktor 20.

Leached Cu at L/S=10 for unstabilized sediment, for mixtures, results from STABCON project and level of less than low risk. Cu-content for STABCON unloaded and level of less than low risk is divided with a factor 20.



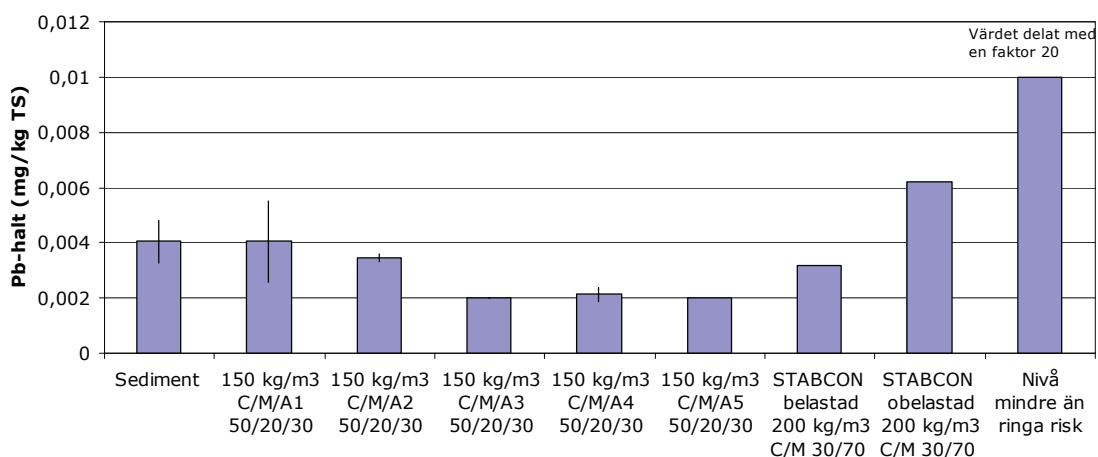
Figur 4.12 Utlakad Hg vid L/S=10 för ostabiliserat sediment, för blandningar, resultat från STABCON samt nivå mindre än ringa risk.

Leached Hg at L/S=10 for unstabilized sediment, for mixtures, results from STABCON project and level of less than low risk.



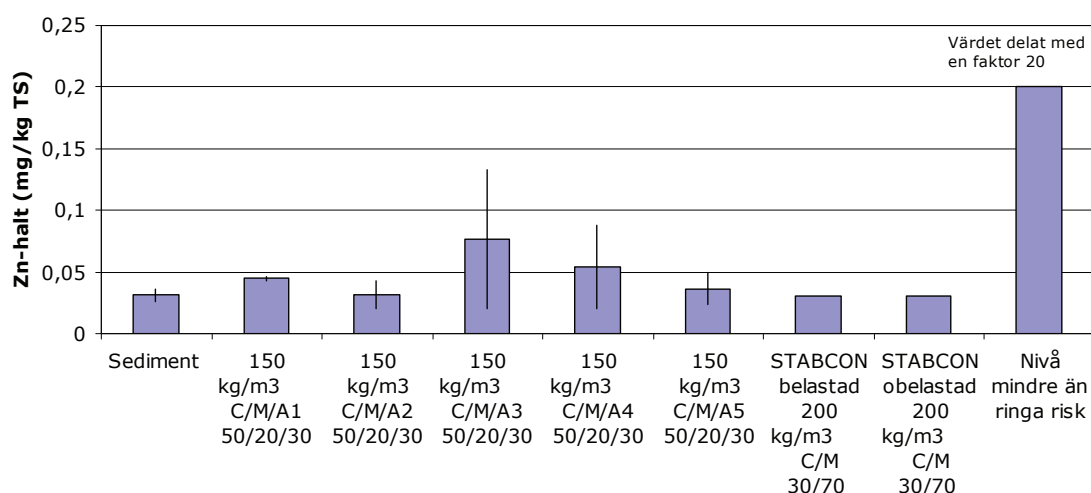
Figur 4.13 Utlakad Ni vid L/S=10 för ostabiliserat sediment, för blandningar, resultat från STABCON samt nivå mindre än ringa risk.

Leached Ni at L/S=10 for unstabilized sediment, for mixtures, results from STABCON project and level of less than low risk.



Figur 4.14 Utlakad Pb vid L/S=10 för ostabiliserat sediment, för blandningar, resultat från STABCON samt nivå för mindre än ringa risk. Pb-halten för nivå mindre än ringa risk är delad med en faktor 20.

Leached Pb at L/S=10 for unstabilized sediment, for mixtures, results from STABCON project and level of less than low risk. Pb-content for level of less than low risk is divided with a factor 20.



Figur 4.15 Utlakad Zn vid L/S=10 för ostabiliserat sediment, för blandningar, resultat från STABCON samt nivå för mindre än ringa risk. Zn-halten för nivå mindre än ringa risk är delad med en faktor 20.

Leached Zn at L/S=10 for unstabilized sediment, for mixtures, results from STABCON project and level of less than low risk. Zn-content for level of less than low risk is divided with a factor 20.

Vid analys av resultaten framgår att för alla analyserade metaller så ligger dessa under nivå för mindre än ringa risk utom Ni och för Hg i två av blandningarna. I detta projekt har enbart skaktester genomförts som innebär att materialet krossas. I verkligheten när monoliten av s/s-behandlat material ligger skyddat i en geokonstruktion är detta mycket osannolikt. I STABCON projektet har även ytutlakningstest av monolit av stabiliserat material genomförts som är ett oförstörande lakningstest. Resultatet var att utlakade halter av tungmetaller blev lägre än vid skaktester undantaget Hg vilket skulle innebära att även Ni klarar nivån för mindre än ringa risk.

4.3 Analys

4.3.1 Tekniska egenskaper

Båda sedimenten är snarlika och bör anses som bra ur stabiliseringssynpunkt. Dess låga innehåll av lera och höga halter av silt och sand innebär att uppnådda tryckhållfastheter blir relativt höga.

Flygaskorna A1–A5 har snarlika egenskaper. Flygaskorna är torra och har kornstorleksammansättning i siltfraktion. Flygaskornas tryckhållfasthetsegenskaper, packningsegenskaper och $\text{CaO}_{\text{aktiv}}$ -halt varierade markant.

Askorna som packades i provkroppar proctorpackades ej. I stället packades de i tre lager där varje lager belastades med 200kPa. Detta ledde till att packningsgraden hamnade mellan 90–95 % vilket gjort att de uppnådda hållfastheterna blivit låga.

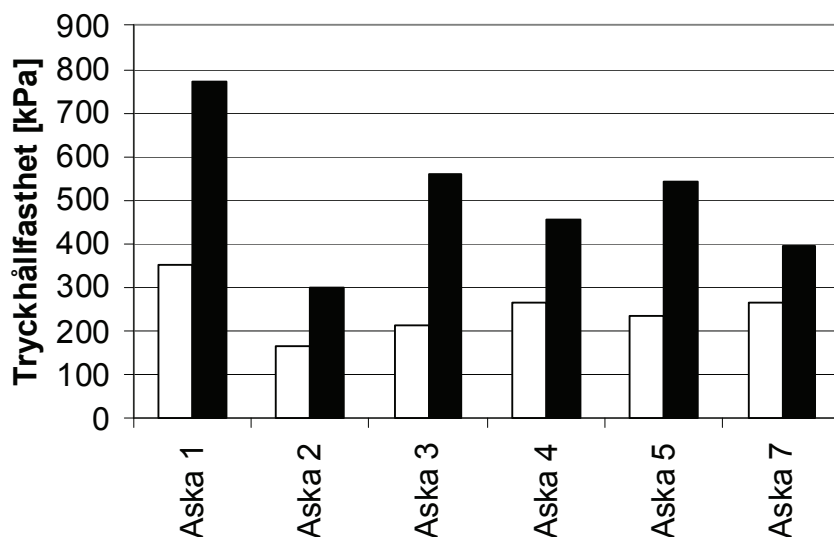
Innehållet av $\text{CaO}_{\text{aktiv}}$ spelar stor roll för de uppnådda tryckhållfastheterna. Skillnaden i hållfasthet, efter framförallt 28 dygn, kan förklaras med askans innehåll av $\text{CaO}_{\text{aktiv}}$. Vid inblandning av askorna i sedimenten reagerar CaO med vatten och bildar kalciumhydroxid enligt (1).



I realiteten innebär detta ett tillägg av cement som i sin tur bidrar till att den initiala hållfastheten blir högre. I samtliga fem serier kan variationerna av 28 dygnshållfastheten förklaras med askornas innehåll av $\text{CaO}_{\text{aktiv}}$. Aska 1 har störst andel CaO och ger provkroppar med högst tryckhållfasthet. Aska 5 har näst högst innehåll av CaO och ger provkroppar med näst högst tryckhållfasthet etc. Den hållfasthetsökande påverkan av CaO höjer också misstankar om att innehåll av humussyror i sedimenten är låga. Organiska jordar, med hög andel av humussyror, försvårar reaktionen mellan CaO och vatten [10]. Mätning av humus i sedimenten är ej utförd.

Vattenkvoten i sedimenten påverkar tryckhållfastheterna både vid 28 och 91 dygn. En lägre vattenkvot ger högre hållfasthetsvärden.

Proverna stabiliserade med 150 kg/m^3 hade tryckhållfasthet mellan ca 160 och 400 kPa efter 28 dygn. Högst tryckhållfasthet uppnåddes med A1 och lägst med A2 för båda sedimenten, se figur 4.16. I denna figur är även A7 inlagd vilket är en färsk kolaska. Mätningar på den danska kolaskan kommer från Gävle hamns projekt och har samma proportioner och inblandningsmängd som A1–A5.



Figur 4.16 Tryckhållfastheter hos stabiliserade prover vid 28 och 91 dygn. Belastat under härdning, sediment 2.

The compression strength of stabilized samples at 28 and 91 days. Samples were loaded during curing, sediment 2.

Efter 91 dygn låg den lägsta tryckhållfastheten för blandningarna på ca 300 kPa för sediment 2 och ca 400 kPa för sediment 3 och erhöles med A2. Det bör dock påpekas att resultaten i fält troligtvis kommer att bli lägre än i labb. En uppskattning är att labbvärdena kan halveras för att erhålla fältmässiga värden.

Härtningsreaktionerna påvisas tydligt då hållfasthetsvärdena ökar mellan 28 och 91 dygn. För samtliga blandningar utom då A3 (Fortum) ingår ligger ökningen på ca 1,9 gånger. Då A3 används ökar hållfastheten upp till 2,5 gånger, se figur 4.3. I A3 finns gips och CaCO_3 istället för CaO från avsvavlingsåterstoden vilket är en skillnad jämfört med övriga flygaskor, se bilaga 1.

En analys av permeabilitetsresultaten visar att de ligger i nivå med kravet på $1 \cdot 10^{-8}$ m/s eller därunder. Även här bör påpekas att permeabiliteten i fält kan avvika från permeabiliteten hos labblandade prover.

4.3.2 Miljötekniska egenskaper

Av resultaten från lakningstesterna som redovisas i avsnitt 4.2.4 framgår att för de flesta metallerna och för alla de organiska ämnena är halterna lika med eller lägre än för ostabiliserat sediment, dvs kravnivå 1 enligt bedömningskriterierna redovisade i avsnitt 3.2 uppfylls.

Halterna av Ni ligger över nivån för mindre än ringa risk. Från tidigare försök i STABCON projektet har också kunnat konstateras att Ni ökar efter stabilisering med cement. Preliminär bedömningen är att Ni kommer från cementen. I projektet FUD-SALA [1] genomfördes lakningstester² på ren flygaska. Vid analys av lakningsresultaten på flygaska från Vattenfall Uppsala (motsvarande A1) kan konstateras att Ni sannolikt inte kommer från flygaskan eftersom halterna från den rena flygaskan är minst en 10 potens lägre än från blandningen med A1.

När det gäller utlakning av Hg kan konstateras att nivån för mindre än ringa risk uppfylls för alla askor utom för A2 och A4. Vid jämförelse mellan stabiliserat och ostabiliserat sediment samt blandningarna från STABCON projektet skulle bedömningen kunna vara att den ökade Hg-halten efter stabilisering är kopplat till flygaskan. Aska A2 innehåller högst halt av Hg sett till totalhalten. A4 innehåller sett till totalhalten dock lika mycket Hg som A3 men blandningen med A3 lakar ca en tredjedel så mycket Hg som blandningen med A4. Emellertid är utlakningen av Hg troligen mer beroende av flygaskans redoxstatus med koppling till dess innehåll av sulfider/sulfater. Ju mindre en flygaska har utsatts för syre desto mindre andel av eventuell HgS (kvicksilversulfid) har omvandlats till HgSO_4 (kvicksilversulfat). I STABCON projektet har man funnit att ökad utlakning av Hg har skett samtidigt som utlakning av svavel har ökat kopplat till ökad potential för oxidation av sulfider till sulfater.

Pb-halterna från lakning av flygaskan är däremot högre en 10 potens högre än för blandningen med A1 vilket tyder på att Pb binds bra vid stabilisering. Samma trend gäller för Zn även om skillnaden inte är lika stor. Utlakning av organiska ämnen är generellt låg.

² Up flow Perkolationstest CEN/TS 14405

I STABCON projektet har också kunnat konstateras att stabiliseringen kan ge en minskad utlakning av organiska ämnen.

4.3.3 Användning av kolflygaska som bindemedelskomponent – Examensarbetet

Examensarbetet och detta projekt skiljer sig på flera punkter vilket medför att jämförelse mellan resultat från dessa två projektdelar försvåras. Trots detta ger examensarbetet bra inblick i skillnader i resultat mellan olika bindemedel baserat på torra respektive lagrade flygaskor, samt hur bindemedelsmängden påverkar hårdningsegenskaperna. Följande skillnader finns mellan detta projekt och examensarbetet:

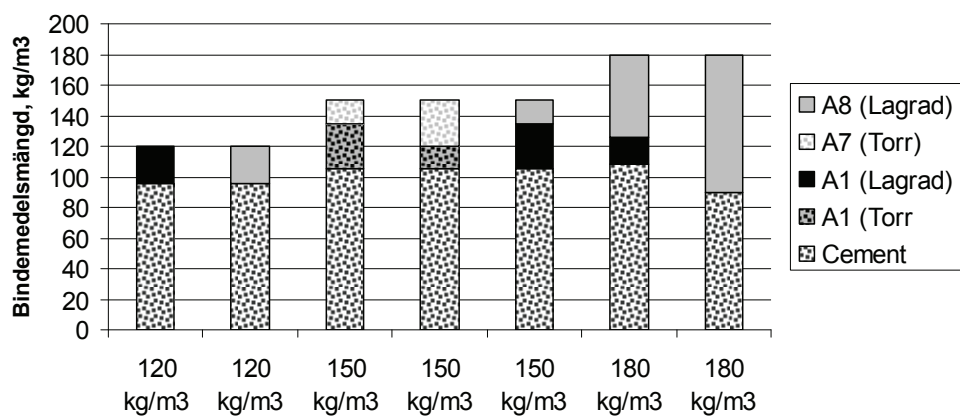
Detta projekt	Examensarbetet
Belastning under hårdningstiden	Obelastad förvaring under hårdningstiden
Byggcement, Merit 5000 och bioflygaskor ingick i bindemedelsmixen	Byggcement och bio-/kolflygaskor ingick i bindemedelsmixen
Sediment 2 och 3 stabiliserades	Enbart sediment 3 stabiliserades
Härdningstiden var 28 och 91 dygn	Härdningstiden var 28 och 56 dygn

Examensarbetet gav dock intressanta inblickar i användandet av kolaska och följande slutsatser kan dras:

- tryckhållfasthetsvärden i storleksordning 140 kPa vid tillsats av 80 % cement/20 % flygaska, och 120 kg/m³ bindemedelsmängd vid 56 dygn
- tryckhållfasthetsvärden i storleksordning 130 kPa vid tillsats av 70 % cement-tillsats/30 % tillsats av flygaska, och 150 kg/m³ bindemedelsmängd
- tryckhållfasthetsvärden i storleksordning >140 kPa vid tillsats av 60 % cement-tillsats/40 % tillsats av flygaska, och 180 kg/m³ bindemedelsmängd.

Resultaten från examensarbetet visar att det krävs minst 100 kg cement för att klara hållfasthetskravet på 140 kPa.

I figur 4.18 redovisas bindemedelsmängd och mix för prover som erhöll i storleksordning 110–120 kPa efter 56 dygn. Mängden cement i provblandningarna varierade från 90–108 kg/m³, samtidigt varierade mängden flygaska mellan 24 kg och 90 kg. Serien saknar en blandning med bara cement som jämförvärde. Detta skulle ha behövts för att se cements bidrag till hållfasthetsutvecklingen. Det bör noteras att den totala cementmängden varierar lite mellan de olika proverna.

Tryckhållfasthet ca 110 - 120 kPa, efter 56 dygn

Figur 4.18 En sammanställning av prov som har tryckhållfasthet på ca 110–120 kPa efter 56 dygns härdning.

A summary of samples having a compression strength of 110-120 kPa after 56 days curing.

5 Behov och tillgång på lämpliga flygaskor

5.1 Potentiellt behov av flygaskor som komponent i bindemedel

Storskalig användning av flygaskor som bindemedel ställer krav på kvalitet och mängd och leverans. Behovet av flygaska till ett större projekt kan bli mellan 50 000–100 000 ton på kort tid. Bindemedelsmängden ligger mellan 100–300 kg/m³. I ett mindre s/s-projekt där 20 000–30 000 m³ muddermassor ska behandlas är behovet av bindemedel 2000–9000 ton varav ca en tredjedel uppskattningsvis kan utgöras av flygaska.

För att kunna leverera flygaska som bindemedel till ett hamnprojekt krävs det därmed stora volymer. Enstaka flygaskproducenter har begränsade möjligheter att kunna leverera dessa volymer. Flera producenter av flygaska kan gå samman och utföra laboratorietester och verifiera stabiliseringseffekten för olika recept på bindemedel.

5.2 Tillgänglighet av flygaskor – en inventering

I den utförda inventeringen, se bilaga 1, har tolv olika flygaskor ingått. Vilka de tolv olika flygaskorna är framgår av tabell 5.1. De flygaskor som ingått i laboratorieförsöken har markerats med grönt raster. Bränslet som är av intresse är biobränslen, bioslam (pappersindustrin), torv och kol eller en kombination av dessa. Enbart större pappersindustrier och värmeverk är askproducenter som bedöms ha kapacitet att leverera lämpliga flygaskor till större stabiliseringsprojekt. Produktionen av flygaska i värmeverk sker generellt mellan oktober och maj, medan pappersindustrin har produktion under hela året med enbart kortare avbrott. Mängden flygaska per bruk varierar mellan några tusen ton per år till 30 000 ton/år. Flertalet av de inventerade askorna är tidigare undersökta med avseende på tekniska egenskaper.

Flygaskorna kartlades med avseende på bränsle, panna, producerade volymer, lagring (kapacitet, metod med mera) och flygaskans kvalitet.

Flygaskors egenskaper varierar beroende på panntyp och bränsle. De vanligaste panntyperna i Sverige är FB (fluidiserande bädd), pulver och roster. FB finns om cirkulerande (CFB), bubblande (BFB) panna och trycksatta pannor (PFBC), se även bilaga 1.

Bränslesammansättningen varierar säsongsvis och mellan olika värmeverk. Kolflygaska används internationellt som bindemedel tack vare att den har liknande härdningsegenskaper som cement och framför allt jämn kvalitet. Hantering och lagring är ytterligare viktiga faktorer som påverkar flygaskors egenskaper.

En viktig förutsättning för att flygaskor ska bibehålla ursprungliga härdningsegenskaper är att dessa förvaras torra. Förvaring av befuktade flygaskor medför att härdningskapaciteten minskar med tiden. Hur mycket och hur snabbt härdningskapaciteten minskar varierar mellan olika flygaskor. Vissa askor är snabbhärdande och härdningskapaciteten avtar redan inom några timmar efter tillsats av vatten. Andra flygaskor påverkas långsammare och kan bibehålla stor del av sin ursprungliga härdningskapacitet i månader.

I inventeringen av flygaskor ingick flygaskleverantörer från Hylte i söder till Skellefteå i norr. Baserat på denna inventering valdes lämpliga flygaskor ut för laboratorieundersökning. Materialegenskaper, tillgång och avstånd till Gävle Hamn var de faktorer som styrde valet av flygaskor till laboratorieundersökningen.

Pappersindustrin producerar flygaska året runt, med en ca månads långt stopp. Panntypen är CFB, BFB och roster. Bränslesammansättningen varierar lite beroende på hur biobränsle och bioslam uppstår och bränns ofta i samma proportioner. Detta ger en förhållandevis homogen flygaska. De flygaskor som redovisas i denna inventering är Stora Enso Fors, Stora Enso Hylte, Holmen Braviken och SCA Ortviken/Östrand. Den totala mängden flygaska som produceras är ca 90 000 ton/år. SCA producerar ca 35 000 ton. På kort sikt har SCA full avsättning för sina flygaskor som konstruktionsmaterial i landfyllnad. Stora Enso Fors producerar ca 2000 ton/år och har avsättning för ca 800 ton/år. Stora Enso Hylte producerar ca 35 000 ton per år där bränslet är avloppsslam avsvärtnings slam från egen anläggning. Hylte bruk har idag avsättning för flygaskan på egen deponi. Hylte ligger dock på ett långt transportavstånd, ca 60 mil, från Gävle men flygaskan kan vara intressant om den kan transporteras eftersom den produceras i stora volymer. Möjligt transportsätt är med tåg eftersom anläggningen ligger ca 50 m från järnvägsspår. Katrinefors Värmeverk i Mariestad använder slam och returpapper som bränsle. Katrinefors har idag avsättning för flygaskan på kommunens deponi men flygaskan kan vara intressant med hänsyn till relativt stora produktionsvolymerna, ca 13 000 ton per år. Transportavståndet till Gävle är ca 35 mil.

Nedan görs en överslagsmässig kalkyl av produktion och lagringsmöjlighet av torr flygaska från Vattenfall Uppsala, Mälarenergi, Katrinefors Kraftvärmeverk och Stora Enso Hylte samt en bedömning av maximal åtgång av flygaska som bindemedel vid processtabilisering. Den dagliga produktionen av flygaska från dessa askproducenter bedöms ligga på ca 270 ton/dag mellan oktober och maj. Lagringskapaciteten för torrlagring av flygaska är ca 2500 m³ (ca 2000 ton).

Processtabiliseringstekniken har idag en maxkapacitet på 275 m³/h. Under förutsättning att stabilisering pågår 24 h och flygaskatillsatsen är ca 50 kg/m³ ger maximal flygaska-åtgång på ca 330 ton/dag. Muddringsvolymen kan bli en annan begränsande faktor, eftersom muddermassorna måste homogeniseras vilket innebär ytterligare ett behandlingssteg innan stabilisering. Samordningen av muddring, stabilisering och bindemedelstillgång är viktiga för ett lyckat projektutförande.

Detta ger att behovet att ha en buffert av ”våtlagrad” flygaska finns. Normalt tillsätts 5–20 % vatten till flygaskan innan den transporteras från anläggningen för att undvika damning i samband med transporten. Vid tillsatts av vatten börjar flygaskan att härda och dess funktion som bindemedel försämras. Mängden vatten och tiden som flygaskan kan reagera är avgörande för härdningsprocessen. Härdningen leder till att flygaskans kornstorlekssammansättning kan ändras. Flygaskors härdningsegenskap är en central egenskap som bidrar till att flygaskor kan nyttjas som bindemedel och kan delvis ersätta exempelvis cement.

Flygaskans tryckhållfasthet vid optimala förhållanden vad gäller vattenkvot och packning utvecklas successivt. Efter ca 90 dygns härdningstid har stor del av flygaskans tryckhållfasthetsutveckling skett. Vattentillsats på 5–20 % vatten räknat på torr flygaska och där flygaskan inte packas leder till att flygaskans härdningsutveckling sker långsammare än vid optimal packning. Erfarenhet från bl.a. Finland visar att reaktiviteten hos en fuktad flygaska minskar under de 6 första månaderna för att sedan plana ut, se bilaga 1 (Inventering).

Flygaskan bör därför lagras med lite tillsats av vatten, upp till 20 %, och under en begränsad tid, upp till 6 månader (muntlig referens A. Maijala) för att behålla tillräcklig bindningseffekt. Studier genomförda av Vattenfall R&D visar att lagrad flygaska kan nyttjas vid stabilisering (Lagerlund 2009) med bibehållen stabiliseringseffekt på det stabiliserade muddermaterialet. Denna flygaska krossades innan inblandning i massorna. Hur mycket denna krossning har påverkat flygaskans härdningsegenskaper har inte utretts i detta projekt.

Tabell 5.1 Flygaskorna som ingick i inventeringen där de grönmarkerade användes som bindemedelskomponent i projektet.

The fly ashes included in the inventory where the green were used as binder components in the project.

	Panntyp	Bränsle	Mängd (torrvikt, ton/år)
Vattenfall Uppsala	Pulver ³	Torv och spån	20 000
Mälarenergi-CFB	CFB (panna 5)	Biobränsle returträ och torv	18 000
Fortum-Värtan	PFBC (trycksatt FB)	Kol och olivkärnor	40 000
Katrinefors Kraftvärme AB (KKAB)	BFB	Slam och returfibrer	13 000
Stora Enso Fors AB	CFB	Bark, skogsflis, torrflis, pellets och fiberhaltigt slam	2 000
Stora Enso AB Hylte	CFB	Slam och RT-flis	35 000
Mälarenergi-pulver	Pulver	Torv och kol (ändras)	30 000
Örnsköldsvik	FB	Flis och torv	Data saknas
UmeEnergi	FB	Flis och torv	Data saknas
E.ON Örebro, ÅP5	CFB	Torv och träflis	8 400 ⁴
Braviken	Roster	Bark, rest från returfiber och RT-flis	5 300
SCA Ortvisen/Östrand ⁵	BFB	Biobränsle och reningsslam	20 000/ 15 000
Totalt	Pulver, FB, CFB, BFB, Roster	Bio, torv eller kol	166 700

³ HWC (fastbränsle eldad hetvattenpanna)

⁴ 2008

⁵ Används till landfyllnad

6 Potentialbedömning

Poängteras bör att detta arbete är enbart orienterande och syftar till en bedömning av flygaskors potential som ingående komponent i bindemedel tillsammans med cement och Merit 5000 för stabilisering och solidifiering av muddermassor (förorenade sediment).

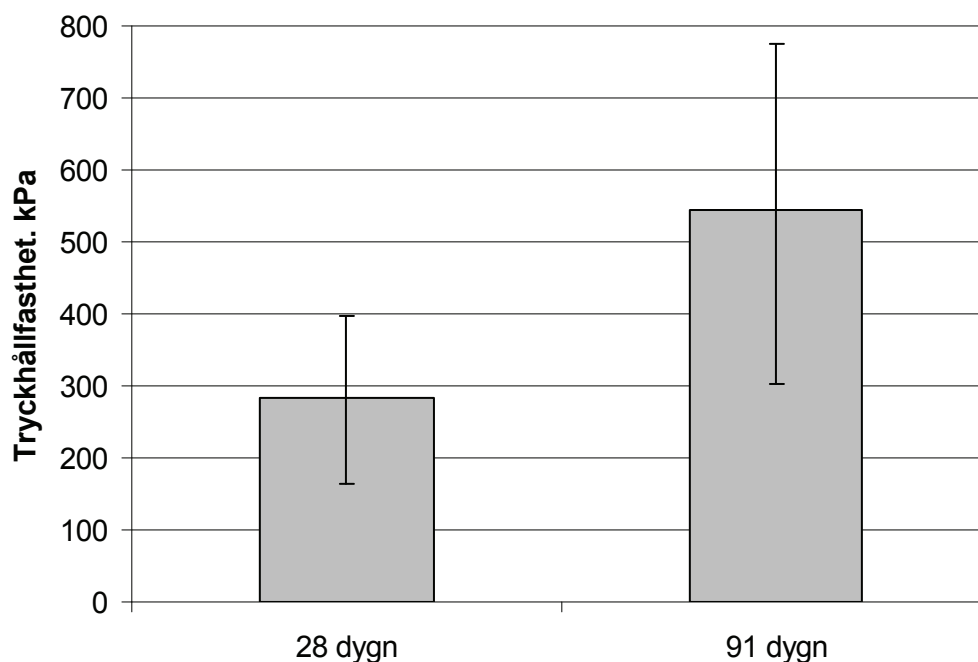
Sedimentmaterialets nyckelparametrar är dess densitet, vattenkvot, organiska innehåll och kornstorlekssammansättning. De två sediment som valdes för detta projekt visade sig ha snarlika egenskaper. De sediment som använts i detta projekt är från Gävle hamn och kan anses representativa för Svenska hamnar. Typiskt för sedimenten från Gävle Hamn är dess sulfidhalt och höga vattenkvot.

6.1 Tekniska och miljötekniska egenskaper hos s/s-behandlade muddermassor

6.1.1 Geotekniska egenskaper

Hållfasthet

Vid nyttiggörande av stabiliserade/solidifierade muddermassor i hamnkonstruktioner såsom för fyllningsmaterial för exempelvis nya hamnytor för uppställning eller körytor erfordras normalt en tryckhållfasthet av 100–300 kPa beroende främst på storleken av ytlasterna. De uppnådda tryckhållfastheterna hos på laboratorium tillverkade stabiliserade provkroppar har uppnått hållfastheter i denna storleksordning eller högre inom 28 dygn (ca 170–350 kPa) och en tillväxt sker därefter (ökningsfaktor ca 2 till 91d) se figur 6.1. Samtliga bindemedel, med A1–A5 klarade alltså grundkriteriet för fallet Gävle Hamn att erhålla tryckhållfasthet >140 kPa efter 91 dygn. Dessa provkroppar har under härdningen varit belastade med 18 kPa för att simulera ett utförande med överlast. Obelastade prover får något lägre hållfasthet enligt försök utförda inom STABCON projektet. Den belastning som de s/s-behandlade massorna kommer att utsättas för i fält i ett verkligt projekt är beroende på hur utförande sker. Den hållfasthet som erhållits hos de labblandade proverna kan inte direkt appliceras som hållfasthet hos s/s-behandlade massor i fält. Flera faktorer inverkar. Det bedöms dock att erforderlig hållfasthet kan uppnås i fält.



Figur 6.1 Tryckhållfasthetsresultat som median, max- och minvärden hos s/s-behandlade muddermassor med bindemedelsmixar A1 till A5. Prover tillverkade på laboratorium. Compressive strength results as median, maximum and minimum values of the binder mixtures A1–A5 for the investigated sediments. The samples are produced in the laboratory.

I examensarbetet stabiliserades muddermassor med tre flygaskor, A1, A7 och A8. Mängden bindemedel var 120, 150 och 180 kg/m³. Recepten bestod av cement och flygaskor och provkropparna belastades inte under härdning. Andelen cement var 50 %, 60 %, 70 % och 80 %. Tryckhållfasthetsvärden i storleksordningen 140 kPa erhöles efter 56 dygn med tillsats av 80 % cement och 20 % flygaska och en total bindemedelsmängd på 120 kg/m³. För att erhålla en tryckhållfasthet på 110–120 kPa efter 56 dygn behövdes 100 kg/m³ ± 10 kg cement oberoende av tillsatt mängd flygaska som låg mellan 22 och 90 kg.

Resultaten indikerar att torra flygaskor ger högre tryckhållfasthet än lagrade (fuktiga) flygaskor. Vid bindemedelstillsats på 150 kg/m³ (C/A – 80/20 %) ger torra flygaskor tryckhållfasthetsvärden över 150 KPa, (150–179 kPa) medan lagrade flygaskor ger tryckhållfasthetsvärden i storleksordning 135–150 kPa. Det kan alltså noteras att även lagrade flygaskor erhåller i storleksordning runt 140 kPa.

Störst bidrag till tryckhållfasthetsökning efter 56 dygn ger cement. Flygaskors bidrag till härdning av de stabiliserade proverna bedöms vara större med torra flygaskor än med lagrade (fuktiga). Resultaten är svårtolkade i och med att prov med enbart cement och enbart flygaska saknas i provserien.

Permeabilitet

Den erhållna permeabiliteten hos de laboratorietillverkade proverna av s/s-behandlade muddermassor är av storleksordningen 10⁻⁸ till 10⁻¹⁰ m/s. Detta kan jämföras med per-

meabilitet hos lera $< 10^{-9}$ m/s. Detta innebär att de s/s-behandlade muddermassorna kommer att bilda en mycket tät monolit.

Kompressionsegenskaper

Det bör noteras att en 20–30%-ig kompression av provkropparna erhålls under den inledande fasen efter inblandningen av bindemedel och påläggandet av belastningen 18 kPa. Detta skall beaktas vid dimensionering och utförande av s/s-metoden.

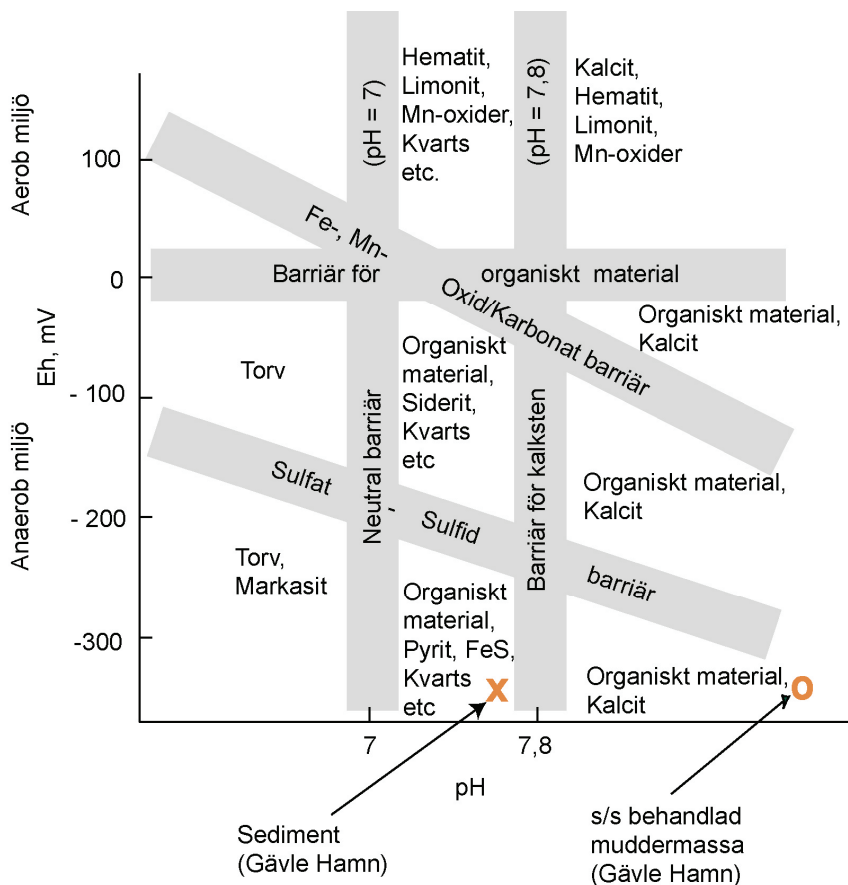
6.1.2 Beständighet

Sediment från Gävle Hamn bedöms vara sulfidhatlig och starkt anaerob, se figur 6.2. Lakningsundersökning på sedimentmaterial visar att pH ligger runt pH 7–8, se figur 6.2. Efter stabilisering höjs pH till > 12 . Konstruktionsdelen med stabiliserat sediment kommer att förbli vattenmättad och anaerob. Kompressionen bedöms, baserat på laborieförsök, bli ca 20–30 % efter att en överlast lagts ut på den stabiliserade konstruktionsdelen. Laborieförsöken visar att permeabiliteten hos s/s-behandlat sediment ligger i storleksordning 10^{-8} till 10^{-9} m/s och minskar med tiden vilket har bekräftats i STABCON projektet genom tester på 1 år gamla provkroppar (permeabilitet i storleksordningen $< 10^{-10}$ m/s). Resultaten liknar de permeabilitetsvärden som fås när bindemedel bestående enbart av cement och Merit 5000 används. Konstruktionen bedöms med andra ord bli tät, anaerob och ha ett högt pH. Slutsatsen är att de geokemiska förhållandena i och omkring en stabiliserad monolit är sådana att potentialen för nedbrytning under överskådlig tid är minimal utan handlar snarast om ett geologiskt perspektiv.

Fältförsök i Gävle Hamn behövs för att visa hur permeabilitet och lakningsegenskaper utvecklas i fält. Det slutliga recept som väljs behöver ge trygghet vad gäller konstruktionens funktion, dvs måste uppfylla ställda krav på hållfasthet, permeabilitet, lakningsegenskaper och vara beständig mot bl.a. sulfatangrepp, svällning och krympning.

I det norska BIA projektet⁶ (ingående i STABCON projektet) har försök med grundvattensmodellering på ett stabiliserat område i Trondheim visat att transporten genom området är mycket låg med permeabilitet på $< 10^{-8}$ m/s. Den eventuella transporten av föroreningar är relaterad till utpressning av förorenat porvatten vid komprimering, sprickor, dåligt stabiliserade zoner, förvittring av monoliten samt diffusion. Sprickor och förvittring av monoliten minimeras genom att den inkapslas i en konstruktion som skyddas mot tjäle, mekanisk påverkan med mera. Åtgärden måste alltid ställas i relation till de förhållanden som rådde innan. Muddring av ett förorenat sediment kan ses som en sanering av ett område. I det norska projektet har beräkningarna visat att utlakning från sedimenten före muddring var högre än den sammantagna utlakningen från havsbotten efter muddring och konstruktionen med stabiliserat material.

⁶ BIA-projekt 176928/140, 2006-2008. www.stabilgrunn.no



Figur 6.2 Naturliga redox och pH-barriärer (efter Mason & Moor 1982). Obehandlat sediment och s/s-behandlad muddermassa från Gävle hamn är inlagd i figuren med hänsyn till pH.

Natural redox and pH barriers (after Mason & Moor 1982). Untreated sediment and s/s treated dredged material from Gävle port is added in the figure according to pH.

6.1.3 Miljötekniska egenskaper

I detta projekt har skaktest använts för att utvärdera lakningsegenskaperna hos blandningarna med olika askor. Skaktestet innebär att monoliten krossas innan lakning sker. Detta förfaringssätt kan sägas utgöra ett värsta scenario där monoliten utsätts för mekanisk påverkan eller på annat sätt bryts ner genom t ex frostsprängning. Ytutlakningstester som genomförts inom STABCON har visat att utlakningen blir mindre än vid skaktest. I en geokonstruktion ska monoliten ligga skyddad från mekanisk påverkan och på frostfritt djup. Konstruktionen ger också skydd mot syreangrepp samtidigt som monoliten har ett högt pH vilket innebär att den har bra beständighet mot olika nedbrytningsmekanismer. Erfarenheter från andra projekt visar att permeabiliteten minskar med tiden och därmed utlakningen.

Tre olika nivåer för bedömning av lakningsresultaten har använts, se avsnitt 3.2.3. Vid jämförelse med den första nivån visar resultaten (från skaktest) att efter stabilisering minskar utlakningen eller är likvärdig med ostabiliserat sediment för flertalet av de analyserade metallerna och för alla organiska ämnen. Vid jämförelse med nästa nivå

som är nivå för mindre än ringa risk [8] kan konstateras att halterna för alla metaller utom nickel (Ni) och för vissa blandningar även kvicksilver (Hg) ligger under nivå för mindre än ringa risk. Höga Ni-halter i lakvattnet uppmättes även i prov som stabiliserades med cement och Merit 5000 i STABCON projektet. Vissa flygaskor kan innehålla något förhöjda halter av Hg, exempelvis A2, vilket kan ses vid jämförelse mellan analyserade totalhalter. Det vore av intresse att i kommande analyser inkludera sulfidhalten och totalhalten svavel i både lakvatten och det fasta materialet. Detta för att undersöka inverkan av totalhalten Hg i förhållande till flygaskans innehåll av sulfider och dess påverkan på Hg halterna i lakvattnet. Det är känt att Hg i form av HgS löser sig sämre än HgSO₄. Det finns studier där man har använt sulfidrik flygaska för att binda Hg i vatten. Vid jämförelse av utlakningen av Ni och Hg mellan ostabiliserat sediment och stabiliserat sediment har pH höjningen troligen en betydelse.

6.2 Tekniska aspekter på bindemedelskomponenten flygaska

6.2.1 Logistik, lagring och kvalitetssäkring

Inventeringen av flygaskorna visar att produktionen av flygaska är störst mellan oktober och maj. Under denna period är den tillgängliga mängden färsk flygaska som produceras av Vattenfall Uppsala, Mälarenergi, Västerås, Stora Enso Hylte, Stora Enso Fors och Katrinefors Värmeverk i samma storleksordning som behövs vid processtabilisering motsvarande den som användes i Åbo, dvs ca 300 ton flygaska per dag. Den totala torrlagringskapaciteten i silos hos de undersökta askproducenterna är ca 2500 m³. Om Fortum Värtans flygaska blir tillgänglig i framtida projekt innebär det en lagringskapacitet av ytterligare 1000 m³. Inventeringen visar alltså tydligt att det behövs flera producenter för att kunna leverera tillräcklig volym för ett projekt av den storlek som planeras i Gävle hamn vilket ställer krav på logistik vad gäller transport, hantering och stabilisering av muddermassor. Under perioden maj till oktober räcker däremot inte producerade volymer i och med att värmeverken inte har någon produktion under denna period. Därmed finns behov av att lagra flygaska under denna period.

För lagring av flygaska finns olika alternativ. De som anses mest realistiska är

- lagring av torra askor i silo
- lagring av befuktade flygaskor
- en kombination av ovanstående

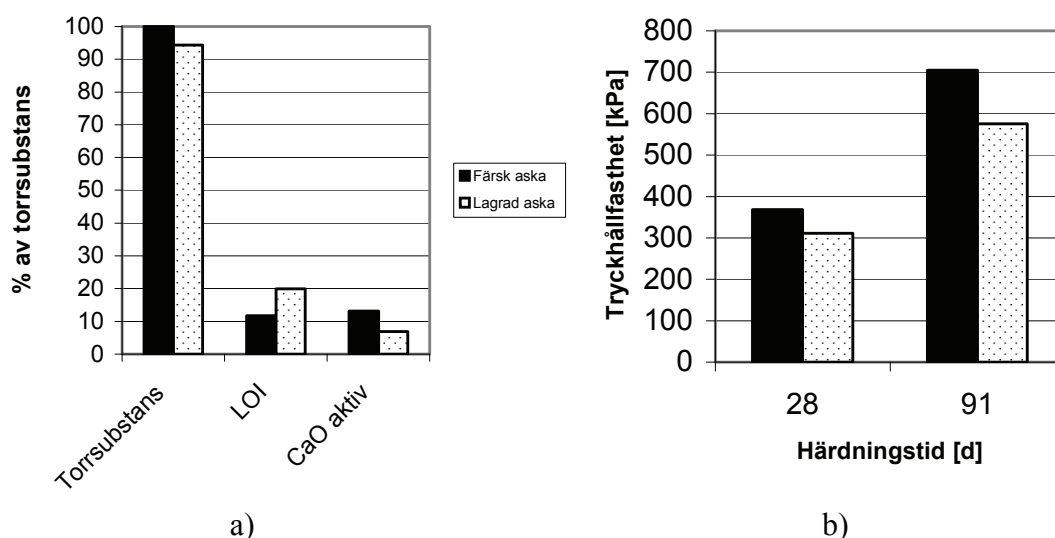
Kombinationen är intressant eftersom en färsk flygaska kan fungera som aktivator för den lagrade fuktade askan.

Cement och Merit 5000 är kvalitetssäkrade material och kommersiella produkter, medan kvaliteten hos flygaskorna kan variera dels mellan olika leverantörer och dels mellan olika leveranser. Våtlagring medför att kvaliteten hos flygaskorna förändras med tiden.

Därmed behövs en robust bindemedelsblandning som klarar variation av

- flygaskornas kvalitet,
- sedimentens kvalitet
- eventuell variation av bindemedelsmängden i det stabiliserade materialet (detta är beroende av val av stabiliseringsmetod)

Flygaskans nyckelparametrar är bl.a. dess halt av aktivt CaO, LOI och TOC samt dess kornstorlekssammansättning och packningsegenskaper. Dess innehåll av bl.a. metaller är en viktig miljöparameter. I projektet undersöktes totalt åtta flygaskor som bindemedel. Resultaten visar att samtliga torrlagrade flygaskor är finkorniga i siltfraktion med mycket små variationer. Det kan också konstateras att våtlagring av flygaskorna medför en viss ökning av partikelstorleken, men att flygaskorna hamnade i siltfraktion. Våtlagring vid vattenkvot (w) lika med 35 % under ett halvår medför att flygaska A8 tappat det mesta av sin härdningsförmåga, dess pH sjunker. Lagring av A1 vid vattenkvot på 20 % under tre månader medförde att flygaskans härdningsförmåga minskar drastiskt och dess pH sjunker. Lagring påverkar även flygaskans packningsegenskaper och densitet. Flygaskans innehåll av aktivt CaO minskar med 47 % under lagringen, se figur 6.3 a. Flygaskans glödförlust (LOI) ökar i och med bildning av kristallint vatten under våtlagring samtidigt som dess CaO(aktiv)-halt minskar. Detta kan få konsekvenser såsom att cementmängden behöver höjas för att erhålla erforderlig tryckhållfasthet. Som det framgår i Figur 6.3 b, medför lagring en minskning av de stabiliserade provernas tryckhållfasthet. I exemplet i Figur 6.3 b framgår att tryckhållfasthet minskar med ca 20 % med en flygaska som har våtlagrats (w = 20 %) under tre månader jämfört med färsk flygaska. Det bör noteras att kravnivån för tryckhållfasthet efter stabilisering generellt ligger mellan 100 och 200 kPa. Även lagrad flygaska klarar därmed dessa kriterier.



Figur 6.3 a) Skillnad i nyckelparametrar mellan färsk och lagrad aska med samma ursprung, torrsbstans, LOI och aktivt CaO innehåll och b) Tryckhållfasthet hos stabiliserat sediment med bindemedel C/M/A - 50/20/30, där A är Färsk respektive Lagrad flygaska.

a) Difference in key parameters between fresh and stored fly ash with the same origin, dry substance, LOI and active CaO content and b) Compression strength for stabilized sediment with the binder mixture C/M/A - 50/20/30, where A is fresh and stored fly ash.

Något klart samband mellan nyckelparametrar hos flygaskorna och erhållen tryckhållfasthet hos de stabiliserade proverna kan inte identifieras, med undantag av att lägst tryckhållfasthet erhöles med bindemedel med lägst CaO halt (C/M/A2) och högst tryckhållfasthet med högst halt av CaO (C/M/A1), se avsnitt 4.3.1.

Lagringstiden och mängden tillsatt vatten medför att flygaskornas härdnings och packningsegenskaper förändras med tiden. Baserat på finska erfarenheter (muntlig referens A. Maijala) kan flygaska lagras upp till 6 månader. Det framgår dock inte hur askorna lagrades, dvs vid vilken vattenkvot. Längre lagring än sex månader medför stora osäkerheter i och med att flygaskans reaktivitet avtar, dvs förmåga att ersätta andra bindemedel. Risken finns att reaktiva flygaskor börjar härda, vilket medför att flygaskan brinner ihop och klumpar sig.

Möjligheten att helt ersätta torra flygaskor med lagrade (fuktiga) flygaskor kan denna undersökning inte ge någon detaljerad information om. För detta behöver flera försök utföras med fler serier. Bl.a. saknas serie med enbart flygaska och med enbart cement för att kontrollera askans och cementens bidrag till härdningen. Denna undersökning visar dock att det finns en potential för att använda lagrad fuktig flygaska eftersom bra hållfasthetsvärden erhöles med A6 (lagrad Uppsala-aska). Lagring av fuktiga askor kommer att påverka askans kvalitet. På vilket sätt och hur den lagrade flygaskan ska kvalitetssäkras bör utredas vidare.

6.3 Ekonomiska aspekter

6.3.1 Kostnader för bindemedelsmix

I ett s/s-projekt är det oftast stora volymer muddermassor som skall stabiliseras vilket kräver stora volymer bindemedel. Normalt ligger bindemedelsmängden på 100–200 kg/m³ muddermassor men även upp till 300 kg/m³ kan förekomma. Med traditionella kommersiella bindemedel som cement och Merit 5000, med ett marknadspris på ca 800 kr/ton, blir kostnaden för 100–200 kg/m³ bindemedel ca 80–160 kr/m³ muddermassor. Bindemedelskostnaden utgör ca 80 % av totala kostnaden för stabiliseringen. Kostanden för flygaska har uppskattats till 100–200 kr/ton. Kan en del av bindemedlet utgöras av flygaska kan en markant kostnadsreduktion erhöles. Vid en bindemedelsmängd av 150 kg/m³ där 30% utgörs av flygaska så blir kostnadsreduktionen för bindemedlet av storleksordningen 25%.

Bindemedelsmängden bör minimeras under förutsättning att erforderliga tekniska och miljömässiga egenskaper hos det stabiliserade materialet uppfylls. Varje ton bindemedel innebär en kostnad från transport, transportlogistik, lagring, inblandningsenergi och ökad volym.

Transporter

Kostnaderna för transport av torr flygaska och torrförvaring ställer motsvarande krav som uppstår för bindemedlen cement och Merit 5000. Transport av fuktad flygaska (5 – 20 %) kan ske i ”bulk” och kan lagras på plats.

Logistik

Användning av flerkomponentsbindemedel ställer krav på logistik. Genom att flera flygaskor kan bli aktuella ökar projektets komplexitet. Torra flygaskor kan hanteras på motsvarande sätt som cement och Merit 5000. Lagringstiden begränsas av flygaskans reaktivitet, dvs. hur snabbt askan härdar, och mängden tillsatt vatten. Vid tillräckligt lågt vattenkvot reagerar inte all fri kalk med det inblandade vattnet. Behovet av kvalitetssäkring ökar om flygaskor lagras fuktigt jämfört med torrt.

Generellt kan sägas att logistiken och att säkerställa leveranser av flygaska till ett s/s-projekt är en process som kräver god framförhållning. Askleverantörerna (anläggningsägarna) har i allmänhet långa leveransavtal för att säkerställa att man har avsättning för sin aska. Har man inte avsättning kan anläggningsägaren inte driva sin produktion. Uppsägning av ett avtal innan avtalstidens utgång är ofta förknippade med en kostnad. Anläggningsägarna ofta svårt att lagra stora volymer aska. Byggherren, i detta fall en hamnägare, behöver därför kunna avsätta lagringsytor för att kunna lagra upp aska som täcker projektets tidsmässiga behov.

6.3.2 Behov av bindemedel för s/s-av förorenade muddermassor

Metoden att stabilisera/solidifiera förorenade muddermassor är en etablerad metod som använts under lång tid internationellt [5] och under senare år även i Norden. Vid val av lämpligaste metod för hantering av förorenade muddermassor skall en helhetssyn tillämpas, dvs teknik–ekonomi–miljö–sociala aspekter beaktas och vägas samman. Ett beslutsverktyg baserat på detta synsätt (Multi-Criteria-Decision tool) har indikerat att s/s-metoden är den metod som ofta bör väljas. s/s-metoden kan sägas vara bästa möjliga teknik (BAT). Metoden har inga begränsningar avseende årstid förutom att muddringen kan begränsas av is och att konstruktionen ska skyddas från tjäle.

I avsnitt 2.1 har volymen framtida muddermassor visats, ca 200 000–800 000 m³ per år. Ett stort antal hamnar har visat stort intresse för s/s-metoden, inte minst för att den möjliggör nyttiggörande av de förorenade massorna och samtidigt minskar behovet att använda ändliga resurser samt minskar miljöpåverkan av transporter.

Ett exempel som visar att s/s-tekniken är ett bra val med hänsyn till kostnad och nytta är nedanstående från Oxelösunds hamn. s/s-metoden jämfördes i en grov kostnadskalkyl med två alternativa metoder för omhändertagande av förorenade muddermassor i samband med byggande av ny kajanläggning. De två alternativa metoderna var

- avvattning, lakvattenhantering och deponering vid SAKAB
- behandling genom kemisk extraktion och omhändertagande.

Kalkylen visade att kostnaden för alternativ 1 var 13 ggr så stor som s/s-behandling och för alternativ 2 minst 5 ggr så stor. Med andra ord är s/s-tekniken i detta fall ett bra val med hänsyn till kostnad och nytta.

6.4 Acceptans för s/s-metoden

Tillstånd i miljööverdomstolen

I Sverige finns det flera exempel på planerade projekt. Exempel på hamnar som har fått tillstånd för att använda s/s-metoden för omhändertagande och återvinning av mudder-

massor är Gävle Hamn AB och Oxelösunds Hamn AB. Gävle Hamn AB fick tillstånd år 2008 i första instans som var miljödomstolen. Oxelösunds Hamn AB:s tillstånd att använda s/s-metoden har senare efter överklagande beslutats av miljööverdomstolen (MÖD). Genom domslutet i MÖD har metoden accepterats i högsta instans vilket innebär att en praxis har etablerats för metoden och att det i framtida tillståndsprövningar ges bättre möjligheter att nyttja s/s-metoden.

Naturresurs och energianvändning

En annan viktig aspekt är att s/s-behandling av muddermassorna och användning av de stabiliserade/solidifierade massorna i en geokonstruktion innebär att massorna nyttiggörs vilket stöds av nya ramdirektivet (2008/98/EG) för avfall där stor vikt läggs vid återvinning. I ramdirektivet anges att bortskaffande endast bör accepteras i de fall som andra alternativ är omöjliga.

När det gäller utnyttjande av naturresurser och energi innebär möjligheten att ersätta cement med flygaska en positiv effekt. Dessutom är CO₂ utsläppen från cementtillverkningen betydande. Användning av flygaskor som ett av bindemedlen innebär ytterligare en miljövinst genom att ett avfall återvinns.

6.5 Kvalitetsaspekter i byggande

Stabilisering av lösa jordar är en etablerad teknik och det finns beskrivningar av metodens hantering i byggprocessen. Nyttjande av flygaska som komponent i bindemedlet medför att en del kompletteringar behöver göras.

Byggprocessen för att stabilisera muddermassor omfattar ett antal steg:

- i. förstudie innefattande bl.a. jämförelse av handlingsalternativ
- ii. bygghandling och teknisk beskrivning baserat bl.a. på dimensionering med egenskaper hos ingående material såsom s/s-behandlade material
- iii. utförande med bl.a. hantering och inblandning av bindemedel
- iv. kontroll och uppföljning av bl.a. funktion och omgivningspåverkan
- v. underhåll under livstiden
- vi. avveckling
- vii. återanvändning

I byggprocessens olika steg är flera aktörer involverade. Nyckelfrågor för acceptans är tekniska och miljötekniska egenskaper hos produkter och konstruktioner inkluderande långtidsegenskaper och beständighet samt inverkan på omgivningen. Föreliggande projekt indikerar att dessa frågor kan hanteras. Dock föreligger ett behov av stöddokument för kvalitetssäkring samt kompletteringar vid användning av flygaskor som komponent i bindemedel. Åtminstone i ett inledande skede så kommer ett bindemedel innehållande flygaska vara ett bindemedel med tre komponenter istället för en eller två komponenter som hittills använts. Kvalitets- och noggrannhetskrav i komponenter och andel behöver klarläggas och specificeras från hantering av flygaskor och sediment till blandnings- och utläggningsförfarande. Detta accentueras om flygaskadelen utgörs av en blandning av flera flygaskor. Lagringsförhållandena, kvalitetskraven på lagrad fuktad flygaska och tillverkningen av 3-komponent bindemedel behöver också utredas och specificeras.

7 Diskussion och slutsatser

7.1 Kriterier för bindemedel vid tillämpning av s/s metoden

Vid muddring av hamnar och farleder hanteras stora volymer sediment varav en signifikant del är förorenad. Ett miljövänligt och kostnadseffektivt sätt att nyttiggöra förorenade muddermassor är att efter stabilisering och solidifiering (s/s) använda dessa i konstruktioner som t.ex. terminalytor, Figur 7.1. Konventionella bindemedel som olika cementkvaliteter och Merit 5000 ingår vanligtvis i bindemedelsmixen vid s/s-behandling av muddermassor. Acceptans för s/s-metoden som sådan finns redan genom bl.a. domen i miljööverdomstolen för Oxelösunds hamn. Detta projekt hade syftet att bedöma flygaskors potential som del i en bindemedelsmix bestående av cement, Merit 5000 och flygaska. Utgångspunkten var att kunna ersätta en del av de konventionella bindemedlen med flygaska. Potentialbedömningen har fokus på tekniska, miljömässiga och ekonomiska aspekter. Grundhypotesen var att genom att använda flygaska i bindemedelsmixen kunna uppfylla funktionskraven på det stabiliserade materialet och samtidigt minska bindemedelskostnaden. För att visa att funktionskraven uppfylls måste det stabiliserade materialets hållfasthet, permeabilitet med mera nå bestämda nivåer och utlakningen av föroreningar måste ligga på acceptabla nivåer.



Figur 7.1 Terminalyta under uppbyggnad i Åbo.s/s behandling av förorenade sediment med process-stabilisering (bild A. Majjala).

Construction of terminal area in the Port of Turku, Finland using stabilized dredged material with new process stabilisation system produces".(photo A. Majjala).

Teknik och miljö

Grundkriteriet ur teknisk synpunkt var att de stabiliserade proverna med bindemedelsmix innehållande flygaska skulle erhålla > 140 kPa i tryckhållfasthet. Laboratorieförsöken visar att vid en bindemedelstillsats på 150 kg/m^3 och där andelen flygaska var 30 % av bindemedlet erhöles en hållfasthet > 300 kPa efter 91 dygns härdning. Fem olika flygaskor har undersökts enskilt eller i kombination med varandra. Samtliga flygaskor uppfyllde kriteriet med god marginal. Undersökningen visar att flygaskor med högre

CaO-halt ger högre tryckhållfasthet hos de stabiliserade proverna. Flygaskor som förvaras och används torra har därmed en stor potential att ersätta cement och Merit 5000.

Projektet har också visat att våtlagrad flygaska har en potential som bindemedelskomponent i s/s-projekt. Detta är intressant eftersom värmeverken inte producerar av flygaska från maj och till oktober vilket innebär att det kommer finnas behov av att lagra flygaska. Våtlagringen påverkar dock flygaskans kvalitet bl.a. genom försämrad härdningsförmåga. Det finns därför ett behov av att vidare utreda hur en våtlagrad flygaska ska kvalitetssäkras och hur mycket olika egenskaper påverkas genom våtlagring. Det är även intressant att undersöka olika metoder att aktivera en våtlagrad flygaska.

Stabilisering av muddermassorna medför att föroreningar binds kemiskt medan solidifiering leder till att muddermassorna får ökad mekanisk stabilitet och att eventuella föroreningar kapslas in i en monolitisk struktur. Ur miljösynpunkt är det därför viktigt att de stabiliserade muddermassorna bildar en monolit med bra mekanisk stabilitet och låg permeabilitet. Laboratorieförsöken visar att permeabiliteten hos samtliga stabiliserade prov låg mellan 10^{-8} och 10^{-9} m/s. Utförda lakningsförsök visar att lakbarheten för organiska föroreningar ligger under detektionsgränsen. Utlakningen av metaller ligger på en låg nivå som kan jämföras med utlakning från naturliga material. I en hamnkonstruktion kan stabiliserade och solidifierade muddermassor nyttjas som konstruktionsmaterial och ersätta naturmaterial som t ex krossat berg. Både krossat berg och stabiliserade muddermassor kan laka ämnen som koppar (Cu), zink (Zn), krom (Cr), kadmium (Cd) kvicksilver (Hg) med mera. I laboratorieförsök genomförda på krossat berg [2] har konstaterats att efter L/S 10, var den kumulativa utlakning, skaktest (EN 12457-3) av kvicksilver (Hg) 0,015 mg/kg TS. Resultatet är ett medelvärde av 23 prover. Lakningstester genomförda i detta projekt på stabiliserat sediment gav ett medelvärde på 0,008 mg/kg TS kvicksilver (Hg) och maxvärde 0,016 mg/kg TS. Resultatet baseras på ett 20 prover, med två olika sediment och fem flygaskor.

Utlakningen ligger i samma storleksordning från de två materialen i den ovan nämnda jämförelsen. Krossat berg har dock en högre permeabilitet, 10^{-5} till 10^{-6} m/s än stabiliserade och solidifierade muddermassor, som har permeabilitet som motsvarar 10^{-8} till 10^{-9} m/s. I geokonstruktionen med krossat berg kommer därmed L/S=10 att uppnås mycket snabbare än i ett stabiliserat material på grund av en lägre permeabilitet i det senare. Omgivningspåverkan med avseende på kvicksilver (Hg) bedöms därför vara avsevärt lägre från de stabiliserade muddermassorna än från det krossade bergmaterialet.

Genomförda laboratorieförsök visar att det finns en potential att använda flygaskor som bindemedel. Resultaten visar också att val av lämpligt bindemedel och bindemedelsmängd är platsspecifikt. Genom en serie laboratorie- och pilotförsök i fält tas lämplig bindemedelssammansättning och bindemedelsmängd fram för varje projekt utifrån ställda funktionskrav på konstruktionen.

Blandningar av olika flygaskor kommer i många fall att krävas för att klara projektens produktionstakt vilket accentuerar kvalitets- och noggrannhetskraven ännu mer. Behovet av stora bindemedelsvolymmer innebär att bindemedelsleverantörerna måste

samarbeta och att logistiken för att säkerställa leverans av flygaska i ett s/s-projekt är en process som kräver god framförhållning.

Ekonomi

I ett s/s-projekt är det oftast stora volymer muddermassor som skall stabiliseras vilket kräver stora volymer bindemedel. Normalt ligger bindemedelsmängden på 100–200 kg/m³ muddermassor men även upp till 300 kg/m³ kan förekomma. Med kommersiella bindemedel som cement och Merit 5000, med ett marknadspris på ca 800 kr/ton, blir kostnaden för 100–200 kg/m³ bindemedel ca 80–160 kr/m³ muddermassor. Bindemedelskostnaden utgör ca 80 % av totala kostnaden för stabiliseringen och kan variera beroende på priset på cement och Merit 5000. Kostnaden för flygaska har uppskattats till 100–200 kr/ton. Ytterligare faktorer som påverkar kostnaden är transport, lagring m.m. Kan en del av bindemedlet utgöras av flygaska kan en markant kostnadsreduktion erhållas. Vid en bindemedelmängd av 150 kg/m³ där 30 % utgörs av flygaska så blir kostnadsreduktionen för bindemedlet av storleksordningen 25 %. Det är inte uteslutet att en optimering av bindemedelsrecepten kan medföra att andelen flygaska blir > 30 %. Stora kostnadsreduktioner är således möjliga.

Användning av flerkomponentsbindemedel ställer krav på logistik. Behovet av bra logistiklösningar är stort i och med att flera producenter av flygaska behövs för att leverera tillräcklig volym under en begränsad tid. Genom att flera flygaskor kan bli aktuella ökar projektets komplexitet vilket kan leda till ökade kostnader. Transport av torr flygaska och torrförvaring ställer motsvarande krav som för bindemedlen cement och Merit 5000. Kostnaden för transporten beror i första hand på avståndet mellan flygaskaleverantören och den aktuella hamnen. Transport av fuktad flygaska (5–20 %) kan ske i ”bulk” och kan lagras på plats vilket innebär en lägre kostnad än för en helt torr flygaska. Lagringstiden begränsas av flygaskans reaktivitet, dvs. hur snabbt askan härdar, och mängden tillsatt vatten. Vid tillräckligt låg vattenkvot reagerar inte all fri kalk med det inblandade vattnet. Behovet av kvalitetssäkring ökar om flygaskor lagras fuktigt jämfört med torrt.

7.2 Byggprocessen

Ett s/s-projekt kräver planering och framförhållning från alla inblandade parter. Som tidigare nämnts har askleverantörerna vanligen långa avtal vilket gör att engagemang i ett s/s-projekt måste planeras i god tid. Denna planering måste ske i samarbete med byggherren, i detta fall en hamnägare, som kan upplåta lagerytor för att lägga upp lager av flygaska anpassat till en bedömd produktionstakt i projektet. Hamnägaren måste i sin tur planera projektet i god tid eftersom ett s/s-projekt normalt är förknippat med någon form av tillståndsprocess.

Nedan sammanfattas de olika aktörernas ansvarsområden i ett s/s-projekt.

Hamnägare/Byggherre

- Planera projektet och samverka med bindemedelsleverantörer
- Tillse att nödvändiga tillstånd finns
- Ta fram bindemedelsrecept genom laboratorietester
- Utföra fältförsök (pilotförsök)
- Avsätta lagringsytor för bindemedel, främst flygaskor

Bindemedelsleverantörer

- God framförhållning för att kunna avsätta nödvändiga volymer bindemedel/flygaska
- Kvalitetssäkra sitt bindemedel båda färsk och lagrade kvaliteter.

Myndigheter

- Tillämpa en helhetssyn vid bedömning av s/s-projekt
- Titta på den totala omgivningspåverkan från hela konstruktionen och inte enbart den stabiliserade monoliten
- Våga ta policybeslut och ställa rimliga utredningskrav

Konsulter/Entreprenörer

Inför s/s-projekts utförande utförs laboratorieförsök där receptblandningar optimeras med avseende på teknik, ekonomi och miljö. Med valt recept utförs pilotförsök för att verifiera erhållna resultat i laboratorieförsöken och ta för att kunna ta fram slutligt dimensioneringsunderlag innehållande bl.a. en utförandebeskrivning. Pilotförsöket ger även möjlighet att utveckla logistik med avseende på transporter och lagring och ger underlag till s/s-projektet som helhet.

8 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Avsättningsvolymen av flygaskor ingående i bindemedel bedöms kunna bli stor totalt sett, men är beroende på projektens storlek. Flera flygaskproducenter kommer att behöva samarbeta om leveranser. I och med högt ställda krav på applikationen i geokonstruktioner i hamnar kommer krav även att ställas på flygaskors kvalitet, med avseende dess kornstorlekssammansättning, CaO-halt, härdningskapacitet, innehåll av metaller, pH etc. De i detta projekt utförda laboratorieförsöken bör kompletteras med platsspecifika försök:

- Laboratorieförsök
 - där bindemedelsmixen och mängden bindemedel optimeras
 - där effekten av variationer i bindemedelskvalitet, bindemedelsmängd, sedimentkvalitet utreds
- Verifierande fältförsök

Våtlagringen påverkar flygaskans kvalitet genom att partikelstorleken ökar, den tappar en del av sin härdningsförmåga samt att pH sjunker. En försämrad härdningsförmåga kan få konsekvenser genom att cementtillsatsen måste höjas för att uppnå erforderlig hållfasthet. Den möjliga lagringstiden för en våtlagrad flygaska begränsas av hur snabbt den reagerar med vatten, dvs flygaskans reaktivitet. Det är därför viktigt att optimera vattentillsatsen för att bibehålla så mycket oreagerad kalk så möjligt.

Behov av fortsatta utredningar avseende våtlagrad flygaska som identifierats i detta projekt är:

- hur flygaskan ska kvalitetssäkras och hur olika egenskaper påverkas genom våtlagring
- provlagring i fält och utvärdering genom laboratorieförsök
- undersöka metoder för att aktivera våtlagrad flygaska.

9 Litteraturreferenser

- [1] Svedberg B., Ekdahl P., Mácsik J., Maijala A., Lahtinen P., Hermansson Å. Knutsson S., Edeskär T. 2007, *FUD-SALA, Provsträcka med stabilisering av obundna lager*. Askprogrammet. Rapport Q-632.
- [2] Ekvall A, von Bahr B, Andersson T, Lax K, Åkesson U, 2006, *Lakningsegenskaper för naturballast, Bergmaterial och moräner*. Askprogrammet. Rapport Q-961
- [3] Mácsik J, Svedberg B, Lenströmer S, Nilsson T. 2004, *FACE*, Rapport Q-870
- [4] Mason B, Moor C, *Principles of Geochemistry*, 1982
- [5] Holm G, Mácsik J, Svedberg B, Larsson L, Pehrsson P, Rogbeck Y, Bendz D, Leppänen M. 2006. *Efterbehandling av förorenade jord och muddermassor genom stabilisering och solidifiering*, rapport 5696
- [6] Holm, G., Larsson, S., Beyer, F., Batman, M., Genberg, C. (2009), *Geokonstruktioner av stabiliserade/solidifierade förorenade muddermassor*. Bygg&Teknik 1/09.
- [7] Svedberg, B., Batman, M., Holm, G. (2009). *Miljösamt och kostnadseffektiv hantering av förorenade muddermassor*. Svensk Hamntidning
- [8] Naturvårdsverket, *Handbok 2010:1, Återvinning av avfall i anläggningsarbeten*.
- [9] Holm G., Mácsik J., Maijala A., Lagerlund J och Wilhelmsson A. 2010. *Flygaskor för stabilisering/ solidifiering av muddermassor – en potentialbedömning*, Bygg och Teknik 1/10.
- [10] K. Axelsson, S-E. Johansson och R. Andersson, 2000, *Stabilisering av organisk jord med cement- och puzzolanreaktioner – Förstudie, Rapport 3. Svensk Djupstabilisering*.

Hemsidor

STABCON, www.stabcon.com

www.stabilgrunn.no

http://www.portofhelsinki.fi/content/pdf_pa_svenska/julkaisut/TBT-esite_2004SVE.pdf

<http://projektit.ramboll.fi/life/stable/>

Q9-706 Potentialbedömning av flygaskor för stabilisering och solidifiering(s/s) av muddermassor

Bilaga 1 **PM 1 - Inventering**

Datum	2009-08-03
Uppdragsnummer	61470933659000
Utgåva/Status	Arbetsmaterial

Anna Wilhelmsson
Uppdragsledare

Josef Macsik
Handläggare

Göran Holm
Granskare

Ramböll Sverige AB
Box 5343, Vädursgatan 6
402 27 Göteborg

Telefon 031-335 33 00
Fax 031-40 39 52
www.ramboll.com

Organisationsnummer 556133-0506

Innehållsförteckning

1.	Syfte och avgränsning	1
2.	s / s-metoden	1
2.1.1	Masstabilisering	1
2.1.2	Processtabilisering	2
3.	s / s-metodens användningsområden	3
3.1	Geokonstruktioner	3
4.	Acceptans s / s-metoden	6
4.1	Miljöbalkens mål – nyttiggörande av resurser	6
4.2	Prövningsprocessen	7
4.3	Lagstadgade krav	7
4.3.1	Relationen mellan vattenverksamhet och miljöfarlig verksamhet	7
4.3.2	Bedömningsgrunder	8
4.3.3	Avgjorda provningar för s/s-metoden	8
5.	Sediment	8
5.1	Geoteknisk klassificering	8
5.2	Föroreningsinnehåll	10
5.3	Erfarenheter av sedimentets inverkan på s/s-stabiliserade muddermassor	10
6.	Bindemedel	11
6.1	Materialurval	12
6.2	Flygaskans ursprung - bränsle, process mm	13
6.3	Egenskaper	14
6.3.1	Erfarenheter av bindemedlets inverkan på s/s-stabiliserade muddermassor	20
6.4	Hantering och lagring	20
6.4.1	Hantering	20
6.4.2	Lagring	20
6.5	Ekonomi och logistik	22

Bilagor

1. Föroreningsinnehåll i sediment i svenska hamnar
2. Askleverantörer

Värmeforsk projekt - Q9-706

1. Syfte och avgränsning

Syftet med detta PM är att sammanfatta den inventering som genomförts avseende bakgrundsinformation om

- s/s-metoden som teknik, dess marknadspotential och acceptans
- geokonstruktioner och tillämpningar för s/s-metoden
- sedimentens egenskaper
- bindemedlens egenskaper.

Bakgrundsinformationen har inhämtats genom litteraturstudier och intervjuer. Detta PM ska utgöra en bilaga till slutrapporten samtidigt som viss del av informationen kommer att arbetas in i huvudrapporten.

Inventeringen i detta PM avgränsas till att röra tillämpningen av s/s-metoden på den svenska marknaden och tillhörande bakgrundsinformation.

2. s/s-metoden

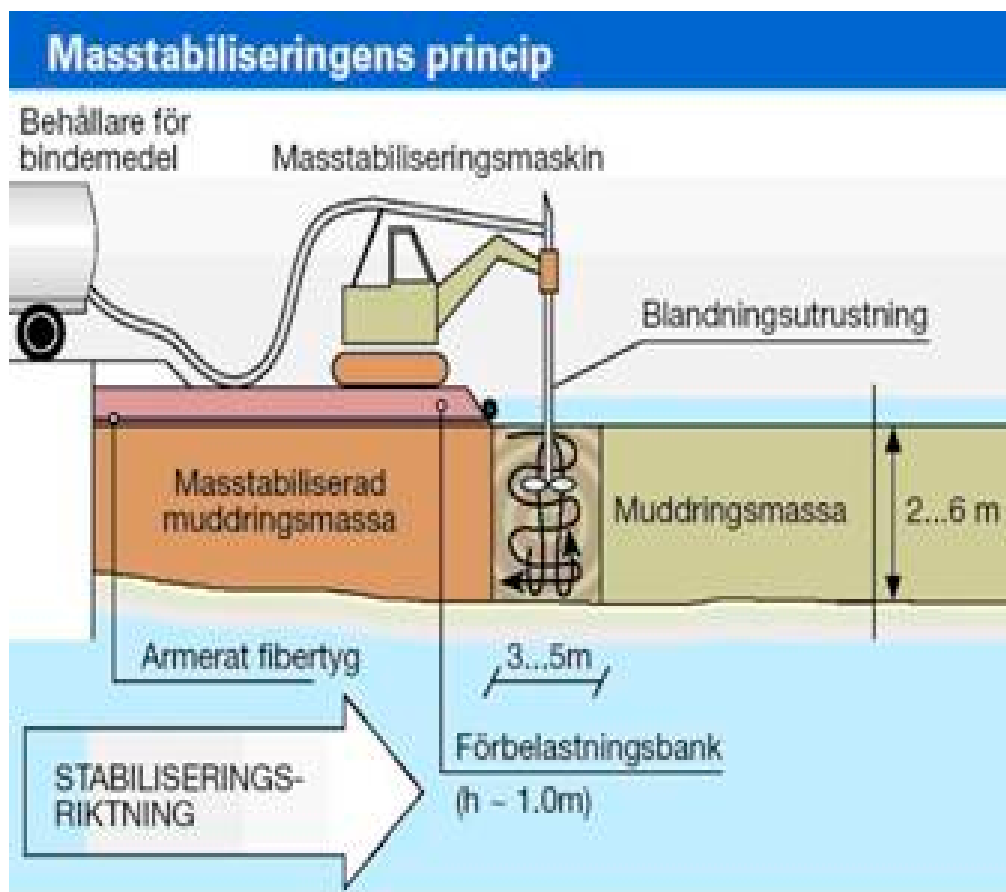
Ett miljövänligt och kostnadseffektivt sätt att nyttiggöra de muddermassor som uppkommer i samband med ett muddringsföretag är att använda massorna i konstruktioner som t ex kajer, terminalytor etc. Metoden benämns s/s-metoden (stabilisering/solidifiering) och innebär att man blandar massorna med bindemedel, t ex cement, kan de användas som konstruktionsmaterial. Stabilisering innebär att föroreningarna kemiskt transformeras till en mindre mobil form och solidifiering att massorna antar en fast form vilket ger en ökad hållfasthet samt förbättrade deformationsegenskaper hos muddermassorna. En användning av s/s-metoden möjliggör att förorenade muddermassor kan används för skapande av nya områden på land och inom hamnar, ex. exploatering av nya ytor för hamnverksamhet eller annan markanvändning.

Rent praktiskt kan STSO-metoden förenklat delas upp i fyra olika varianter, masstabilisering in-situ, ex-situ-off site och ex-situ on site och den fjärde metoden är processtabilisering.

2.1.1 Masstabilisering

Denna metod innebär att en grävmaskin med blandningsutrustning på sin arm stabiliserar de förorenade muddermassorna i block. Det vill säga att t ex med hjälp av stakkäppar avgränsa ett område (block) där grävmaskinen blandar och pumpar ut sitt bindemedel. Dessa block har angivet hur många kg bindemedel som skall pumpas ut per block och på detta sätt kan utföraren kontrollera att det

blir rätt blandning. För att grävmaskinen skall få bindemedel krävs det att den är utrustad med tankar som förser blandningsmunstycket med bindemedel. Ett bindemedel som till exempel kan bestå av cement, Merit 5000 (GGBS) och flygaska. Det finns en begränsning av vad en masstabiliseringsutrustning klarar av att blanda och det är i nuläget två komponenter. Detta kräver då att t. ex Merit 5000 och cementen blandas antingen i ett mobilt blandarverk eller på fabrik och blir transporterat till plats. Då ges möjligheten att blanda in flygaska och färdigblandad cement/GGBS in direkt i muddermassorna enligt figur 2.1.



Figur 2.1 Principskiss över masstabilisering ex-situ on site.

Principle sketch for mass stabilization, ex-situ on site.

2.1.2 Processtabilisering

Processtabilisering kan enkelt beskrivas som en vidareutveckling av masstabilisering ex-situ off-site. Det innebär att sedimenten lastas direkt från pråm till processtabiliseringsutrustningen och i den blandas sedimenten med bindemedel. Skillnaden är att inblandningen blir mer "industrialiserad" och därmed blir kvalitén på inblandningen högre, det vill säga mer homogen. Innan inblandning tas prov på sedimenten vilket avgör hur inblandningen skall korrigeras för att optimera resul-

tatet. Liksom masstabilisering ex-situ off-site så sker behandlingen av de förorenade sedimenten off-site och behöver därför transporteras till utfyllnaden.

Kapaciteten för en processtabiliseringsutrustning är beroende på förutsättningarna, det vill säga ankommande pråmar, sedimentens beskaffenhet m.m. I Åbo var de dock uppe i en maxkapacitet av 275 m³/h, men kapaciteten cirka 150 m³/h är den kapacitet som rekommenderas att kalkylera med.

Processtabiliseringsutrustningen i Åbo, Finland blev försörjd av tre olika bindemedel, flygaska, GGBS och cement. GGBS och cement förvarades i silos och matades därifrån in i anläggningen. Flygaskan förvarades på upplag och transporterades via transportband in i anläggningen.

Figur 2.2 nedan visar processtabiliseringsanläggningen och dess enheter som användes i Åbo.



Figur 2.2 Processtabilisering i Åbo. EU Life-Project Stable (Life 06 ENV/FIN/195)
Process stabilization in the port of Åbo. EU Life-Project Stable. (Life 06 ENV/FIN/195.)

3. s/s-metodens användningsområden

3.1 Geokonstruktioner

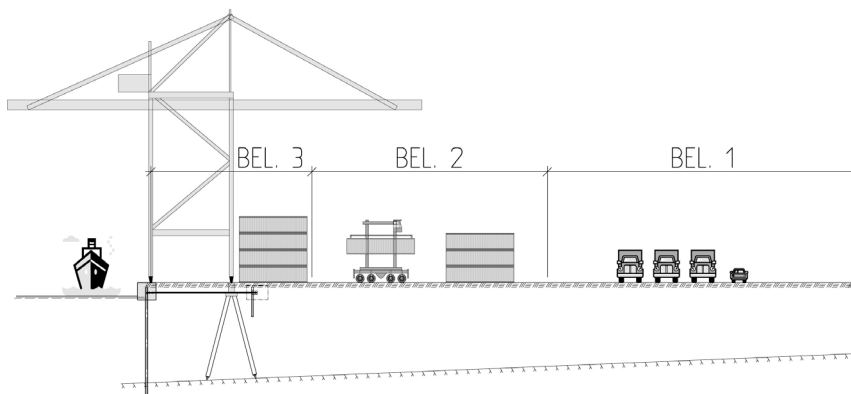
Geokonstruktioner som används i hamnområden är i ett visst mån unika och är anpassade efter platsspecifika förutsättningar och krav. Oftast används geokonstruktioner i kajer, pirer och vid förstärkning av terminalytor.

Trots att många olika geokonstruktioner har använts i hamnområden genom åren, t.ex. gravitationsmurar, pålgrundläggningar, förstärkningslager under terminalytor

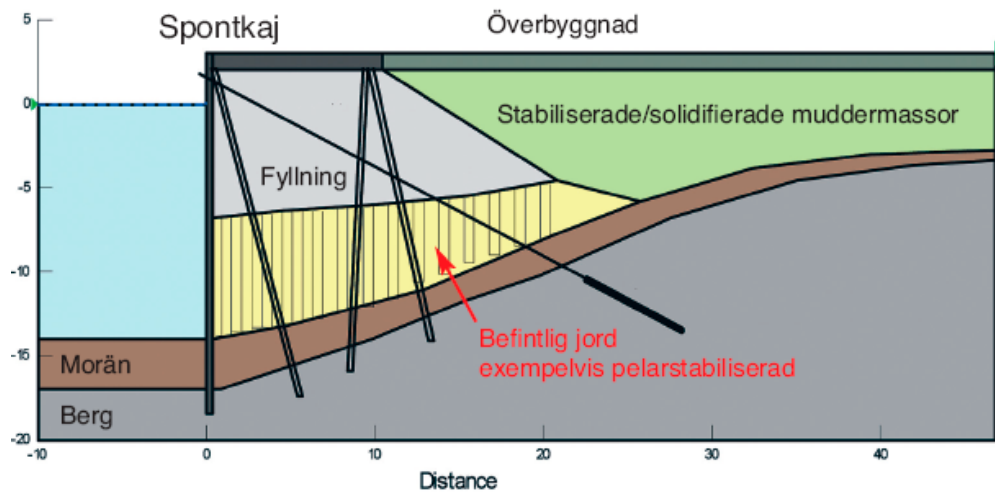
etc., så är det oftast endast några få som väljs i dagens läge. De vanligaste geokonstruktionerna som används idag är spont-, pål- och stödmurskonstruktioner i kajer. Eftersom expansionen av hamnområden vanligtvis sker i samband med utfyllning blir masstabilisering (beskrivs nedan) också en allt vanligare metod vid utformning av geokonstruktioner för terminalytor.

Inom hamnområden bedrivs många olika verksamheter och dagligen belastas dessa områden med stora laster. Dessa laster uppkommer både från verksamheten i vattnet och på land. Lasterna på land kommer från t.ex. kranar, grensle-truckar, containrar, transportfordon och byggnader. Ett typexempel på ett hamnområde med olika belastningsnivåer illustreras i *figur 3.1*. För att grovt förenkla kan dessa olika belastningsnivåer indelas i tre nivåer, dvs. normal/tung vägtrafik (BEL. 1), lätt/tung hamnverksamhet (BEL. 2) och extremt tung hamnverksamhet (BEL. 3). De största lasterna (BEL. 3) finns oftast på och nära kajen, t.ex. kranar, medan de mindre lasterna t.ex. personbilar och byggnader brukar finnas längre bort från kajen. Vanliga lastnivåer inom BEL1 är $\leq 2 \text{ ton/m}^2$ medan lasterna intill kajen brukar vara i storleksordning 2-4 ton/m^2 i BEL 2 medan lasterna vid extrem tung hamnverksamhet är av storleksordningen 4-7 ton/m^2 . Lasterna kan dock vara mycket större.

Stabiliserade/solidifierade förorenade muddermassor kan användas i olika geokonstruktioner på olika sätt och i olika omfattning. Det finns en flexibilitet i användningen som gör att metoden kan vara lämplig i många fall. I *figur 3.2* och *figur 3.3* visas två exempel på hur de behandlade muddermassorna kan användas i geokonstruktioner. I det ena fallet, *figur 3.2*, har uppbyggnaden av ytan bakom spontkajen från fasta bottenlager till överbyggnaden utförts med behandlade muddermassor (gröna i figuren). I det andra fallet, *figur 3.3*, visas exempel på uppbyggnaden bakom en sprängstensvall (grundlagd på fast botten). I en dylik tillämpning kan ostabiliserad jord (t.ex. lera) vara kvar under de behandlade muddermassorna (grönt i figuren) under förutsättning att krav avseende deformation/sättningar uppfylls.

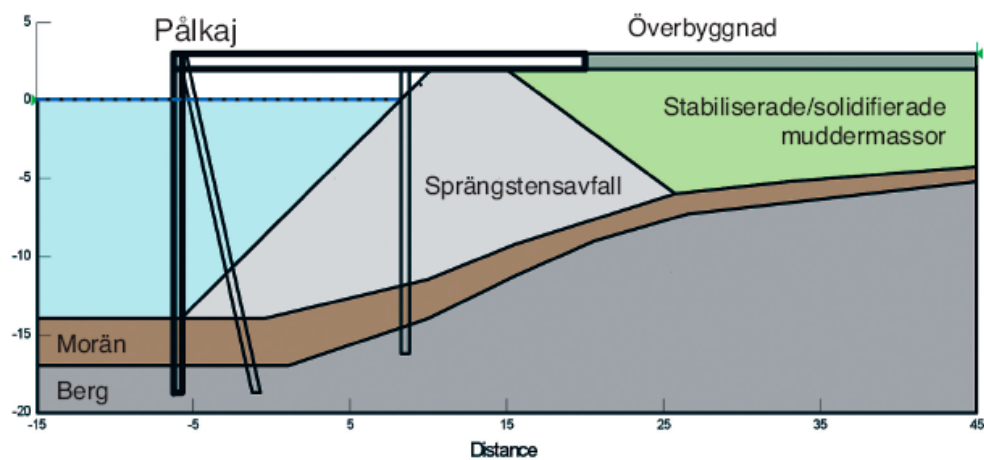


Figur 3.1 Exempel på olika lastnivåer vid en kajkonstruktion.
Examples of different load levels in a quay construction.



Figur 3.2 Exempel på geokonstruktion med stabiliserade/solidifierade muddermassor bakom en spontkaj.

Example of a geotechnical construction with stabilized and solidified dredged material behind a groove quay.



Figur 3.3 Exempel på geokonstruktion med stabiliserade/solidifierade muddermassor bakom en pålkaj med sprängstensavfall.

Example of a geotechnical construction with stabilized and solidified dredged material behind a pole quay with excavated embankment.

Vid utbyggnad av nya hamnområden skapas ofta stora ytor för containeruppställning, bulkmaterial, enklare byggnader etc. samt körytor. Dessa ytor kan ligga på relativt stora avstånd från en kajkonstruktion och ge möjlighet för nyttiggörande av mycket stora volymer stabiliserade/solidifierade massor.

Dimensioneringen av geokonstruktioner av stabiliserade/solidifierade förorenade muddermassor skall förutom sedvanlig dimensionering av geokonstruktioner (stabilitet, sättningar, bärförmåga) omfatta recept för bindemedel för att uppnå erforderliga egenskaper hos de stabiliserade muddermassorna både avseende lak-egenskaper och geotekniska egenskaper. Typisk tjocklek hos överbyggnad/förstärkningslager är 1,2 m. Hållfasthetskravet på de stabiliserade/solidifierade muddermassorna är relativt måttligt och av storleksordningen 100–200 kPa (tryckhållfasthet). De stabiliserade/solidifierade massorna skall ligga frostfritt. Principer för dimensionering av stabiliserade/solidifierade massor kommer att tas fram av projektet STABCON (www.stabcon.com).

4. Acceptans s/s-metoden

4.1 Miljöbalkens mål – nyttiggörande av resurser

I miljöbalkens kap 1, § 1 anges att den bl a ska tillämpas så att "återanvändning och återvinning liksom annan hushållning med material, råvaror och energi främjas så att ett kretslopp uppnås." I kap 2 är en utav de allmänna hänsynsreglerna "hushållning med resurser". Resurshushållningsaspekten ska naturligtvis vägas samman med skydd av människors hälsa och miljö men även med att "bästa möjliga teknik" (BMT) används. I ett s/s-projekt tillämpas en helhetssyn massor nyttiggörs och aspekterna teknik, ekonomi och miljö beaktas och vägs samman.

Med hänsyn till IPPC direktivets definition av BAT (Best available technic) samt BREF:en "Waste treatments industries" görs den bedömningen att s/s-metoden kan anses vara BAT/BMT. Enligt svensk rättstillämpning skall en helhetsbedömning göras för vad som är BMT i ett specifikt fall. Således- skulle s/s-metoden visa sig vara det bästa alternativet, efter att en helhetsbedömning har gjorts i det specifika fallet, finns inget hinder för att referera till metoden som BMT.

Det övergripande miljöpolitiska målet som fastställts av EG-förordningen ger stöd för att internationell erfarenhet kan användas för att lösa regionala miljöproblem. s/s-metoden behöver därmed inte ha använts frekvent i Sverige för att metoden skall kunna anses vara BMT.

Att avfall skall omhändertas som en resurs stöds ytterligare av det nya ramdirektivet (2008/98/EG) för avfall där stor vikt läggs vid avfallsåtervinning. I och med det nya ramdirektivet för avfall infördes en avfallshierarki som medlemsstaterna skall uppfylla så långt som möjligt. Hierarkin beskriver inställningen till hantering och uppkomst av avfall och stadgar följande prioriteringsordning för detta:

- a) Förebyggande åtgärder
- b) Förberedelse för återanvändning

- c) Materialåtervinning
- d) Annan återvinning, t.ex. energiåtervinning
- e) Bortskaffande

Således belyses vikten av återvinning och resurshållning än mer än tidigare och bortskaffande bör endast accepteras i de fall som andra alternativ är omöjliga. Ramdirektivet ställer även uttryckliga krav på medlemsstaterna att främja återanvändning och materialåtervinning för att på sikt uppnå ett återvinningssamhälle, se artikel 10 och 11.

4.2 **Prövningsprocessen**

Inom hamnverksamhet uppstår med olika intervall behov av muddring i form av underhållsmuddring eller vid fördjupning och nybyggnation. Åtgärder som muddring och omhändertagande av muddermassor föregås av flera ställningstaganden och beslut om verksamhetens utveckling och framtid. När väl behov av muddrings- och utbyggnadsåtgärder kungjorts förbereds arbetet genom inledande samråd med Länsstyrelsen. Vid samrådet brukar även berörd kommuns miljöavdelning medverka.

4.3 **Lagstadgade krav**

Vid ett sk muddringsföretag, dvs muddring samt omhändertagande av muddermassor, berörs tre olika kapitel i miljöbalken (MB) kapitel 9, 11 och 15. 9 kapitlet klassar muddermassor som avfall och prövar användning av muddermassor för anläggningsändamål, 11 kapitlet reglerar grävning, sprängning och rensning (muddring) samt användning av muddermassor som konstruktionsmaterial i vattenområde och kapitel 15 reglerar förbud mot dumpning av avfall och möjligheterna till dispens från dumpningsförbudet. Vid en anmälan eller en ansökan om tillstånd för muddring krävs normalt att alla dessa tre kapitel beaktas.

4.3.1 **Relationen mellan vattenverksamhet och miljöfarlig verksamhet**

Reglerna om miljöfarlig verksamhet och vattenverksamhet regleras i två separata kapitel i miljöbalken, 9 kap samt 11 kap. Kapitlen gäller parallellt och är likvärdiga. Således är det ena kapitlet ej på något sätt överordnat det andra. Detta innebär att vissa tekniska processer aktualiserar regler i både kap 9 och kap 11 som i sin tur teoretiskt sett innebär olika tillståndprocesser. Exempelvis inbegriper s/s-metoden olika tekniska skeden som i teorin regleras i olika kapitel, se tabell 4.1.

Tabell 4.1 Exempel på olika skeden i s/s-metoden samt aktuella kapitel i miljöbalken
 Example of different stages in the s/s method and chapters in question in the Environmental Code.

Skede i processen (delmoment)	Muddring	Blandning med cement (är en behandling av muddermassorna *)	Byggande av själva konstruktionen
Aktuella kapitel enligt miljöbalken	Vattenverksamhet (11 kap)	Miljöfarlig verksamhet (9 kap)	Miljöfarlig verksamhet eller vattenverksamhet, beroende på var konstruktionen placeras (9 el. 11 kap)

*) behandling av avfall

4.3.2 Bedömningsgrunder

I dagsläget finns inga riktvärden för återvinning av avfall i samband med anläggningsarbeten. De gränsvärden som ofta används för bedömning av lakningstester är gränsvärden för deponi trots att gränsvärdena avser deponering och inte återvinning. Naturvårdsverket har tagit fram en handbok, Återvinning av avfall i anläggningsarbeten, 2010:1, som avser att förenkla bedömningen av den aktuella rättsliga processen kring användning av avfall i just anläggningsarbeten. I handboken anges nivåer för mindre än ringa risk där en anmälan normalt inte behöver göras.

4.3.3 Avgjorda prövningar för s/s-metoden

Några exempel på hamnar som har sökt tillstånd för att använda s/s-metoden för omhändertagande och återvinning av muddermassor är Gävle Hamn AB och Oxelösunds Hamn AB. Gävle Hamn AB fick tillstånd år 2008 i första instans som var miljödomstolen. Oxelösunds Hamn AB fick tillstånd i miljödomstolen att använda s/s-metoden för anläggande av en ny hamn vid Stegeludden år 2008. Domen överklagades av bl a Länsstyrelsen Södermanlands län togs upp för förhandling i miljööverdomstolen maj 2009. I domslut aug 2009 fastslog MÖD att Oxelösunds Hamn AB får tillstånd att använda s/s-metoden.

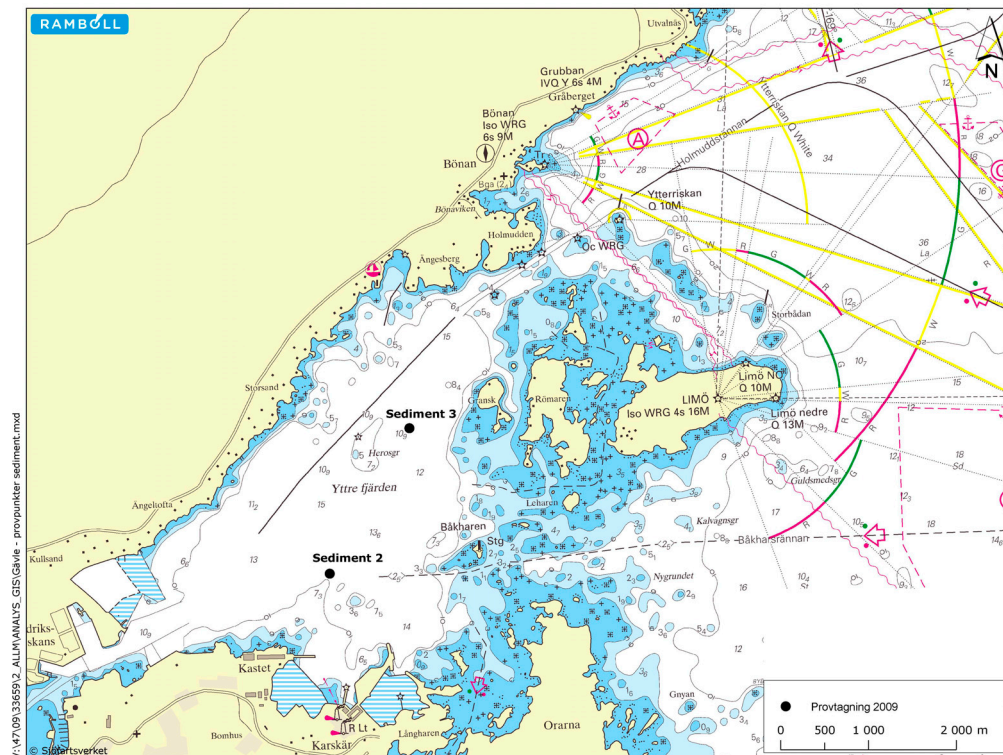
5. Sediment

I Gävle hamn planeras ett muddringsföretag av 1 miljon m³ muddermassor. Sedimenten som skall muddras är förorenade med metaller, PAH:er mm och anses vara representativa för flertalet svenska hamnar, se 5.2.

5.1 Geoteknisk klassificering

Sedimentet i inseglingrännan till Gävle hamn består primärt av postglacial gyttjelera och lergyttja som underlagras av glaciallera. Den postglaciala gyttjeleran är svart och reducerad i ytan och övergår successivt till diffus till tydligt

laminerad grågrön postglacial gyttjelera/lergyttja. De ytligaste sedimentlagren är mycket lösa och håller normalt en hög vattenhalt (ca 80%).



Figur 5.1 Provtagningspunkter för undersökningar av föroreningshalter i sediment i inseglingsrännan.

Sampling points for surveys regarding pollution levels in sediments in the entry channel of the port of Gävle.

Vattenfall Research & Development (VRD) har under 2009 gjort en geoteknisk klassificering av sedimentprover från inloppet till Gävle hamn. Sedimentproverna är tagna på 0-30 cm. Resultaten har sammanställts nedan.

Tabell 5.1 Geoteknisk klassificering av sediment.

Geotechnical classification of sediments.

Sediment nr:	2	3
Skrymdensitet [t/m^3]	1,1	1,1
Glödgningsförlust (LOI) [%]	17	14
Vattenkvot [%]	374, 79	329, 77
Odränerad skjuvhållfasthet [kPa]	0,03	0,07
Konflytgräns [%]	201	178
pH	7,3	7,0
Elektrisk konduktivitet (mS/cm)	397	375

5.2 Föroreningsinnehåll

De översta sedimentlagren i inseglingrännan är påverkade av den industriella verksamheten som har bedrivits i området och sedimentets innehåll av föroreningar har undersökts vid flera tillfällen, se figur 5.1 (sjökort). Industriell påverkan kan förväntas så långt tillbaka som ca 120 år vilket motsvarar ett sedimentskikt om ca 75 cm om sedimentationshastigheten sätts till i genomsnitt 6 mm/år. Höga halter av miljöstörande ämnen finns enligt undersökning endast i översta sedimentlagret (ca 0-30 cm) och påverkan minskar därunder till ca 75 cm där bakgrundshalter återfinns.

Resultaten från sedimentundersökningarna visar att översta sedimentlagret är påverkat av metaller, PAH:er och PCB:er. Utav de analyserade metallerna är det höga halter av zink (Zn), kvicksilver (Hg), krom (Cr), koppar (Cu), kadmium (Cd), bly (Pb) samt arsenik (As). Uppmätta halter av dioxiner och Cesium (Cs) är låga. De tennorganiska föreningarna (framför allt TBT) uppvisar halter som är normala i ett område som trafikeras av sjötransporter. TBT-halterna har jämförts med finska riktlinjer då det saknas svenska bedömningsgrunder för tennorganiska föreningar. Enligt de finska bedömningsgrunderna behöver halter över 200 µg/kg TS (normaliserat värde, korrigerat värde så att det motsvarar halten i ett standardsediment) särskilt omhändertas. Uppmätta halter i inseglingrännan ligger alla under 100 µg/kg TS utom ett prov. I bilaga 2 jämförs föroreningshalterna i Gävle hamn med ett genomsnitt av föroreningshalter i svenska hamnar för att visa att sedimenten i Gävle hamn är representativa.

5.3 Erfarenheter av sedimentets inverkan på s/s-stabiliserade muddermassor

I Finland finns erfarenheter sedan 15 år tillbaka av flera genomförda projekt där s/s-metoden har tillämpats. Ett av de senaste projekten är "Stable" i Åbo hamn som är ett EU-Life projekt¹.

Resultaten från laboratorietester som genomförts i projektet visar att olika typer av sediment har en tydlig påverkan på stabiliseringen. Följande egenskaper har en påvisad effekt:

- organisk halt
- kornstorleksfördelningen
- vattenkvot

En hög organisk halt, hög vattenkvot och mycket finmaterial ger försämrad stabilisering. Vid jämförelse mellan hur stor påverkan de olika parametrarna hade konstaterades att den organiska halten hade större påverkan på stabiliseringen än vattenkvoten.

När det gäller solidifiering av massorna, dvs lakningsegenskaperna så har man genom laboratorietesterna inte kunnat påvisa att sedimentets egenskaper har någon påverkan.

¹ LIFE06 ENV/FIN/000195, <http://projektit.ramboll.fi/life/stable/>

6. Bindemedel

Bindemedel vid stabilisering/solidifiering

Stabilisering och solidifiering är en väl etablerad teknik att förbättra lösa jordars, exempelvis lerors, geotekniska egenskaper. Cement, Merit 5000 och kalk är exempel på bindemedel som generellt ingår i bindemedelsrecept vid stabilisering av leror. Syftet med stabilisering och solidifiering (s/s) av sediment och muddermassor är att kunna återanvända dessa material som konstruktionsmaterial genom att:

- förbättra materialets bärighet, solidifiering
- i de fall där massorna är förorenade minska föroreningarnas mobilitet tillgänglighet, stabilisering.

Vid stabilisering sker ett antal kemiska reaktioner som i sin tur bildar olika reaktionsprodukter. Reaktiviteten hos flygaska (puzzolan), cement (hydraulisk) och Merit (latent hydraulisk) beror bland annat på förhållandet mellan kalciumoxid och kiseloxid, $\text{CaO}:\text{SiO}_2$. Högre kvot ger större andel hydrauliska (dvs cement) reaktioner, Åhnberg (2006).

Hos en blandning av cement och flygaska ger cementen en snabb hydraulisk reaktion följt av en långsammare puzzolan reaktion från flygaskan. Stabilisering medför att det skapas en monolitisk struktur med förändrade egenskaper som högre hållfasthet, lägre permeabilitet etc. En generell beskrivning av reaktioner och reagenser redovisas i Tabell 6.1. Flygaskor har generellt god potential att användas som bindemedel tillsammans med exempelvis cement och Merit 5000 mm.

Tabell 6.1 Bindemedelsreaktioner, efter Janz och Johansson (2002) och Åhnberg (2006).

Binder reactions, after Janz and Johansson (2002) and Åhnberg (2006).

Bindemedel	Reaktion	Reagenser	Reaktionsprodukter	Tidsskala
Flygaska	Puzzolan	Vatten + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ från tex. Cement, Merit eller kalk	CASH, (CSH), (CAH)	Månader
Cement	Hydraulisk (cement)	Vatten	CSH, (AF) CASH, (CSH), (CAH)	Dagar
Merit	Latent hydraulisk (cement)	Vatten + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ från tex. cement eller kalk	CSH, (CAH), (CASH)	Veckor

C – CaO , A – Al_2O_3 , S – SiO_2 , H – H_2O och AF – exempelvis ettringit

Flygaskors egenskaper/kvalitet

Flygaskors egenskaper varierar beroende på panntyp och bränsle. De vanligaste panntyperna i Sverige är FB (fluidiserande bädd), pulver och roster. FB finns om cirkulerande (CFB) eller bubblande (BFB) panna. Bränslet som primärt är av intresse är biobränsle, torv och kol eller en blandning av dessa. Bränslesammansättningen varierar säsongsvis och mellan olika värmeverk. Kolflygaska används internationellt tack vare att den har liknande härdningsegenskaper som cement och jämn kvalitet. Hantering och lagring är ytterligare viktiga faktorer som påverkar flygaskors egenskaper. En viktig förutsättning för att flygaskor ska bibehålla ursprungliga härdningsegenskaper är att dessa tas ut och förvaras torra. Förvaring av befuktade flygaskor medför att härdningskapaciteten minskar med tiden. Hur snabbt härdningskapaciteten minskar varierar mellan olika flygaskor. Vissa askor är snabbhärdande och härdningskapaciteten avtar inom timmar efter tillsats av vatten. Andra flygaskor påverkas långsammare och kan bibehålla stor del av sin ursprungliga härdningskapacitet i månader. Mängden vatten som tillsätts har betydelse, ju större mängd desto snabbare minskning av härdningskapacitet. Hur härdningsegenskaperna minskar med tiden är askspecifika och bör utredas för respektive aska som ska våtlagras innan användning som bindemedel. Härdningskapaciteten hos våtlagrad flygaska kan höjas genom tillsats av en aktivator som exempelvis cement, Mácsik et al. (2004) och Svedberg et al. (2008).

Tillgång

Mängden aska per bruk/värmeverk kan variera från några tusen ton till > 50 000 ton per år. Till stabilisering av 1 million kubikmeter muddermassor krävs det mellan 100 000 ton till 200 000 ton bindemedel. Om askor ersätter 30 % av bindemedelsmängden behövs det 30 000 ton till 60 000 ton flygaska per Mm^3 . En förutsättning för effektivt nyttjande av flygaskor som bindemedel i större projekt är därför att flera askleverantörer kan leverera och att askorna kan ersätta varandra som bindemedel utan negativ påverkan på slutprodukten, dvs konstruktionen.

6.1 Materialurval

Bränslet som är av intresse är biobränslen, bioslam (pappersindustrin), torv och kol eller en kombination av dessa. Enbart större pappersindustrier och värmeverk är askproducenter som bedöms ha kapacitet att leverera lämpliga flygaskor till större stabiliseringsprojekt. I inventeringen av flygaskor ingick askleverantörer från Hylte i söder till Skellefteå i norr. Baserat på denna inventering valdes lämpliga flygaskor ut för laboratorieundersökning. Materialegenskaper, tillgång och avstånd till Gävle Hamn var de faktorer som styrde valet av flygaskor till laboratorieundersökningen.

Askleverantörer, volymer, bränslen redovisas i detalj i Bilaga 3. I inventeringen ingick följande flygaskor:

- Mälarenergi, Västerås (två flygaskor)
- Fortum Värme
- Vattenfall Uppsala

- Stora Enso Fors
- SCA Ortviken/Östrand
- Holmen Paper, Braviken
- ÖvikEnergi/Umeå Energi (systeranläggningar)
- E.ON, Örebro
- Skelleftekraft (?)
- Katrinefors Kraftvärme AB (KKAB)
- Stora Enso AB Hylte

Värmeverk producerar flygaska mellan oktober och maj. Mälarenergi Västerås, E.ON Örebro och Vattenfall Uppsala producerar tillsammans ca 76 000 ton flygaska per år. Panntyperna är FB (CFB, BFB) och pulver. Bränslet är generellt 65 – 80 % trä och resten är torv. Undantaget är pulverpannan i Västerås som har 90 % torv och resten kol. Fortum Värtan har 90-95 % kolbränsle och har full avsättning för den producerade kolflygaskan.

Pappersindustrin producerar flygaska året runt, med en ca månads lång stopp. Panntypen är CFB, BFB och roter. Bränslesammansättningen varierar lite eftersom biobränsle och bioslam uppstår och bränns ofta i samma proportioner. Detta ger en förhållandevis homogen flygaska. De flygaskor som redovisas i denna inventering är Stora Enso Fors, Stora Enso Hylte, Holmen Braviken och SCA Ortviken/Östrand. Den totala mängden flygaska som produceras är ca 90 000 ton/år. SCA producerar ca 35 000 ton. På kort sikt har SCA full avsättning för sina flygaskor som konstruktionsmaterial i landfyllnad. Stora Enso Fors producerar ca 2000 ton/år och har avsättning för ca 800 ton/år. Stora Enso Hylte producerar ca 35 000 ton per år där bränslet är avloppsslam avsvärtnings slam från egen anläggning. Hylte bruk har idag avsättning för flygaskan på egen deponi. Hylte ligger dock på ett långt transportavstånd, ca 60 mil, från Gävle men flygaskan kan vara intressant om den kan transporteras eftersom den produceras i stora volymer. Möjligt transportsätt är med tåg eftersom anläggningen ligger ca 50 m från järnvägsspår. Katrinefors Värmeverk i Mariestad använder slam och returpapper som bränsle. Katrinefors har idag avsättning för flygaskan på kommunens deponi men flygaskan kan vara intressant med hänsyn till relativt stora produktions volymerna, ca 13 000 ton per år. Transportavståndet till Gävle är ca 35 mil.

6.2 Flygaskans ursprung - bränsle, process m m

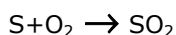
Kännetecknande för en flygaska med hög kvalitet är sfäriska intakta partiklar med högt kristallint innehåll. En sämre flygaska kännetecknas av stora partiklar med hög porositet vilka kan adsorbera vatten. För att få en bra flygaska krävs höga förbränningstemperaturer (1500-1700 °C) och en snabb avkylning. Förbränning av biobränsle sker vid temperatur runt 800 °C och det är ofta därför denna flygaska har sämre kvalitet än exempelvis en stenkolsaska.

Alla flygaskor är basiska och består av flera olika mineraler. Vedaska består av framför allt karbonater, fosfater och sulfater av kalium, kalcium, magnesium och järn. Kolaska består framför allt av oxider av kisel, aluminium, järn och mangan. I

likhet med ved- och torvaska ingår dessutom en rad metaller i små mängder, bl a krom, nickel, zink och vanadin.

Det finns olika typer av pannor med fluidiserande bädd. Dessutom kan partialtrycket vara lågt (atmosfärstryck) eller högt (ca 12 bar). De reaktioner som sker i samband med avsvavlingsreaktioner i pannan skiljer sig åt mellan en panna med högt och lågt tryck vilket leder till att den fasta återstoden som bildas också ser olika ut. Nedan redovisas de reaktioner som sker i en panna med lågt respektive högt tryck. I detta projekt är det Fortums flygaska, A3, som är framställd i en panna med högt partialtryck.

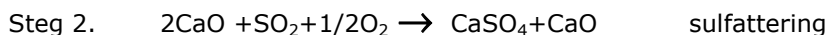
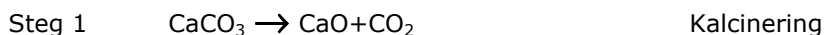
Svavel är ett av de grundämnena som förekommer i små mängder i kolbränslet. Svavel reagerar med syret och bildar svaveldioxid (SO₂) enligt reaktionsekvationen:



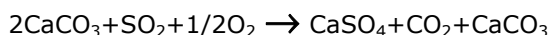
PFBC-tekniken utnyttjar en absorbent (kalksten eller dolomit), för att reducera detta utsläpp.

Absorbentens aktiva beståndsdel är kalciumkarbonat (CaCO₃)

Vid låg partialtryck av koldioxid (P_{CO₂}), som i en atmosfärisk FBC-bädd, sker avsvavlingsreaktionen i två steg.



I en PFBC-förbränning, där partialtrycket av koldioxiden är högt sker avsvavlingsreaktionen i ett steg utan dissociation av CaCO₃ till CaO och CO₂.



Istället för att absorbenten går igenom en kalcineringsfas följt av en sulfatteringsfas, blir den kemiska reaktionen, en enkel ombytesreaktion av CO₂ i CaCO₃ -molekylen med SO₂ och 1/2O₂. Den fasta återstoden från avsvavlingen är helt ofarlig gips (CaSO₄) överkottsabsorbenten i form av CaCO₃, och innehåller inte kalciumoxid (CaO) som är kaustisk och miljöskadlig.

Flygaskan från Fortum, A3, innehåller alltså inte CaO från avsvavlingåterstoden utan gips (CaSO₄) och kalciumkarbonat (CaCO₃).

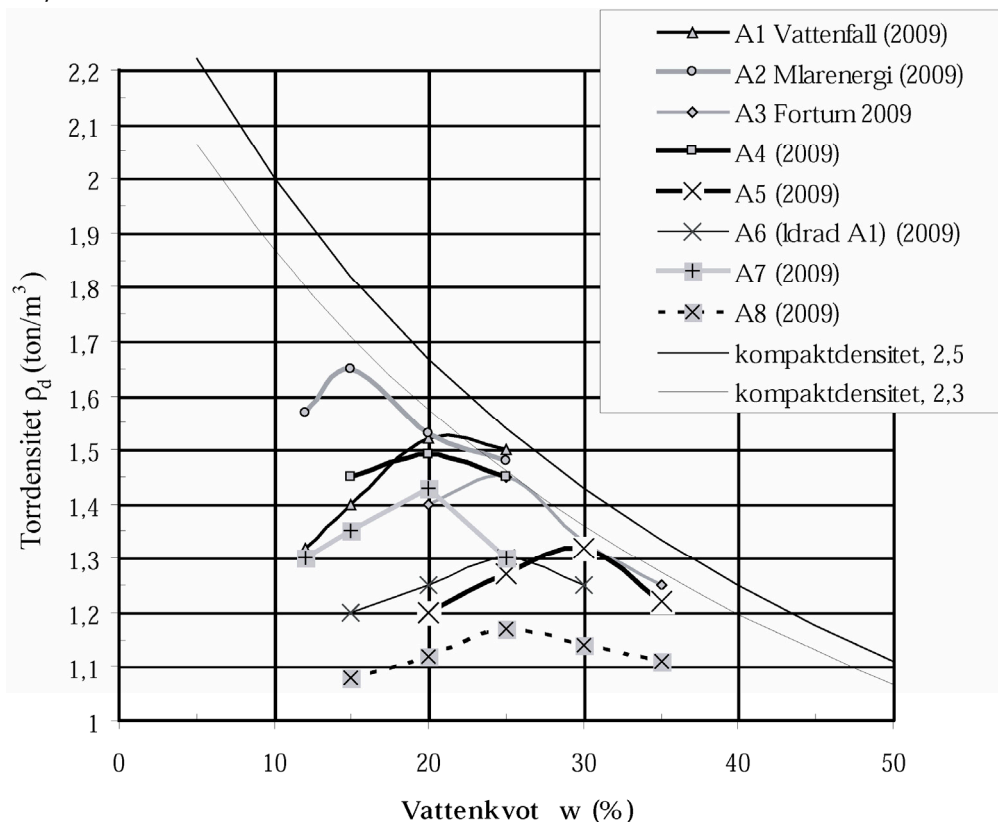
6.3 Egenskaper

Flygaskans pH, elektriska konduktivitet, CaO-halt (aktiv), mineralsammansättning, densitet, kornstorlekssammansättning, vattenkvot, glödningsförlust är av intresse eftersom dessa parametrar ger indikation om flygaskans lämplighet som bindemedel. Flygaskors packningsegenskaper och härdningskapacitet är avgörande egenskaper vid stabilisering. Härdningen kontrolleras genom att prov tillverkas med nära 100 % packningsgrad och tryckhållfastheten kontrolleras efter olika tider. Uppnådd tryckhållfasthet hos materialet och hur snabbt den ökar med tiden

ger information om askans härdningskapacitet. I en undersökning, avrapporterad av Mácsik et al. (2004) undersöktes nio olika flygaskor med avseende på materialegenskaper. Flygaskorna har grupperats med avseende på lämplighet som bindemedel. Vid grupperingen användes bl.a. information om tryckhållfasthet efter 14 dygns härdning och provets portal. Det bör noteras att flygaska från Mälar-energi Västerås, Stora Enso Fors, Vattenfall Uppsala och Fortum Värtan ingick även i denna undersökning.

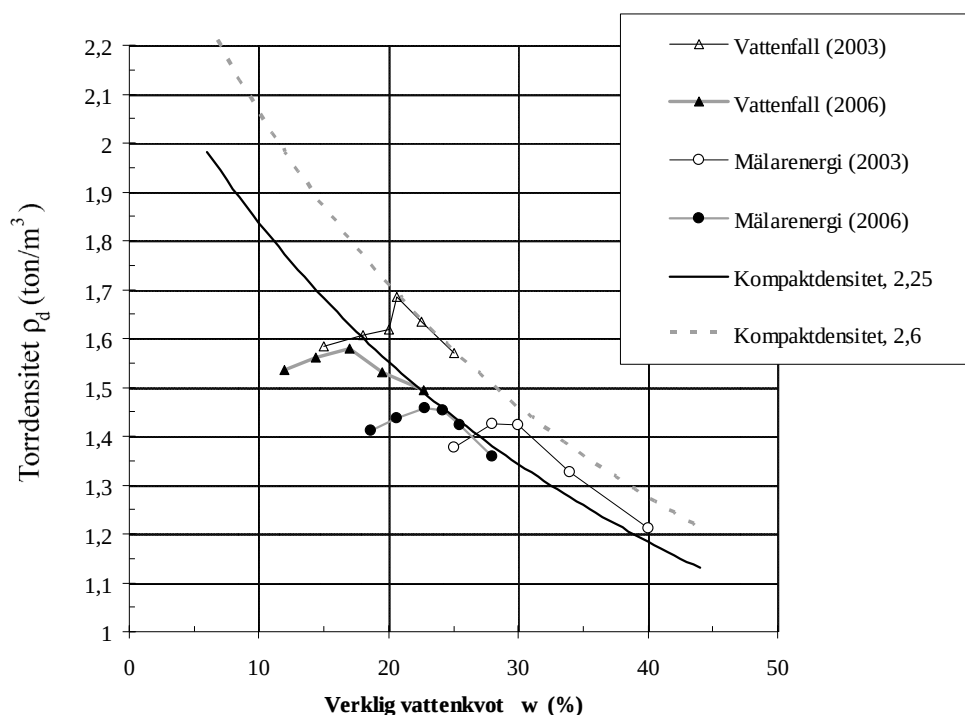
Packningsegenskaper

I figur 6.1 redovisas ett antal olika flygaskors packningsegenskaper. Av figuren framgår att optimal vattenkvot, vid viken maximal densitet uppnås, varierar från aska till aska. Olika flygaskors torrdensitet varierar från ca 0,9 ton/m³ till ca 1,7 ton/m³.



Figur 6.1 Packningsegenskaper hos nio flygaskor, hämtat från Mácsik et al. (2004).
Packing properties for nine fly ashes, by Mácsik et al. (2004).

Av figur 6.2 framgår hur flygaskans kvalitet varierar med tiden, i detta fall har flygaskornas maximala torrdensitet och optimala vattenkvot ändrats i och med ändrad bränslesammansättning från 2003 till 2006.



Figur 6.2 Ändring av packningsegenskaper som antas bero på att bränslesammansättningen har ändrats från 2003 till 2006, Svedberg et al. (2008).

Changes in packing properties believed to be a result of different fuel composition between 2003 and 2006, Svedberg et al. (2008).

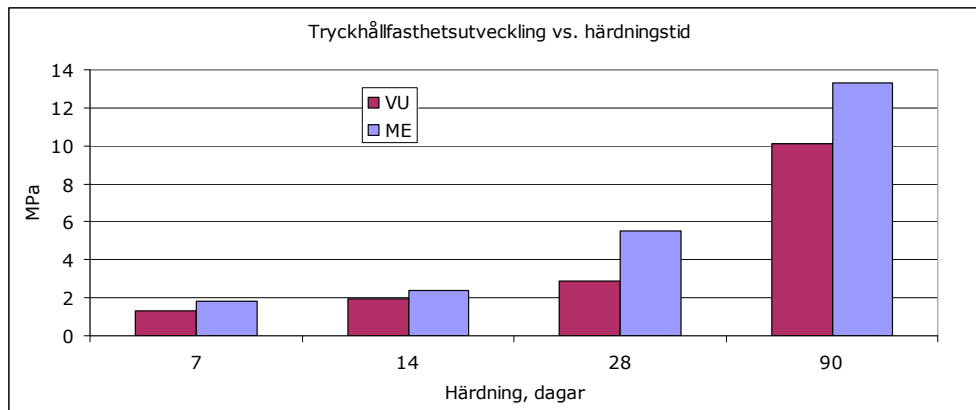
Härdningsegenskaper

Flygaskors härdningsegenskap är en central egenskap som bidrar till att flygaskor kan nyttjas som bindemedel och kan delvis ersätta exempelvis cement.

Härdningsegenskapen undersöks genom att tillverka provkroppar med flygaska som har nära maximal packningsgrad (packningsgrad, D mellan 90 och 100 %). Provernas tryckhållfasthet kontrolleras exempelvis efter 7, 14, 28, 30, 90 dygns härdningstid. Flygaskors tryckhållfasthet kan variera mellan några hundra kPa till > 20 MPa.

Tryckhållfastheten är beroende av härdningstid, packningsgrad, vattenkvot. Härdningstidens betydelse för uppnådd tryckhållfasthet ges exempel på i figur 6.3.

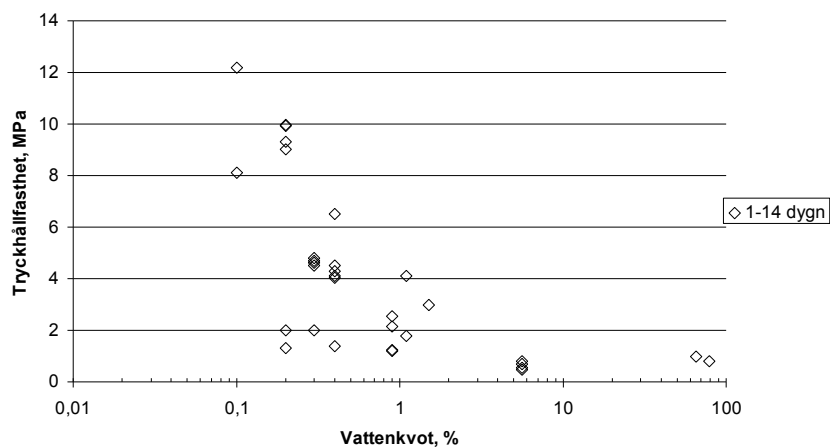
Vissa flygaskor härdar inom några timmar höga tryckhållfasthetsvärden kan uppnås på flera MPa, medan andra flygaskor är långsamma och det kan ta flera månader innan höga tryckhållfasthetsvärden uppnås (> 5 MPa), se figur 6.3.



Figur 6.3 Härdningstidens betydelse för utveckling av tryckhållfasthet hos tillverkade provkroppar, från Svedberg et al. (2008). VU=Vattenfall Uppsala och ME= Mälarenergi.

The importance of curing time for the development of compression strength in the samples, from Svedberg et al. (2008). VU=Vattenfall Uppsala and ME= Mälarenergi.

Som tidigare nämntes påverkas våtlagrade flygaskors hållfasthetsegenskaper under förvaring. Det är vanligt att flygaskor bevattnas i syfte att minska risken för damning. Vattentillsats på 5–20 % vatten på TS flygaska är vanlig, men det förekommer högre tillsatsmängder också. I figur 6.4 görs en sammanställning av tryckhållfasthetsvärden hos ett stort antal flygaskor som har härdat i upp till 14 dygn. Flygaskorna förvarades först med olika vattenkvot, från torrförvaring till våtförvaring. Efter lagring tillverkades proverna som fick härda i upp till 14. Figuren visar att våtlagring ger generellt låga tryckhållfasthetsvärden, medan flygaskor som förvarades med låg vattenkvot gav generellt högre värden. Det bör noteras att trots våtlagring finns det härdningskapacitet kvar och att vissa flygaskor har låg ursprunglig tryckhållfasthet. Ramboll Finlands erfarenheter är att reaktiviteten hos en fuktad flygaska minskar under de sex första månaderna för att sedan plana ut. Våtlagrade flygaskors härdningsegenskaper kan förbättras med hjälp av exempelvis cementtillsats eller återaktivering genom torkning och malning.



Figur 6.4 En sammanställning av olika flygaskors vattenkvot vid lagring och uppnådd tryckhållfasthet efter härdning under upp till 14 dygn.

A summary of the water quota for different fly ashes during storage and obtained compression strength after curing during the first 14 days.

Gruppering av flygaskorna

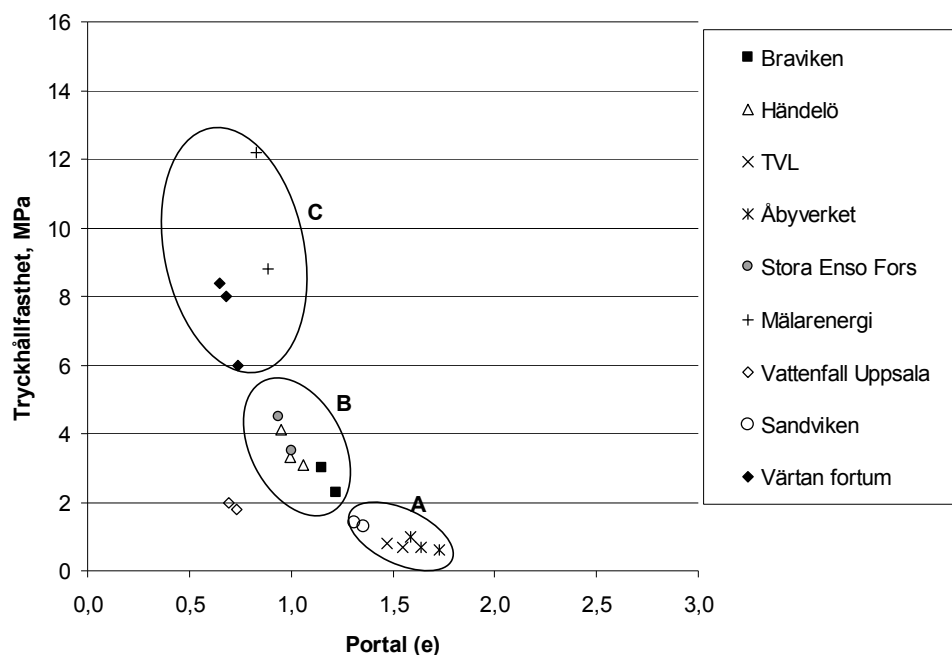
I Figur 6.5 redovisas ett förslag på gruppering av flygaskor beroende på tryckhållfasthet och portal, Mácsik et al. (2004). Flygaskor grupperades i Grupp A till C beroende på askornas lämplighet som bindemedel, där flygaskors lämplighet ökar från A till C².

² Ekvationen som föreslogs var:

$$C_0 = k \cdot e^{-c}$$

Där C_0 är tryckhållfasthet, k är en konstant beroende av bindningarnas styrka, e är portalet och c är en konstant beroende av partikelstorlek. Portalet e beror på materialets torrdensitet och flygaskans korndensitet (kompaktdensitet).

$$e = \left(\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \right)$$



Figur 6.5 Sambandet mellan portal och hållfasthet, samt en gruppering av flygaskorna utifrån tekniska egenskaper och förutsättningar, Mácsik et al. (2004).

The relationship between the void ratio and compression strength, and a grouping of the fly ashes from technical properties and conditions, Mácsik et al. (2004).

Grupp A

I Grupp A hör askor som är våtlagrade och har låg härdningskapacitet. Kornstorlekssammansättningen är sand, grus eller grövre pga att materialet har härdat under lagringstiden. Tryckhållfasthet runt 1 MPa kan uppnås. Askornas portal är runt 1,5. Dessa flygaskors härdningegenskaper kan förbättras med tillsats av cement. Flygaskorna i denna grupp har generellt pH < 12 och saknar halt av osläckt kalk (CaO).

Grupp B

I Grupp B hör flygaskor med medelhöga till höga halter av osläckt kalk och bra hållfasthetsutveckling. Askorna har lagrats förhållandevis torra eller under kort tid med viss vattentillsats. Dessa flygaskor bedöms kunna till delar ersätta bindemedel som exempelvis cement. Stora Enso Fors och Holmen Braviken hör till grupp B.

Grupp C

Grupp C består av flygaskor med hög hållfasthet. Dessa flygaskor kan ersätta cement. Till denna grupp hör Mälarenergi Västerås och Fortum Värtan. Vattenfall Uppsala som härdar långsammare än Mälarenergis flygaska, men når lika höga hållfasthetsvärden, tillhör också Grupp C.

Denna gruppering baseras på data fram till 2006. Variationer i egenskaperna som orsakas av variationer och ändringar i bränslesammansättning etc. bör beaktas. I Nordsjö hamn (Finland), valdes flygaskor bort med hänsyn till variationer.

6.3.1 Erfarenheter av bindemedlets inverkan på s/s-stabiliserade muddermassor

Bindemedlets funktion vid s/s-behandling av massor är ju att stabilisera, dvs förbättra hållfasthet och deformationsegenskaperna. Olika bindemedel fungerar dock lite olika. GGBS (Merit 5000) ger en långsammare hållfasthetstillväxt än cement. Hållfasthetstillväxten med flygaska beror på flygaskans egenskaper, se avsnitt 6.2 men generellt har flygaskan en långsammare hållfasthetstillväxt än cement.

När det gäller att minska lakningen av olika föroreningar är erfarenheterna varierande. Ofta används olika tillsatsmedel som är speciellt aktiva för olika kemiska ämnen. Exempel på detta är aktivt kol och järnsulfat för att binda olika organiska och oorganiska ämnen. Erfarenheten från bl a STABCON har visat att en ökad bindemedelsmängd totalt har samma effekt som att tillsätta t ex aktivt kol eller järnsulfid. Dessutom finns ett problem att homogenisera en liten mängd tillsatsmedel i en stor total volym. Merit 5000 egenskapen att kunna binda till sig vissa tungmetaller och även fosfor.

Erfarenheten från "Stable" projektet, Åbo hamn när det gäller bindemedlets inverkan på solidifiering av massorna, dvs lakningsegenskaperna är att man inte kunnat påvisa att det har någon påverkan.

6.4 Hantering och lagring

6.4.1 Hantering

Flygaskan kommer direkt från förbränningsanläggningen i torr form och är då ett dammande material som bör hanteras i slutna system. Flygaskor har normalt ett högt pH (>10) och innehåller bl a kalciumoxid (i varierande %-andel), dvs osläckt kalk. Osläckt kalk bildar i fuktat tillstånd kalciumhydroxid som verkar irriterande för ögon och andningsorgan.

Normalt tillsätts 5-20 % vatten till flygaskan innan den transporteras från anläggningen för att undvika damning i samband med transporten. Vid tillsatts av vatten börjar flygaskan att härda och dess funktion som bindemedel försämras.

Flygaskan har liknande innehåll och egenskaper som cement och Merit 5000 varför flygaskan bör hanteras på liknande sätt. För cement och Merit 5000 finns säkerhetsdatablad med information om bl a personlig skyddsutrustning.

6.4.2 Lagring

Flygaskan reagerar i kontakt med vatten och en härdningsprocess startar. Härdningen leder till att flygaskan klumpar ihop sig till större aggregat och i sin tur att kornstorlekssammansättningen ändras. Långvarig lagring kan medföra att flygaskans pH förändras genom att koldioxid adsorberas från luften. Även salt-

halten kan förändras under lagring. Kontakt med vatten och luft medför alltså att flygaskans egenskaper förändras varför den bör hanteras i torr form för att behålla maximal bindningseffekt.

I en färsk flygaska är pH värdet högt och även salthalten vilket gör att nedbrytningen av organiskt material (mikrobiell aktivitet) är låg.

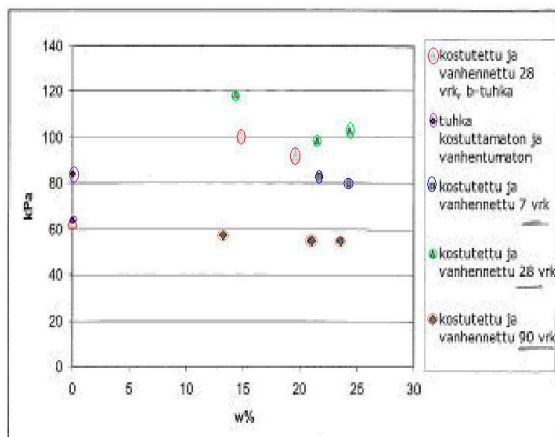
Exempel på torr lagring av flygaska är i silo eller täckt med presenning (eller liknande) på ett väl dränerat underlag. Även lagring i säckar som t ex big-bag kan vara alternativ till torr lagring.

Om flygaskan lagras i en limpa utan täckning kommer en skorpa på vanligen en till två decimeter att bildas vid lagring som inte bör användas som bindemedel. Materialet under skorpan kan också vara påverkat av fukt och en mindre andel ha reagerat. Inför stabilisering bör därför flygaskan testas i laboratorium först. Även om flygaskan lagras med täckning kan den påverkas av fukt och omgivande luft och bör alltid testas avseende reaktivitet och bindningseffekt.

I Finland har flygaska använts som bindemedel i kombination med cement och GGBS (granulerad mald masugnsslagg) för stabilisering av muddermassor i Åbo hamn. Detta projekt är ett EU-Life projekt³ där man för första gången använde processtabilisering, en utveckling av stso-metoden. Kolflygaskan som användes fuktades till ca 20 % och lagrades i anslutning till processtabiliseringsanläggningen i en "limpa" utan täckning. Ramboll Finland, som var en av de medverkande parterna, har inför fullskaleprojektet genomfört laboratorietester avseende åldring av flygaska upp till 3 månader med olika fukthalt, se figur 6.6. Resultaten visar att tryckhållfastheten halveras för flygaska som lagrats 90 dygn jämfört med en som lagrats 28 dygn. Resultaten visar också att fukthalten (vattenkvoten) upp till 25 % i flygaskan inte har någon större betydelse för hållfasthetsutvecklingen. Det är dock viktigt att vattenkvoten i flygaskan inte är för hög så att all reaktivitet i flygaskan är "förbrukad".

Ramboll Finlands erfarenheter är att reaktiviteten hos en fuktad flygaska minskar under de sex första månaderna för att sedan plana ut.

³ STABLE (LIFE06 ENV/FIN/000195), <http://projektit.ramboll.fi/life/stable/>



Figur 6.6 Tryckhållfastheten för flygaska lagrad 0, 7, 28 och 90 dygn innan inblandning i sediment (Ramboll Finland).

Compression strength for fly ash stored 0, 7, 28 and 90 days before admixture in sediment (Ramboll Finland).

Tryckhållfastheten för flygaska lagrad 0, 7, 28 och 90 dygn innan inblandning i sediment (Ramboll Finland). Den översta serien, 28 dygn, är samma flygaska men från ett annat leveranstillfälle.

6.5 Ekonomi och logistik

I ett s/s-projekt är det oftast stora volymer muddermassor som skall stabiliseras vilket kräver stora volymer bindemedel. Normalt ligger bindemedelsmängden på 100–200 kg/m³ muddermassor men även upp till 300 kg/m³ förekommer. Med traditionella kommersiella bindemedel som cement och Merit 5000, med ett marknadspris på ca 800 kr/ton, blir kostnaden för 100–200 kg/m³ bindemedel ca 80–160 kr/m³ muddermassor. Bindemedelskostnaden utgör ca 80 % av totala kostnaden för stabiliseringen.

Genom att utvärdera alternativa bindemedel, exempelvis flygaskor, med en betydligt lägre kostnad kan stora besparingar göras. I Gävle hamn, som tidigare nämnts, skall 1 miljon m³ muddermassor muddras. Om 30 % av bindemedlet kan ersättas med flygaskor med en uppskattad kostnad för flygaskan på 100 kr/ton och om bindemedelsmängden är 100 kg/m³ innebär detta en kostnadsbesparing på ca 20 miljoner kr (från 80 miljoner till 59 miljoner kr).

Från anläggningen där flygaskan produceras transporteras den normalt i bulkbil. Beroende på produktionsanläggningens geografiska läge kan alternativa transportsätt vara tåg eller fartyg. Transportkostnaden för bulktransport ligger på ca 100–150 kr/ton.

Typiska föroreningshalter i sediment från hamnar längs Sveriges kust									
Baserat på data från Göteborgs hamn, Halmstads hamn, Falkenbergs hamn, Norrköpings hamn, Oxelösunds hamn, Stegeluddan (Oxelösunds hamn), Gävle hamn									
Parameter		medel min	spänn min	medel max	spänn max	medel av medel	spänn medel	Gävle hamn	
								Sediment 2 totalhalter	Sediment 3 totalhalter
TS	%	16,37	7-23	60,50	44-75	33,87	25-44	20,5	21,5
GF	% av TS	5,60	2-11	14,23	15-18	11,03	5,6-12,8	17,8	14,3
TOC	% av TS	3,77	0,6-6,3	9,84	8-13	6,04	4,5-7,4	5,4	4,7
metaller									
As	mg/kg TS	3,53	2-200	44,75	8-200	12,82	5-33	53,7	54,8
Cd	mg/kg TS	0,27	0,05-1,23	15,63	1-65	1,91	0,4-8	2,63	1,55
Co	mg/kg TS	5,81	2,4-9,5	34,11	14-130	11,64	8-16	13,6	14,4
Cr	mg/kg TS	19,21	5-34	165,30	63-630	50,23	24-97	103	132
Cu	mg/kg TS	15,34	3-38	583,57	39-3300	63,92	19-172	137	87,6
Hg	mg/kg TS	0,08	0,15-0,34	5,99	0,4-19	0,64	0,1-1,6	2,2	0,0476
Ni	mg/kg TS	11,54	0,5-21,3	46,76	23-81	23,47	14-33	31,6	33,5
Pb	mg/kg TS	36,70	0,5-185	1829,04	35-9700	247,29	4-1147	666	437
Zn	mg/kg TS	118,33	31-455	5859,00	230-32000	678,82	138-3280	481	406
V	mg/kg TS	29,57	12-64	837,86	67-5305	83,87	46-193	96,2	99,6
Svavel								18100	12400
PCB:er									
Summa PCB (7)	mg/kg TS	0,01	0,00022-0,043	1,05	0,026-6,48	0,13	0,012-0,766	0,0319	0,021
PAH:er									
PAH,summa cancerogena	mg/kg TS	1,12	0,005-6,4	31,53	0,2-148	7,73	0,2-40	5,41	3,59
PAH,summa övriga	mg/kg TS	1,28	0,023-7,1	28,53	0,2-128	6,82	0,2-33	6,19	3,08
Tennororganiska föreningar									
Monobutyltenn	mg/kg TS	0,0015	0,001-0,004	0,0362	0,009-0,068	0,0115	0,006-0,017	0,0042	0,0082
Dibutyltenn	mg/kg TS	0,0024	0,001-0,006	0,1173	0,001-0,420	0,0259	0,001-0,059	0,0059	0,013
Tributyltenn	mg/kg TS	0,0030	0,001-0,015	0,6443	0,001-2,9	0,0910	0,001-0,296	0,016	0,012

Parameter		variation min	variation max	variation medel	Sediment 2 totalhalter	Sediment 3 totalhalter
TS	%	7-23	44-75	25-44	20,5	21,5
GF	% av TS	2-11	15-18	5,6-12,8	17,8	14,3
TOC	% av TS	0,6-6,3	8-13	4,5-7,4	5,4	4,7
metaller						
As	mg/kg TS	2-200	8-200	5-33	53,7	54,8
Cd	mg/kg TS	0,05-1,23	1-65	0,4-8	2,63	1,55
Co	mg/kg TS	2,4-9,5	14-130	8-16	13,6	14,4
Cr	mg/kg TS	5-34	63-630	24-97	103	132
Cu	mg/kg TS	3-38	39-3300	19-172	137	87,6
Hg	mg/kg TS	0,15-0,34	0,4-19	0,1-1,6	2,2	0,0476
Ni	mg/kg TS	0,5-21,3	23-81	14-33	31,6	33,5
Pb	mg/kg TS	0,5-185	35-9700	4-1147	666	437
Zn	mg/kg TS	31-455	230-32000	138-3280	481	406
V	mg/kg TS	12-64	67-5305	46-193	96,2	99,6
PCB:er						
Summa PCB (7)	mg/kg TS	0,00022-0,043	0,026-6,48	0,012-0,766	0,0319	0,021
PAH:er						
PAH,summa cancerogena	mg/kg TS	0,005-6,4	0,2-148	0,2-40	5,41	3,59
PAH,summa övriga	mg/kg TS	0,023-7,1	0,2-128	0,2-33	6,19	3,08
Tennororganiska föreningar						
Monobutyltenn	mg/kg TS	0,001-0,004	0,009-0,068	0,006-0,017	0,0042	0,0082
Dibutyltenn	mg/kg TS	0,001-0,006	0,001-0,420	0,001-0,059	0,0059	0,013
Tributyltenn	mg/kg TS	0,001-0,015	0,001-2,9	0,001-0,296	0,016	0,012

Slutsats:

sedimentproverna från Gävle hamn anses representativa för svenska hamnsediment. För de flesta parametrar ligger uppmätta halter inom variationen av medelvärden men för vissa parametrar är Gävle hamnsedimenten något högre än medel såsom As, Cr, Hg, Ni som är några av de metaller som anses problematiska i Gävle hamn. Sedimentet från Gävle hamn är på intet sätt ett särskilt förorenat område jämfört med andra hamnsediment.

A1 A2 A3

	(Enhet)	Vattenfall Uppsala	Målaenergi - CFB	Fortum-Värtan	Katrinefors Kraftvärme AB (KKAAB)	Stora Enso Fors AB	Stora Enso AB Hytte	Målaenergi-pulver	Örnsköldsvik	UmeEnergi	E.ON Örebro, AP5	Braviken	SCA Örtviken/ Östrand	Totalt
Panntyp		HVC (fastbränsle eldad hetvatten panna)	CFB panna 5	CFP eller kolpulver (oklart)	BFB	CFB	CFB	Pulver	FB (fluidiserande Blådd)	FB (se Övik)	CFB	Roster	BFB (Bubblande Fluid Blådd)	
Bränsle		torv och spån FACE_Tonvträ 75%/25% FUD-SALA_Kol/torv 70%/30%	65% biobränsle 15 % returträ, 20 torv juli	Kol	slam returpapper	Bark, skogsflis, torrlis, pellets och en liten del fiberhaltigt slam	Slam + RT-flis	90% torv restav kol (ändras lite dåddå)	Biobränsle Flis > 80 % & torv < 20%	Biobränsle Flis > 80 % & torv < 20%	20-30 %torv, 70-80 % träflis	1/3 bark, 1/3 rest från returfler (avslutningslam) och 1/3 RT-flis	Biobränsle +reningslam	
Mängd (Torr)	(ton/år)	20000 okt-maj	18 000 ton/år en månads stop ca juli	-	13000 (året runt)	2000 ton/år (1100 - 1200 jämt över året	35000 (året runt)	30 000 ton/år (går mellan okt-maj) 7-8 månader Finns möjlighet om säker avsättning finns under lång tid.		Data saknas	8 432 (2009)	5 300	20 000/15 000 Håller på med landtyllnad	166700
Gjdningsförlost	(%)		4,5	11	saknas	Loi 3, 5 & 7,1 %	3,1-6	4						3,5 - 11 %
pH	(%)	99,5	99,9	w = 0,1	100	Torr, w=0,4%	100	99,9			99,8		torrt	ca 99 %
Elektrisk konduktivitet	(mS/m)	12,5	12,6	12,5	12,9	12,9	12,5	saknas			12,5-12,9	12,6		12,5 - 12,9
Totalt organiskt kol (TOC)	(%)	< 1,0	saknas	saknas	saknas	saknas	saknas	saknas			0,58	5- 9%		1 - 9 %
CaO (aktiv)	(%)	19,7	4,6	?	7,4-42	12,4 -13,1	11,3	8,8			Saknas	-	7,02	1,8 -13,1 %
CaO (tot)	(%)	saknas	saknas	?	saknas	26	saknas	saknas			Saknas	36,1	-	26 - 36 %??
Värmeutveckling	ton/m3	saknas	45 C	-	50 C	90 C	saknas	saknas			Saknas		anlaggen ja	45 - 95 C??
Torrdensitet		Ja	1,425	1,68	1,3	960	Finns	1,424			885	Finns	Finns	
Kornstorleksfördelning ²⁾		Ja	Q4-107	Finns antagligen	Ja	Finns	Ja	Q6-632				Finns	Finns	
Totalhalt metaller ¹⁾		Ja	Finns (Oxider saknas)	Finns ?	Ja	Ja	Ja	Finns (Oxider saknas)			Blifogas	Finns	Finns	
Totalhalt organiska föreningar (PCB, PAH, dioxiner) ¹⁾		Ja	saknas	saknas	saknas	Ja	Ja	saknas			Saknas	-		
Totalhalt organiska föreningar (PCB, PAH, dioxiner) ¹⁾		Finns analysresultat	saknas	saknas	saknas	Inert avfall	saknas	saknas			Saknas			
Andra genomförda tester t ex hållfasthet		2,0 MPa (1,4 dygn) 2,5 MPa (28 dygn)	2,4 MPa (14d) & 5,5MPa (28d)	8,1 MPa (1,4 d)	10,5 MPa (28 dygn), w=35%	4,5 MPa efter 14 d	12,2 MPa efter 14 d				Hårdande	3 MPa (14 d)	27 MPa vid w 26%	2,0 - 27 MPa (14d)
Lagring (kapacitet och metod)		2 st 650 m ³	Hårdar inom dagar. Tillsats av cement ger bättre beständighet mot frost och vittring.	ej av intresse, finns stora silos	Silo 300 m ³	Hårdar snabbt, mellansilo torrförvaring racker från fredag till måndag Flexibelt	Silo 600 m ³	Hårdar inom dagar. Tillsats av cement ger bättre beständighet mot frost och vittring			Econova	Vältagning (ca 20%vattenhalt) alternativt daglig transport.	finns, lagras i "Svarta Sockertrappor"	
Kostnad	(kr/ton)	oklart	oklart	ej av intresse, "Hemligt"	oklart	Hemligt	30-40 kr/ton	-				Deponeras idag	Det är > 30 mil i transport landväg, men det kan finnas möjlighet att använda båt och eller tåg.	
Permeabilitet	m/s				6,7 *10 ⁻⁸		1*10 ⁻¹⁰							
Referensprojekt		Flera askvägprojekt, FUD uppsala, FACE m fl	Värmeforsk, FACE (870) Aska i betong (848)	Stabilisering av farligt avfall	Miljöteknisk undersökning - ployvta Bångahagens avfallsdeponi	Värmeforsk, FACE, Norberg Aska i betong	Miljöteknisk undersökning - slutäckning Skene Skog mfl	Värmeforsk, FACE (870) FUD-SALA (1055) Aska i betong (848)		Intresse finns	Använts i FSA, Norberg	Rapport 862 & 870	Samarbete med skogsstyrelsen i grusväg Örtviken och Östrand flygaskor används sedan länge för att fylla ut bygga land inom industriområdet.	

Bilaga 2
Askleverantörer

Panntyp	(Enhet)
Bränsle	
Volym (Torr)	(ton/år)
Gjdningsförlost	(%)
Torrhalt	(%)
pH	
Elektrisk konduktivitet	(mS/m)
Totalt organiskt kol (TOC)	(%)
CaO (aktiv)	(%)
CaO (tot)	(%)
Värmeutveckling	
Torrdensitet	ton/m3
Kornstorleksfördelning ²⁾	
Totalhalt metaller ¹⁾	
Totalhalt näringsämnen ¹⁾	
Totalhalt organiska föreningar (PCB, PAH, dioxiner) ¹⁾	
Andra genomförda tester t ex hållfasthet	
Lagring (kapacitet och metod)	
Kostnad	(kr/ton)
Referensprojekt	

Bilaga 2

Miljögeotekniska resultat

1. Totalhalter flygaskor

Tabell 1 Totalhalter av metaller i askor. A1-A5 markerat med grått är de askor som de facto ingår i denna studie. A6 och A7 ingår i Gävle Hamnsprojektet och A8 i examensarbetet

Ämne	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Si	121 000	161 000	121 000	135 000	134 000	109 000	252 000	242 000
Al	20 600	47 500	67 400	43 400	57 500	18 500	128 000	115 000
Ca	223 000	189 000	148 000	191 000	223 000	203 000	38 100	37 200
Fe	36 300	80 800	25 100	48 100	28 100	32 400	41 700	46 200
K	6 110	12 300	9 540	9 530	20 000	4 650	15 000	15 500
Mg	105 000	13 000	72 100	61 400	42 400	96 200	12 600	14 700
Mn	1 070	732	945	905	3 660	985	552	604
Na	1 430	4 520	4 400	3 550	6 870	1 270	6 050	8 770
P	3 000	6 440	2 350	4 200	6 340	2 790	4 520	3 320
Ti	537	2 520	2 920	1 940	2 950	465	7 100	6 200
As	10	39,3	14,3	19,7	40,7	8,85	30,7	18,8
Ba	624	995	1 640	1 040	1 360	537	2 000	1 830
Be	2,57	3,53	4,37	3,38	2,21	2,28	8,81	7,28
Cd	0,743	1,24	0,534	0,867	4,33	0,716	0,628	0,845
Co	5,65	14,1	21,5	13	13,9	5,73	33,8	29,5
Cr	44,7	76,5	51	61,1	117	43	171	160
Cu	21,9	71,6	37,2	49,9	193	22,2	72,3	75,1
Hg	0,336	0,798	0,567	0,536	0,366	0,317	0,398	0,458
Mo	13,9	7,78	<6	8,01	7,92	11,8	11,2	8,84
Nb	<6	7,76	12	6,27	6,64	<6	25,2	21,4
Ni	12,4	57,8	64,8	45,8	48,1	13,7	79,2	85,4
Pb	17,5	70,7	29	40,4	132	15,7	51,1	37,5
S	12 400	30 700	12 100	20 800	15 500	12 100	1 880	2 470
Sc	4,78	8,3	8,55	7,33	4,57	4,23	23,8	22,5
Sn	0,924	3,62	2,29	2,29	6,94	0,904	6,93	6,63
Sr	215	665	1 330	684	761	198	1 700	1 930
V	29,9	102	70	69	51,6	26,8	180	201
W	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60
Y	49,2	29,6	32,8	37,8	25,5	46,2	69,1	59,1
Zn	116	104	94	105	1 450	116	145	141
Zr	56,9	173	226	150	222	48	430	367

2. Kornfördelning, sediment

Objekt L 0914049

Provt.plats

Sekt./B-hål

Beställare ALS Scandinavia AB

Märkning 501966

Material Sediment

Provtagare

Provt.datum

Väg nr

Djup

Entreprenör

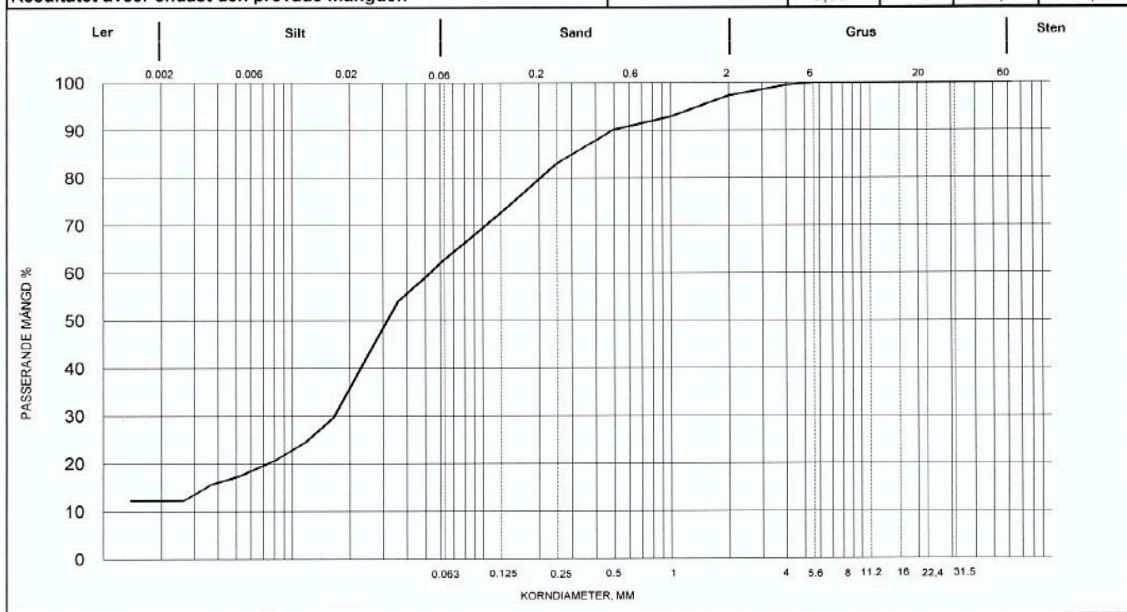
Leverantör

Reg.nummer: 090902-4

Kornstorleksfördelning enligt SSEN 933-1

SIKT	INVÄGT, g	%	ACC %
31,500	0,0	0,0	100,0
22,400	0,0	0,0	100,0
16,000	0,0	0,0	100,0
11,200	0,0	0,0	100,0
8,000	0,0	0,0	100,0
5,600	0,0	0,0	100,0
4,000	0,1	0,5	99,5
2,000	0,4	2,2	97,3
1,000	0,8	4,4	92,9
0,500	0,5	2,7	90,2
0,250	1,3	7,1	83,1
0,125	1,9	10,4	72,7
0,063	1,8	9,8	62,8
BORT:	11,5	62,8	
SEDIMENTATION			
0,036		92,6	54,1
0,026		74,7	43,6
0,016		50,8	29,7
0,008		35,9	20,9
0,004		26,9	15,7
0,001		20,9	12,2

HYDROMETERMETOD	Hydrometer nr	3564	f.d.SS 027124
Halt (0.002/0.063) vikt-%		19,4	
Organisk halt %			f.d.SS 132120
Graderingstal; d60/d10			
Jordart			SGF 81
Tjälfarighetsklass och materialtyp			ATB VAG
Vattenkvot %			f.d.SS 02 71 16
Totalt inlämnat prov (kg):		2,2	
Totalt invägt.siktning (g):		18,3	
Sedimentationsförsök, (g)		8,4	f.d.SS 02 71 24
Resultatet avser endast den provade mängden			



Anm:

Provingsansvarig: *[Signature]* Datum: 090904 Tvättsikt: Ja

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat

Kunden har informerats om mätosäkerheten vid kontraktsgenomgången

Figur 1. Kornfördelningskurva sediment 2.

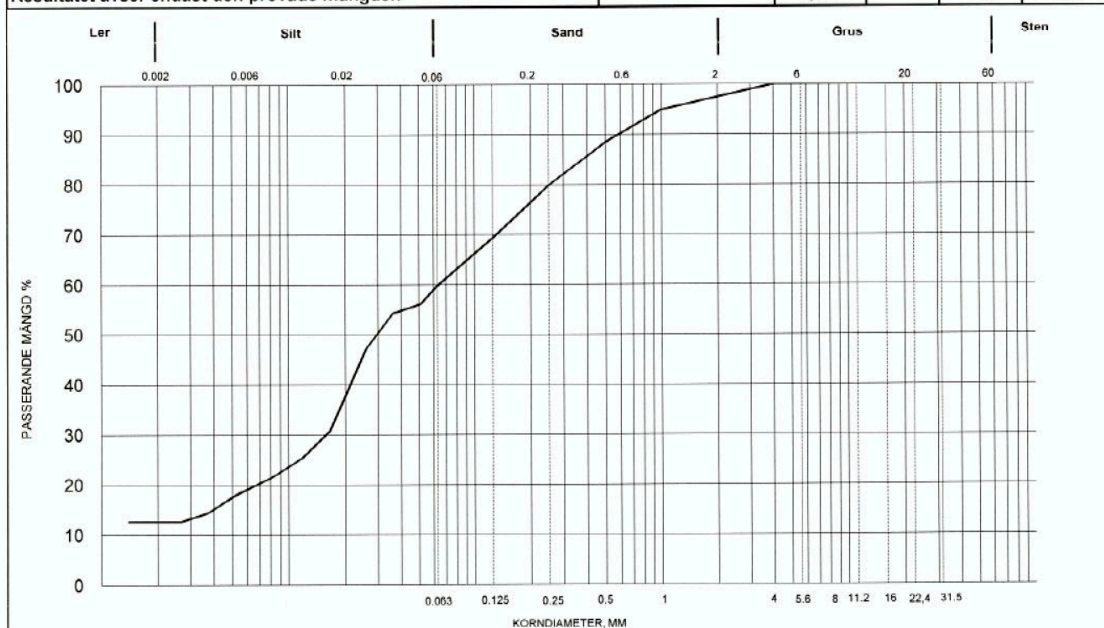
Objekt **L 0914049**
 Provt.plats
 Sekt./B-hål
 Beställare **ALS Scandinavia AB**
 Märkning **501967**
 Material **Sediment**
 Provtagare
 Provt.datum
 Väg nr
 Djup
 Entreprenör
 Leverantör

Reg.nummer: 090902-4

Kornstorleksfördelning enligt SSEN 933-1

SIKT	INVÄGT, g	%	ACC %
31,500	0,0	0,0	100,0
22,400	0,0	0,0	100,0
16,000	0,0	0,0	100,0
11,200	0,0	0,0	100,0
8,000	0,0	0,0	100,0
5,600	0,0	0,0	100,0
4,000	0,0	0,0	100,0
2,000	0,5	2,5	97,5
1,000	0,5	2,5	95,0
0,500	1,3	6,5	88,4
0,250	1,7	8,5	79,9
0,125	2,1	10,6	69,3
0,063	1,9	9,5	59,8
BORT:	11,9	59,8	
SEDIMENTATION			
0,036		81,7	54,4
0,026		70,8	47,1
0,017		46,3	30,8
0,008		32,7	21,7
0,004		21,8	14,5
0,001		19,1	12,7

HYDROMETERMETOD	Hydrometer nr	3504	f.d.SS 027124
Halt (0.002/0.063) vikt-%		21,2	
Organisk halt %			f.d.SS 132120
Graderingstal; d60/d10			
Jordart			SGF 81
Tjälffarighetsklass och materialtyp			ATB VAG
Vattenkvot %			f.d.SS 02 71 16
Totalt inlämnat prov (kg):		2,5	
Totalt invägt, siktning (g):		19,9	
Sedimentationsförsök, (g)		9,2	f.d.SS 02 71 24
Resultatet avser endast den provade mängden			



Anm:

Provningsansvarig: *[Signature]* Datum: 090904 Tvättsikt: Ja

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat.
 Kunden har informerats om mätosäkerheten vid kontraktsgenomgången.

Figur 2. Kornfördelningskurva sediment 3.

3. Kornfördelning askor

Objekt L 0913303

Provt.plats

Sekt./B-hål

Beställare ALS Scandinavia AB

Märkning 499503

Material Aska

Provtagare

Provt.datum

Väg nr

Djup

Entreprenör

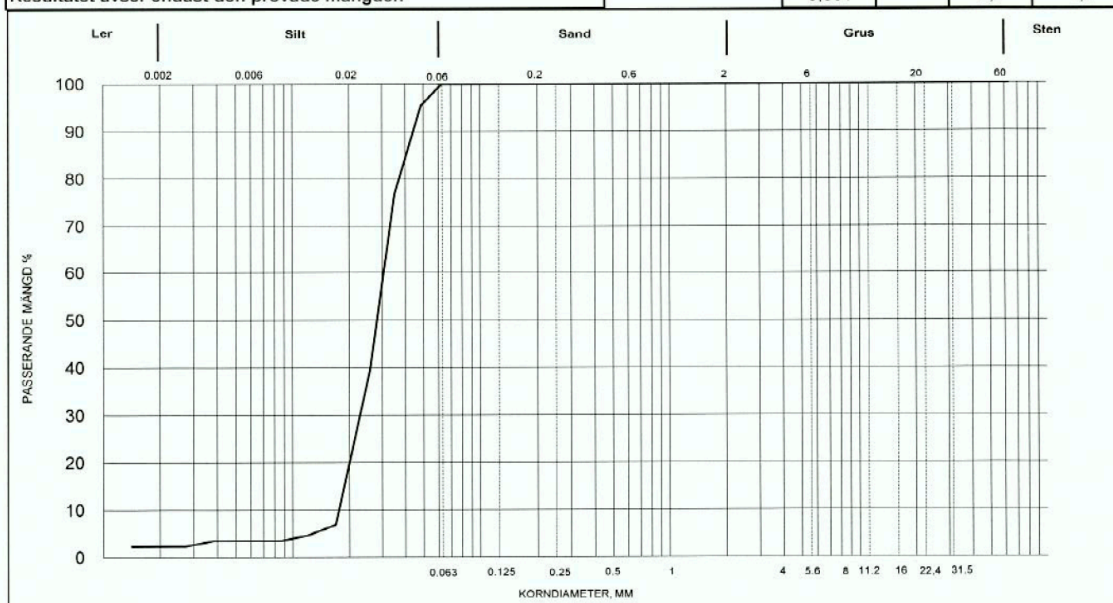
Leverantör

Reg.nummer: 090819-4

Kornstorleksfördelning enligt SSEN 933-1

SIKT	INVÄGT, g	%	ACC %
31,500	0,0	0,0	100,0
22,400	0,0	0,0	100,0
16,000	0,0	0,0	100,0
11,200	0,0	0,0	100,0
8,000	0,0	0,0	100,0
5,600	0,0	0,0	100,0
4,000	0,0	0,0	100,0
2,000	0,0	0,0	100,0
1,000	0,0	0,0	100,0
0,500	0,0	0,0	100,0
0,250	0,0	0,0	100,0
0,125	0,0	0,0	100,0
0,063	0,0	0,0	100,0
BORT:	0,0	100,0	
SEDIMENTATION			
0,035		77,2	76,7
0,026		39,8	39,5
0,017		7,0	7,0
0,008		3,5	3,5
0,004		3,5	3,5
0,001		2,3	2,3

HYDROMETERMETOD	Hydrometer nr	3607	f.d SS 027124
Halt (0.002/0.063) vikt-%		2,3	
Organisk halt %			f.d SS 132120
Graderingstal; d60/d10			
Jordart			SGF 81
Tjälfarlighetsklass och materialtyp			ATB VÄG
Vattenkvot %			f.d SS 02 71 16
Totalt inlämnat prov (kg):		0,7	
Totalt invägt, siktning (g):		0,0	
Sedimentationsförsök, (g)		21,4	f.d SS 02 71 24
Resultatet avser endast den provade mängden			



Anm:

Provingsansvarig: *[Signature]*

Datum: 090827

Tvättsikt: Ja

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat.
Kunden har informerats om mätosäkerheten vid kontraktsgenomgången

Figur 3. Kornfördelningskurva Aska 1, Uppsala värmeverk

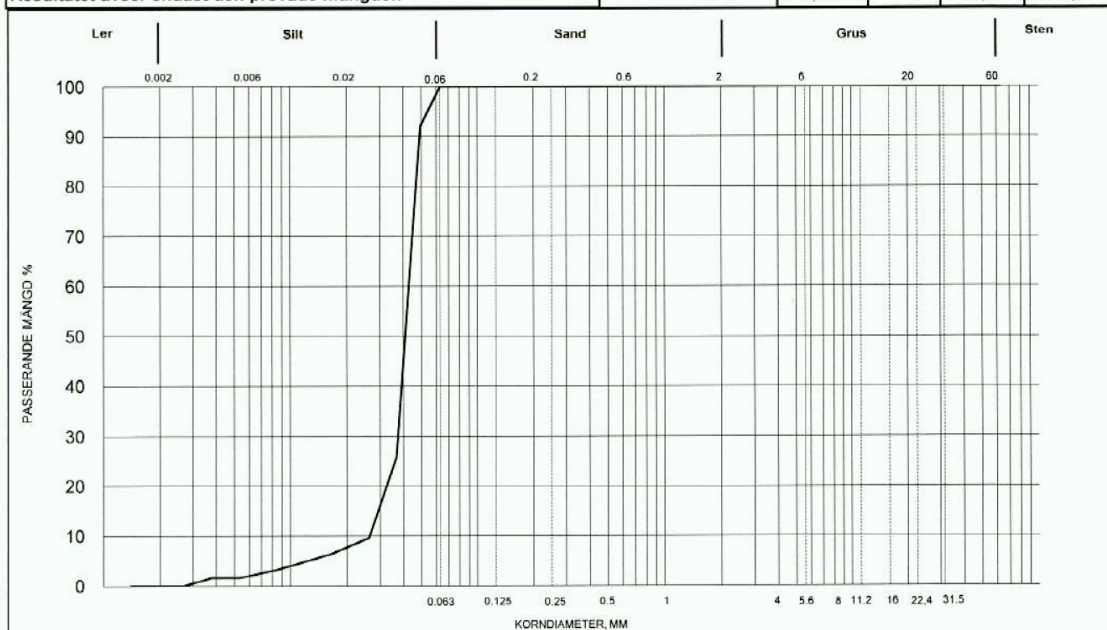
Objekt **L 0913303**
 Provt.plats
 Sekt./B-hål
 Beställare **ALS Scandinavia AB**
 Märkning **499504**
 Material **Aska**
 Provtagare
 Provt.datum
 Väg nr
 Djup
 Entreprenör
 Leverantör

Reg.nummer: 090819-4

Kornstorleksfördelning enligt SSEN 933-1

SIKT	INVÄGT, g	%	ACC %
31,500	0,0	0,0	100,0
22,400	0,0	0,0	100,0
16,000	0,0	0,0	100,0
11,200	0,0	0,0	100,0
8,000	0,0	0,0	100,0
5,600	0,0	0,0	100,0
4,000	0,0	0,0	100,0
2,000	0,0	0,0	100,0
1,000	0,0	0,0	100,0
0,500	0,0	0,0	100,0
0,250	0,0	0,0	100,0
0,125	0,0	0,0	100,0
0,063	0,0	0,0	100,0
BORT:	0,0	100,0	
SEDIMENTATION			
0,037		17,7	25,8
0,026		6,6	9,7
0,017		4,4	6,5
0,008		2,2	3,2
0,004		1,1	1,6
0,001		0,0	0,0

HYDROMETERMETOD	Hydrometer nr 3564	f.d.SS 027124
Halt (0.002/0.063) vikt-%	0,0	
Organisk halt %		f.d.SS 132120
Graderingstal; d60/d10		
Jordart		SGF 81
Tjälfarighetsklass och materialtyp		ATB VAG
Vattenkvot %		f.d.SS 02 71 16
Totalt inlämnat prov (kg):	0,7	
Totalt invägt, siktning (g):	0,0	
Sedimentationsförsök, (g)	22,6	f.d.SS 02 71 24
Resultatet avser endast den provade mängden		



Anm:

Provningsansvarig: *Pekka*
 Datum: 090827
 Tvättsikt: Ja

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat.
 Kunden har informerats om mätosäkerheten vid kontraktsgenomgången.

Figur 4. Kornfördelningskurva Aska 2, Mälarenergi, Västerås

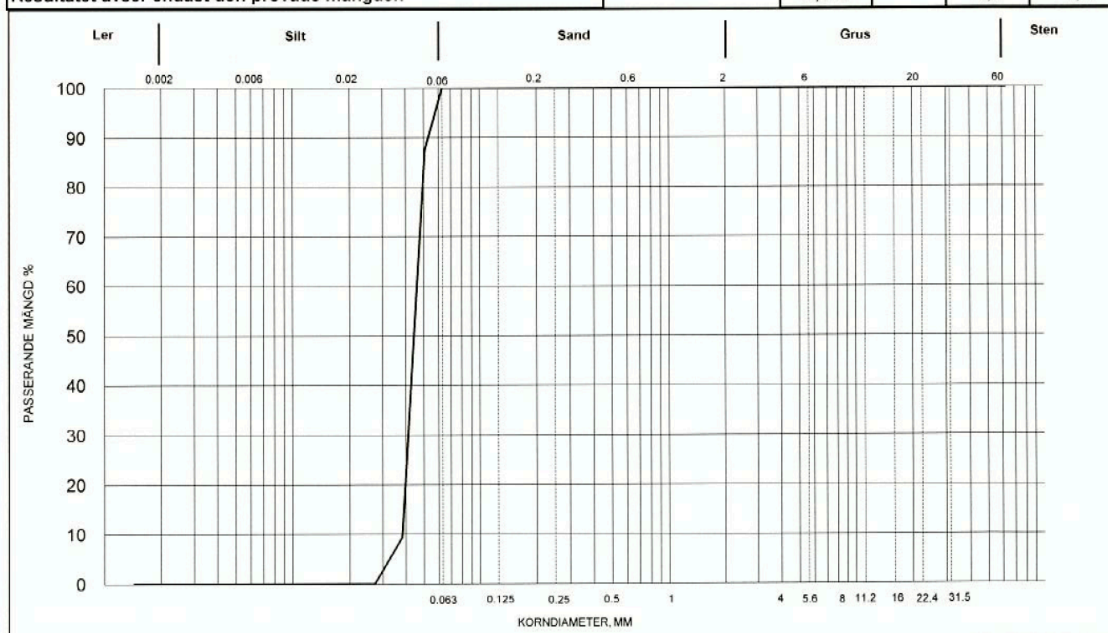
Objekt **L 0913303**
 Provt.plats
 Sekt./B-hål
 Beställare **ALS Scandinavia AB**
 Märkning **499505**
 Material **Aska**
 Provtagare
 Provt.datum
 Väg nr
 Djup
 Entreprenör
 Leverantör

Reg.nummer: 090819-4

Kornstorleksfördelning enligt SSEN 933-1

SIKT	INVÄGT, g	%	ACC %
31,500	0,0	0,0	100,0
22,400	0,0	0,0	100,0
16,000	0,0	0,0	100,0
11,200	0,0	0,0	100,0
8,000	0,0	0,0	100,0
5,600	0,0	0,0	100,0
4,000	0,0	0,0	100,0
2,000	0,0	0,0	100,0
1,000	0,0	0,0	100,0
0,500	0,0	0,0	100,0
0,250	0,0	0,0	100,0
0,125	0,0	0,0	100,0
0,063	0,0	0,0	100,0
BORT:	0,0	100,0	
SEDIMENTATION			
0,038		7,4	9,4
0,027		0,0	0,0
0,017		0,0	0,0
0,009		0,0	0,0
0,004		0,0	0,0
0,001		0,0	0,0

HYDROMETERMETOD	Hydrometer nr 2437	f.d.SS 027124
Halt (0.002/0.063) vikt-%	0,0	
Organisk halt %		f.d.SS 132120
Graderingstal; d60/d10		
Jordart		SGF 81
Tjälfarighetsklass och materialtyp		ATB VAG
Vattenkvot %		f.d.SS 02 71 16
Totalt inlämnat prov (kg):	0,7	
Totalt invägt, siktning (g):	0,0	
Sedimentationsförsök, (g)	20,4	f.d.SS 02 71 24
Resultatet avser endast den provade mängden		



Anm:

Provingsansvarig: *Rikoe*
 Datum: 090827
 Tvättsikt: Ja

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat.
 Kunden har informerats om måtosäkerheten vid kontraktsgenomgången

Figur 5. Kornfördelningskurva Aska 3, Fortum, Värtan

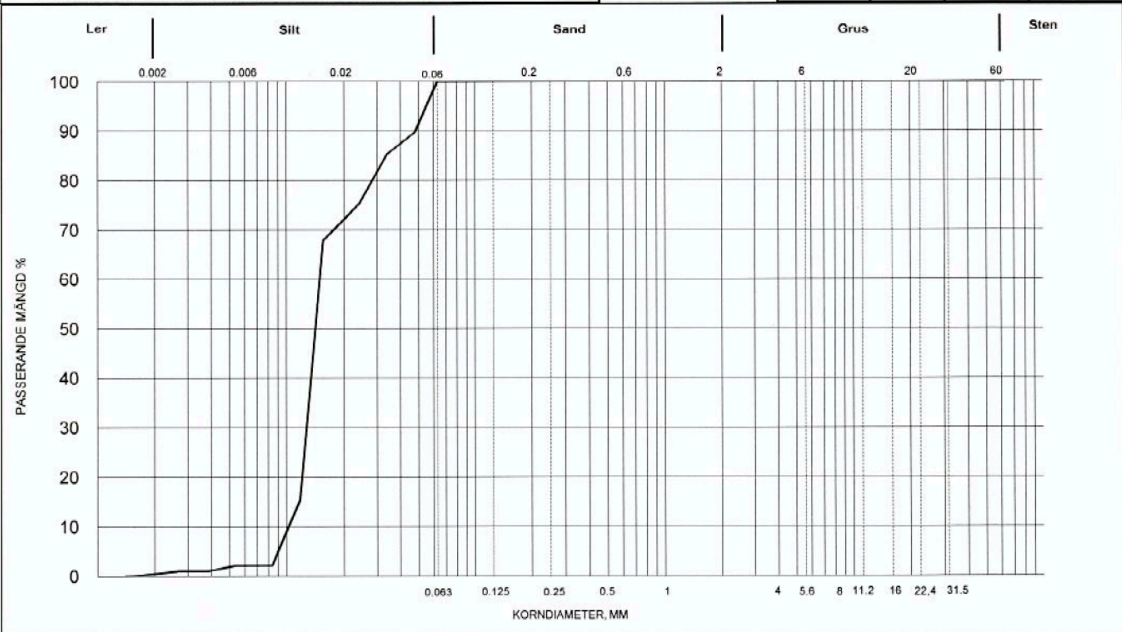
Objekt L 0913304
Prov.t.plats
Sekt./B-hål
Beställare ALS Scandinavia AB
Märkning 499506
Material Aska
Provtagare
Provt.datum
Väg nr
Djup
Entreprenör
Leverantör

Reg.nummer: 090819-4

Kornstorleksfördelning enligt SSEN 933-1

SIKT	INVÄGT, g	%	ACC %
31,500	0,0	0,0	100,0
22,400	0,0	0,0	100,0
16,000	0,0	0,0	100,0
11,200	0,0	0,0	100,0
8,000	0,0	0,0	100,0
5,600	0,0	0,0	100,0
4,000	0,0	0,0	100,0
2,000	0,0	0,0	100,0
1,000	0,0	0,0	100,0
0,500	0,0	0,0	100,0
0,250	0,0	0,0	100,0
0,125	0,0	0,0	100,0
0,063	0,0	0,0	100,0
BORT:	0,0	100,0	
SEDIMENTATION			
0,034		83,5	85,4
0,024		73,9	75,5
0,016		66,4	67,9
0,008		2,1	2,2
0,004		1,1	1,1
0,001		0,5	0,0

HYDROMETERMETOD	Hydrometer nr 3504	f.d.SS 027124
Halt (0.002/0.063) vikt-%	0,5	
Organisk halt %		f.d.SS 132120
Graderingstal; d60/d10		
Jordart		SGF 81
Tjälfarlighetsklass och materialtyp		ATB VÄG
Vattenkvot %		f.d.SS 02 71 16
Totalt inlämnat prov (kg):	0,7	
Totalt invägt, siktning (g):	0,0	
Sedimentationsförsök, (g)	23,3	f.d.SS 02 71 24
Resultatet avser endast den provade mängden		



Anm:
Provnsansvarig: *P. Sjö* Datum: 090827 Tvättsikt: Ja

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat
Kunden har informerats om måtosäkerheten vid kontraktsgenombgången

Figur 6. Kornfördelningskurva Aska 4, blandning av A1/A2/A3 med proportioner 33/33/33

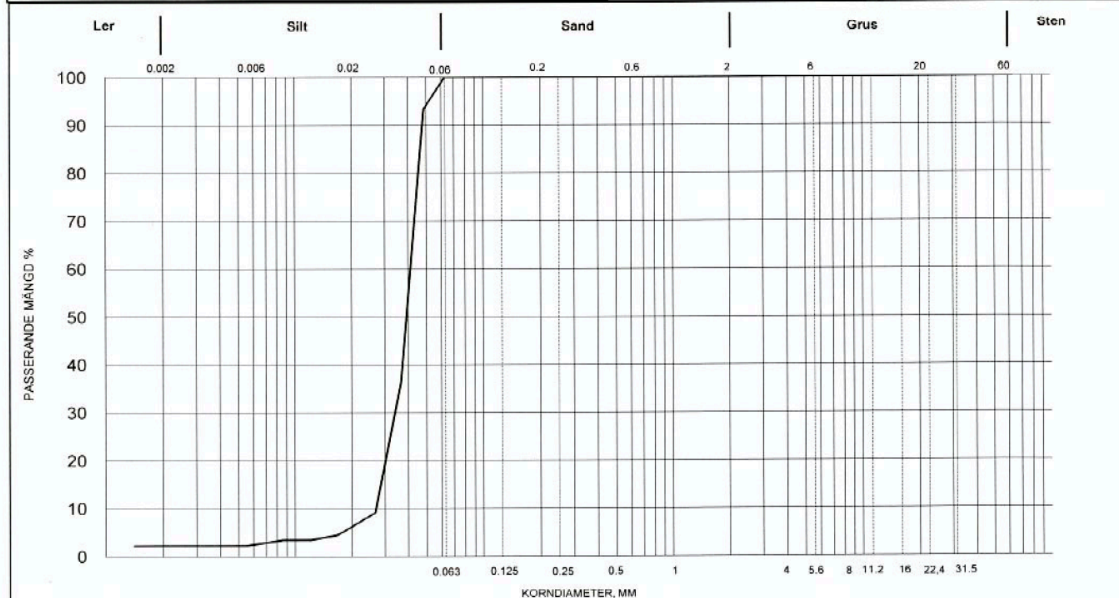
Objekt **L 0913304**
 Provt.plats
 Sekt./B-hål
 Beställare **ALS Scandinavia AB**
 Märkning **499507**
 Material **Aska**
 Provtagare
 Provt.datum
 Väg nr
 Djup
 Entreprenör
 Leverantör

Reg.nummer: 090819-4

Kornstorleksfördelning enligt SSEN 933-1

SIKT	INVÄGT, g	%	ACC %
31,500	0,0	0,0	100,0
22,400	0,0	0,0	100,0
16,000	0,0	0,0	100,0
11,200	0,0	0,0	100,0
8,000	0,0	0,0	100,0
5,600	0,0	0,0	100,0
4,000	0,0	0,0	100,0
2,000	0,0	0,0	100,0
1,000	0,0	0,0	100,0
0,500	0,0	0,0	100,0
0,250	0,0	0,0	100,0
0,125	0,0	0,0	100,0
0,063	0,0	0,0	100,0
BORT:	0,0	100,0	
SEDIMENTATION			
0,037		28,6	36,4
0,027		7,2	9,1
0,017		3,6	4,5
0,008		2,7	3,4
0,004		1,8	2,3
0,001		1,8	2,3

HYDROMETERMETOD	Hydrometer nr 3607	f.d.SS 027124
Halt (0.002/0.063) vikt-%	2,3	
Organisk halt %		f.d.SS 132120
Graderingstal; d60/d10		
Jordart		SGF 81
Tjälfarlighetsklass och materialtyp		ATB VÄG
Vattenkvot %		f.d.SS 02 71 16
Totalt inlämnat prov (kg):	0,7	
Totalt invägt, siktning (g):	0,0	
Sedimentationsförsök, (g)	27,9	f.d.SS 02 71 24
Resultatet avser endast den provade mängden		



Anm:	
Provningsansvarig: <i>P. Koz</i>	Datum: 090827 Tvättsikt: Ja

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat
 Kunden har informerats om mätosäkerheten vid kontraktsgenomgången

Figur 7. Kornfördelningskurva Aska 5, blandning av A4/A5b där A5b består av askor från Stora Enso Hylte/Stora Enso Fors/Katrinefors kraftvärme. A5b har proportioner 33/33/33 och blandningen A4/A5b har proportioner 50/50.

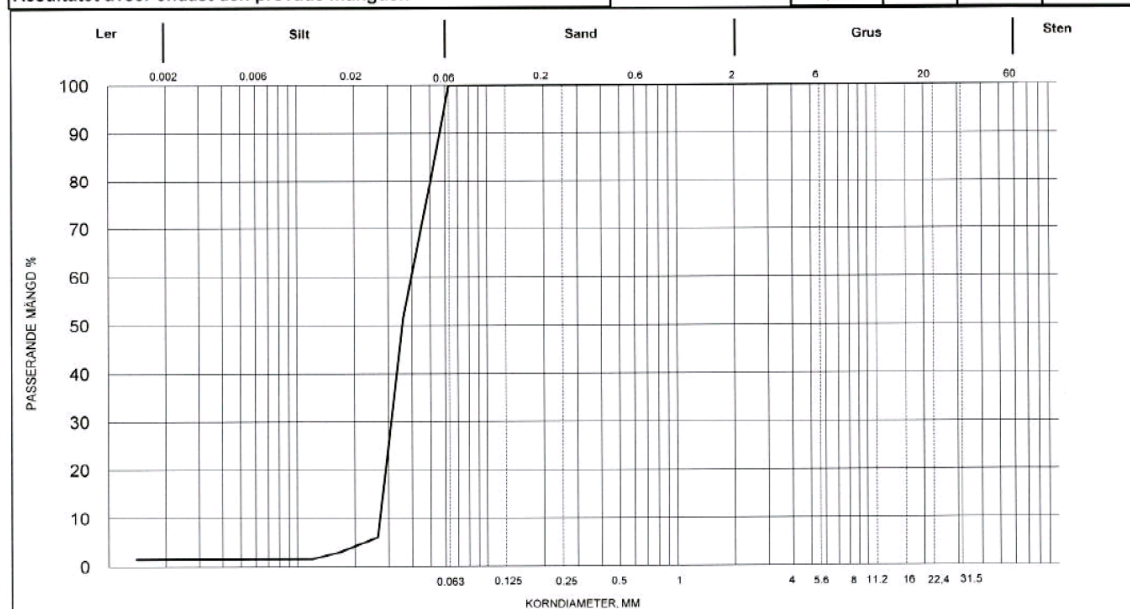
Objekt **L 0913304**
 Provt.plats
 Sekt./B-hål
 Beställare **ALS Scandinavia AB**
 Märkning **499508**
 Material **Aska**
 Provtagare
 Provt.datum
 Väg nr
 Djup
 Entreprenör
 Leverantör

Reg.nummer: 090819-4

Kornstorleksfördelning enligt SSEN 933-1

SIKT	INVÄGT, g	%	ACC %
31,500	0,0	0,0	100,0
22,400	0,0	0,0	100,0
16,000	0,0	0,0	100,0
11,200	0,0	0,0	100,0
8,000	0,0	0,0	100,0
5,600	0,0	0,0	100,0
4,000	0,0	0,0	100,0
2,000	0,0	0,0	100,0
1,000	0,0	0,0	100,0
0,500	0,0	0,0	100,0
0,250	0,0	0,0	100,0
0,125	0,0	0,0	100,0
0,063	0,0	0,0	100,0
BORT:	0,0	100,0	
SEDIMENTATION			
0,036		28,7	51,5
0,026		3,4	6,1
0,017		1,7	3,0
0,008		0,8	1,5
0,004		0,8	1,5
0,001		0,8	1,5

HYDROMETERMETOD	Hydrometer nr	3564	f.d SS 027124
Halt (0.002/0.063) vikt-%		1,5	
Organisk halt %			f.d SS 132120
Graderingstal; d60/d10			
Jordart			SGF 81
Tjälfarlighetsklass och materialtyp			ATB VÄG
Vattenkvot %			f.d SS 02 71 16
Totalt inlämnat prov (kg):		0,7	
Totalt invägt, siktning (g):		0,0	
Sedimentationsförsök, (g)		29,6	f.d SS 02 71 24
Resultatet avser endast den provade mängden			



Anm:	
Provningsansvarig: <i>P. L. L.</i>	Datum: 090827 Tvåttsikt: Ja

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat
 Kunden har informerats om mätosäkerheten vid kontraktsgenomgången

Figur 8. Kornfördelningskurva Aska 6. Lagrad från Uppsala

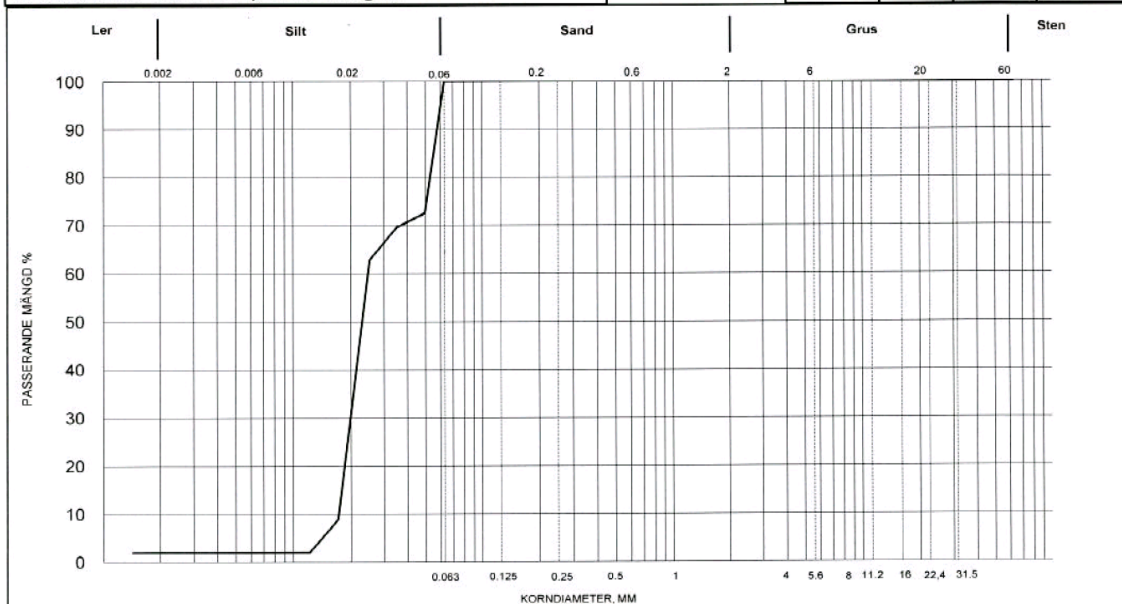
Objekt **L 0913304**
 Provt.plats
 Sekt./B-hål
 Beställare **ALS Scandinavia AB**
 Märkning **499509**
 Material **Aska**
 Provtagare
 Provt.datum
 Väg nr
 Djup
 Entreprenör
 Leverantör

Reg.nummer: 090819-4

Kornstorleksfördelning enligt SSEN 933-1

SIKT	INVÄGT, g	%	ACC %
31,500	0,0	0,0	100,0
22,400	0,0	0,0	100,0
16,000	0,0	0,0	100,0
11,200	0,0	0,0	100,0
8,000	0,0	0,0	100,0
5,600	0,0	0,0	100,0
4,000	0,0	0,0	100,0
2,000	0,0	0,0	100,0
1,000	0,0	0,0	100,0
0,500	0,0	0,0	100,0
0,250	0,0	0,0	100,0
0,125	0,0	0,0	100,0
0,063	0,0	0,0	100,0
BORT:	0,0	100,0	
SEDIMENTATION			
0,035		56,7	69,6
0,025		51,2	62,7
0,017		7,2	8,8
0,009		1,6	2,0
0,004		1,6	2,0
0,001		1,6	2,0

HYDROMETERMETOD	Hydrometer nr	2437	f.d.SS 027124
Halt (0.002/0.063) vikt-%		2,0	
Organisk halt %			f.d.SS 132120
Graderingstal; d60/d10			
Jordart			SGF 81
Tjälfarlighetsklass och materialtyp			ATB VÄG
Vattenkvot %			f.d.SS 02 71 16
Totalt inlämnat prov (kg):		0,7	
Totalt invägt, siktning (g):		0,0	
Sedimentationsförsök, (g)		31,3	f.d.SS 02 71 24
Resultatet avser endast den provade mängden			



Anm:			
Provningsansvarig:	<i>P. K. K.</i>	Datum:	090827
		Tvåttsikt:	Ja

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat
 Kunden har informerats om måtosäkerheten vid kontraktsgenomgången

Figur 9. Kornfördelningskurva Ask 7. Torr kolaska amagerverket

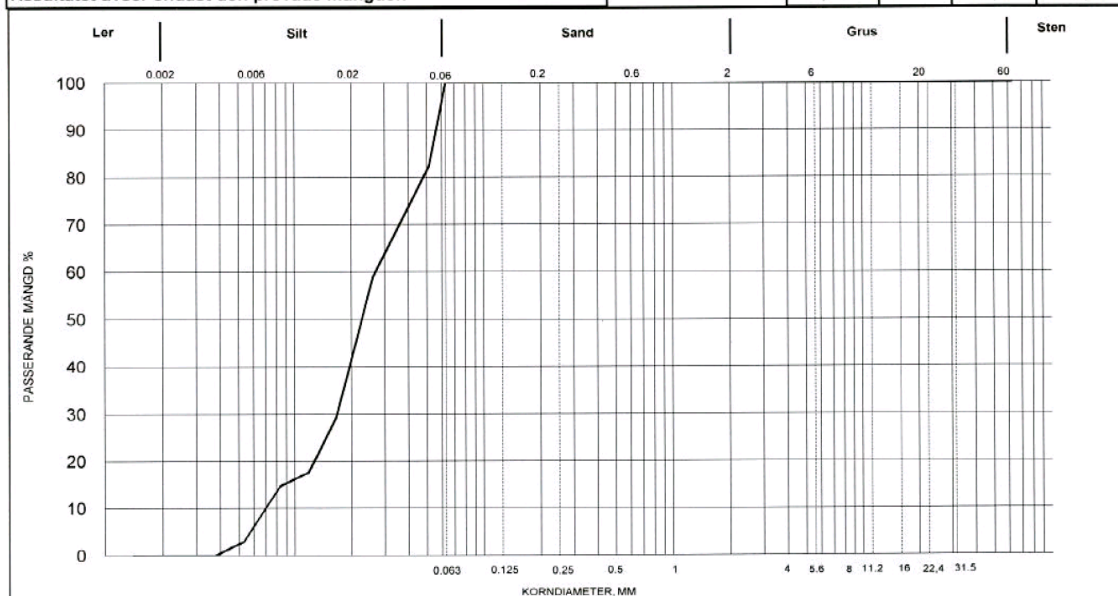
Objekt **L 0913304**
 Provt.plats
 Sekt./B-hål
 Beställare **ALS Scandinavia AB**
 Märkning **499510**
 Material **Aska**
 Provtagare
 Provt.datum
 Väg nr
 Djup
 Entreprenör
 Leverantör

Reg.nummer: 090819-4

Kornstorleksfördelning enligt SSEN 933-1

SIKT	INVÄGT, g	%	ACC %
31,500	0,0	0,0	100,0
22,400	0,0	0,0	100,0
16,000	0,0	0,0	100,0
11,200	0,0	0,0	100,0
8,000	0,0	0,0	100,0
5,600	0,0	0,0	100,0
4,000	0,0	0,0	100,0
2,000	0,0	0,0	100,0
1,000	0,0	0,0	100,0
0,500	0,0	0,0	100,0
0,250	0,0	0,0	100,0
0,125	0,0	0,0	100,0
0,063	0,0	0,0	100,0
BORT:	0,0	100,0	
SEDIMENTATION			
0,037		35,8	70,6
0,026		29,9	58,8
0,017		14,9	29,4
0,008		7,5	14,7
0,004		0,0	0,0
0,001		0,0	0,0

HYDROMETERMETOD	Hydrometer nr	3504	f.d SS 027124
Halt (0.002/0.063) vikt-%		0,0	
Organisk halt %			f.d SS 132120
Graderingstal; d60/d10			
Jordart			SGF 81
Tjälfarlighetsklass och materialtyp			ATB VÄG
Vattenkvot %			f.d SS 02 71 16
Totalt inlämnat prov (kg):		0,7	
Totalt invägt, siktning (g):		0,0	
Sedimentationsförsök, (g)		16,7	f.d SS 02 71 24
Resultatet avser endast den provade mängden			



Anm:
 Provingsansvarig: *[Signature]*
 Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat
 Kunden har informerats om mätosäkerheten vid kontraktsgenomgången
 Datum: 090827 Tvättsikt: Ja

Figur 10. Kornfördelningskurva Aska 8. Lagrad kolaska Nordjyllandsverket

4. Tryckhållfasthet, densitet och vattenkvot för s/s blandningar

Tryckhållfasthet, densitet och vattenkvot, 28d

Tabell 2. Uppnådda värden efter 28d härdningstid. Dubbelprov.

Serie	Sed	σ_{Brott} [kPa]	ρ [kg/m ³]	w_N [%]
C/M/A1	2	370	1320	155
C/M/A1	2	346	1303	
C/M/A1	3	382	1307	151
C/M/A1	3	411	1306	
C/M/A2	2	169	1285	166
C/M/A2	2	162	1290	
C/M/A2	3	218	1314	159
C/M/A2	3	214	1297	
C/M/A3	2	223	1263	160
C/M/A3	2	212	1262	
C/M/A3	3	176	1281	156
C/M/A3	3	286	1276	
C/M/A4	2	276	1314	157
C/M/A4	2	269	1307	
C/M/A4	3	290	1294	154
C/M/A4	3	303	1299	
C/M/A5	2	306	1297	160
C/M/A5	2	268	1309	
C/M/A5	3	346	1329	156
C/M/A5	3	359	1329	

Tryckhållfasthet, densitet och vattenkvot, 91d

Tabell 3. Uppnådda värden efter 91d härdningstid. Dubbelprov.

Serie	Sed	σ_{Brott} [kPa]	ρ [kg/m ³]	w_N [%]
C/M/A1	2	761	1309	150
C/M/A1	2	786	1318	
C/M/A1	3	690	1303	144
C/M/A1	3	580	1305	
C/M/A2	2	258	1285	167
C/M/A2	2	345	1302	
C/M/A2	3	420	1309	148
C/M/A2	3	385	1303	
C/M/A3	2	585	1284	157
C/M/A3	2	539	1284	
C/M/A3	3	678	1300	146
C/M/A3	3	670	1303	
C/M/A4	2	449	1288	154
C/M/A4	2	463	1301	
C/M/A4	3	500	1306	139
C/M/A4	3	544	1301	
C/M/A5	2	502	1293	152
C/M/A5	2	587	1310	
C/M/A5	3	577	1313	146
C/M/A5	3	506	1292	

5. Permeabilitetstester

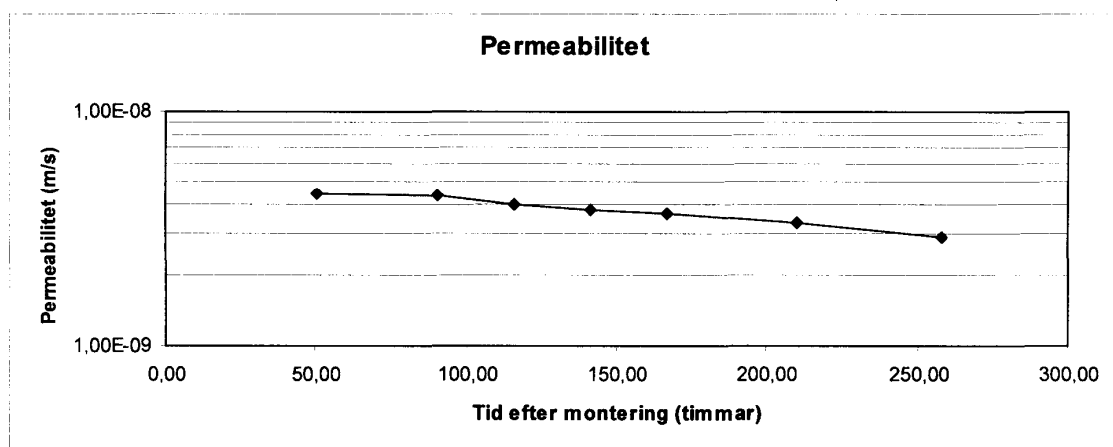
5.1 Stabiliserat sediment 2

SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

PERMEABILITET – CELLTRYCKSPERMEAMETER, ENLIGT METOD SGI NR. 15.

Beställare: Johan Lagerlund Vattenfall Utveckling AB 814 26 Älvkarleby			
Projekt: Gävle Hamn		Diariennr 2-0902-0088	
Provbeteckning: Prov 206			
Ankomstdatum	Provdiameter	Lab. undersökning Datum	Av
2009-09-02	50mm	090903 - 090914	O.A
Utfördad Teknisk ledare			Inga-Maj Kallher

Stabiliserat bottensediment 29 dygn		
Densitet:	1,30 t/m ³	
Torrdensitet:	0,49 t/m ³	
Tid efter montering (timmar)	Permeabilitet (m/s)	Anmärkning
50,12	4,4E-9	
90,32	4,4E-9	
116,20	4,0E-9	
141,37	3,7E-9	
167,07	3,6E-9	
210,26	3,3E-9	
257,91	2,9E-9	

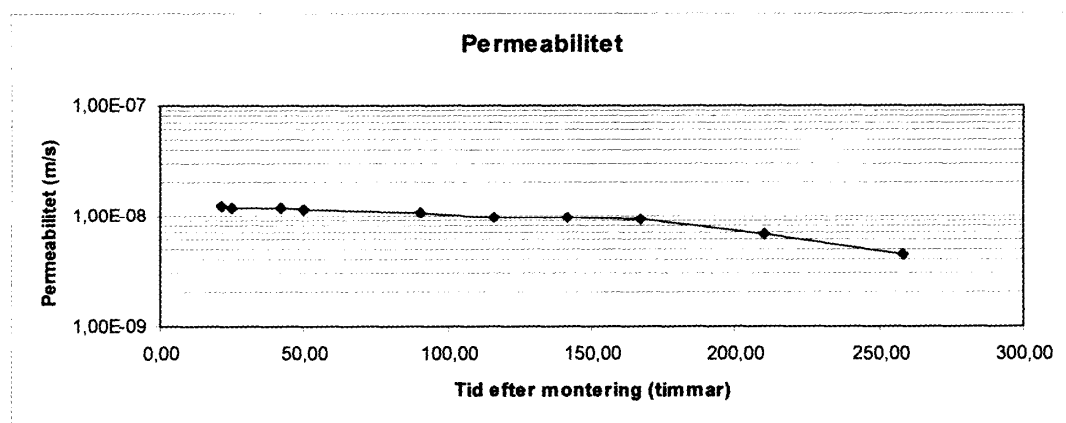


Figur 0-11. Permeabilitetsutveckling av C/M/A1, 50/20/30 150kg/m³.

SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
PERMEABILITET – CELLTRYCKSPERMEAMETER, ENLIGT METOD SGI NR. 15.

Beställare: Johan Lagerlund Vattenfall Utveckling AB 814 26 Älvkarleby				
Projekt: Gävle Hamn			Diarienumr 2-0902-0088	
Provbeteckning: Prov 220				
Ankomstdatum	Provdiameter	Lab. undersökning Datum	Av	Utfördad Teknisk ledare
2009-09-02	50mm	090903 - 090914	O.A	<i>Inga-Maj Kalle</i>

Stabiliserat bottensediment 29 dygn		
Densitet:	1,31 t/m ³	
Torrdensitet:	0,49 t/m ³	
Tid efter montering (timmar)	Permeabilitet (m/s)	Anmärkning
21,39	1,2E-8	
25,00	1,2E-8	
42,19	1,2E-8	
50,04	1,2E-8	
90,20	1,1E-8	
116,13	9,8E-9	
141,26	9,5E-9	
166,98	9,2E-9	
210,12	6,8E-9	
257,82	4,4E-9	

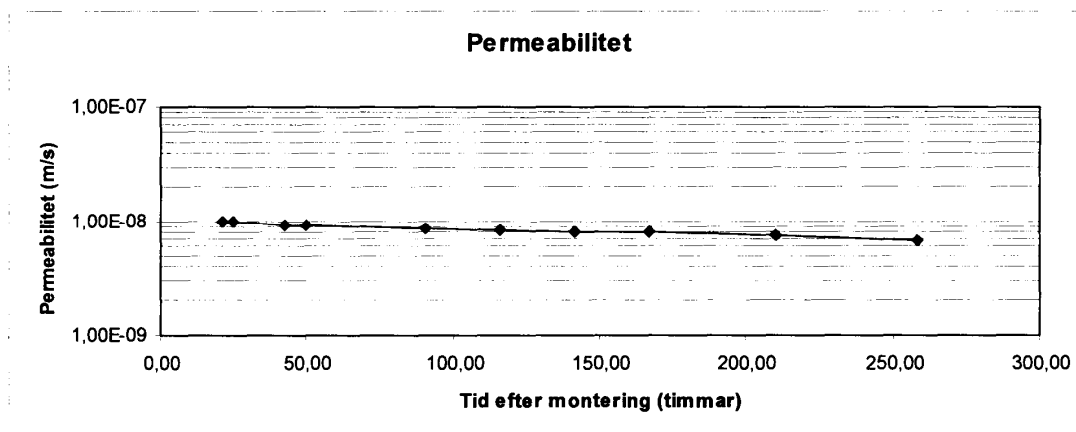


Figur 12. Permeabilitetsutveckling av C/M/A2, 50/20/30 150kg/m³.

SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
PERMEABILITET – CELLTRYCKSPERMEAMETER, ENLIGT METOD SGI NR. 15.

Beställare: Johan Lagerlund Vattenfall Utveckling AB 814 26 Älvkarleby				
Projekt: Gävle Hamn			Diariennr 2-0902-0088	
Provbeteckning: Prov 234				
Ankomstdatum	Provdiameter	Lab. undersökning	Av	Utfördad
2009-09-02	50mm	Datum 090903 - 090914	O.A	Teknisk ledare <i>Inga-Maj Kallio</i>

Stabiliserat bottensediment 29 dygn		
Densitet:	1,28 t/m³	
Torrdensitet:	0,47 t/m³	
Tid efter montering (timmar)	Permeabilitet (m/s)	Anmärkning
21,42	1,0E-8	
25,05	9,9E-9	
42,25	9,5E-9	
50,08	9,2E-9	
90,28	8,8E-9	
116,17	8,3E-9	
141,31	8,0E-9	
167,02	8,1E-9	
210,18	7,4E-9	
257,86	6,7E-9	

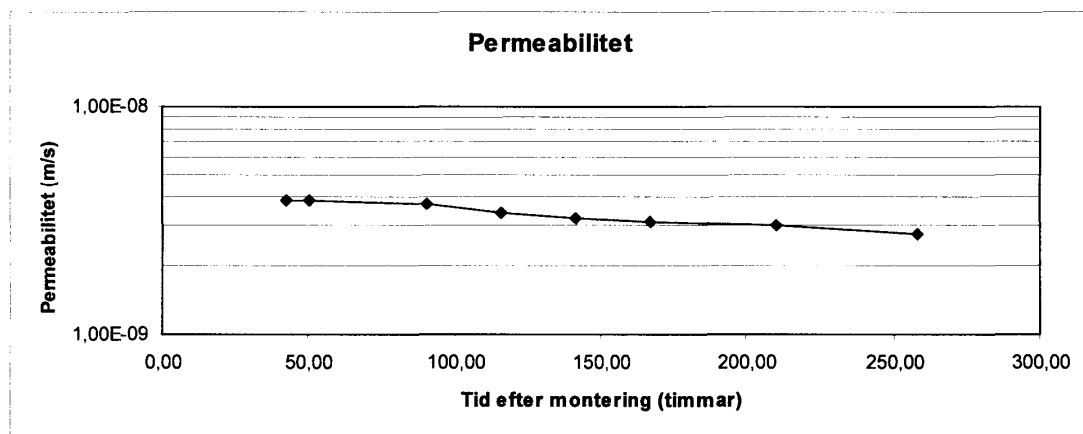


Figur 13. Permeabilitetsutveckling av C/M/A3, 50/20/30 150kg/m³.

SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
PERMEABILITET – CELLTRYCKSPERMEAMETER, ENLIGT METOD SGI NR. 15.

Beställare: Johan Lagerlund Vattenfall Utveckling AB 814 26 Älvkarleby				
Projekt: Gävle Hamn Provbeteckning: Prov 255			Diariennr 2-0902-0088	
Ankomstdatum	Provdiameter	Lab. undersökning Datum		Utfördad Teknisk ledare
2009-09-02	50mm	090903 - 090914		O.A. <i>Ingen - May Kallberg</i>

Stabiliserat bottensediment 29 dygn		
Densitet:	1,33 t/m ³	
Torrdensitet:	0,54 t/m ³	
Tid efter montering (timmar)	Permeabilitet (m/s)	Anmärkning
42,38	3,9E-9	
50,18	3,9E-9	
90,39	3,7E-9	
116,29	3,4E-9	
141,43	3,2E-9	
167,13	3,1E-9	
210,35	3,0E-9	
257,99	2,8E-9	

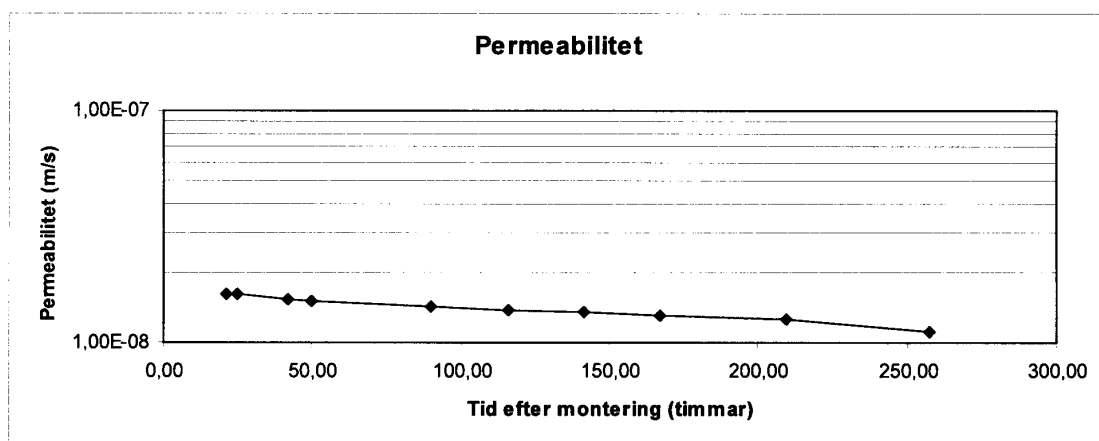


Figur 14. Permeabilitetsutveckling av C/M/A4, 50/20/30 150kg/m³.

SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
PERMEABILITET – CELLTRYCKSPERMEAMETER, ENLIGT METOD SGI NR. 15.

Beställare: Johan Lagerlund Vattenfall Utveckling AB 814 26 Älvkarleby				
Projekt: Gävle Hamn			Diariernr	2-0902-0088
Provbeteckning: Prov 269				
Ankomstdatum	Provdiameter	Lab. undersökning Datum	Av	Utfördad Teknisk ledare
2009-09-02	50mm	090903 - 090914	O.A	<i>Inga-Maj Kalle</i>

Stabiliserat bottensediment 29 dygn		
Densitet:	1,30 t/m³	
Torrdensitet:	0,50 t/m³	
Tid efter montering (timmar)	Permeabilitet (m/s)	Anmärkning
21,36	1,6E-8	
24,98	1,6E-8	
42,15	1,5E-8	
50,03	1,5E-8	
90,17	1,4E-8	
116,11	1,4E-8	
141,24	1,3E-8	
166,96	1,3E-8	
209,25	1,3E-8	
257,79	1,1E-8	



Figur 15. Permeabilitetsutveckling av C/M/A5, 50/20/30 150kg/m³.

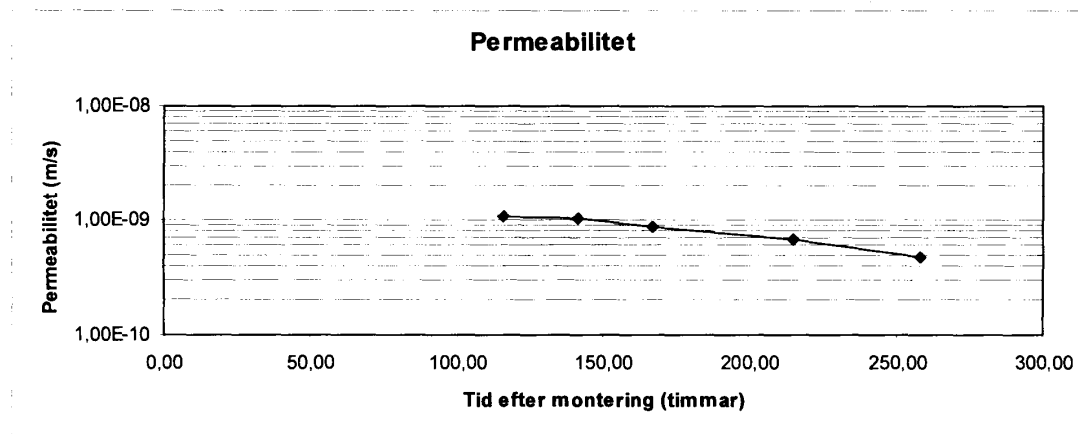
5.2 Stabiliserat sediment 3

SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

PERMEABILITET – CELLTRYCKSPERMEAMETER, ENLIGT METOD SGI NR. 15.

Beställare: Johan Lagerlund Vattenfall Utveckling AB 814 26 Älvkarleby				
Projekt: Gävle Hamn			Diarlenr 2-0902-0088	
Provbeteckning: Prov 213				
Ankomstdatum	Provdiameter	Lab. undersökning	Av	Utfärdad
2009-09-02	50mm	Datum 090903 - 090914	O.A	Teknisk ledare <i>Inga-Maj Kalle</i>

Stabiliserat bottensediment 29 dygn		
Densitet:	1,32 t/m ³	
Torrdensitet:	0,52 t/m ³	
Tid efter montering (timmar)	Permeabilitet (m/s)	Anmärkning
116,26	1,1E-9	
141,39	1,0E-9	
167,09	8,6E-10	
215,09	6,7E-10	
258,28	4,7E-10	

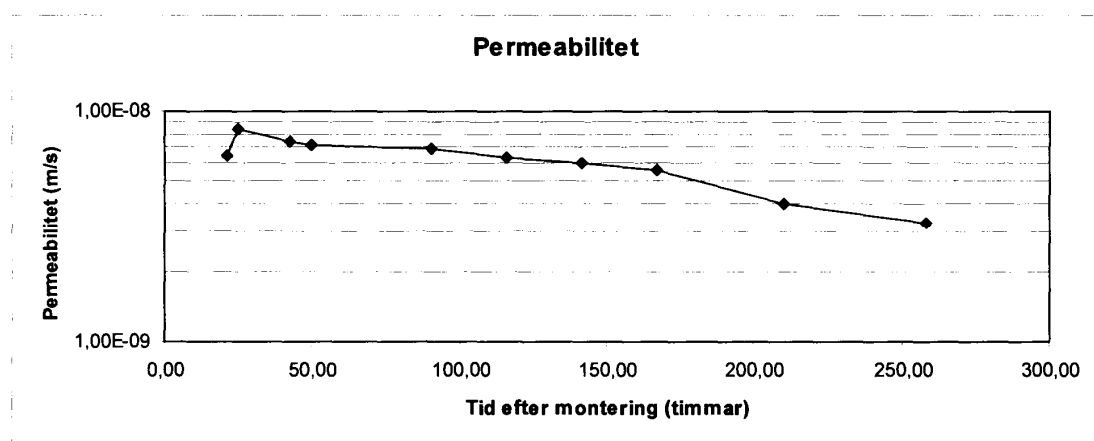


Figur 16. Permeabilitetsutveckling av C/M/A1, 50/20/30 150kg/m³.

SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
PERMEABILITET – CELLTRYCKSPERMEAMETER, ENLIGT METOD SGI NR. 15.

Beställare: Johan Lagerlund Vattenfall Utveckling AB 814 26 Älvkarleby				
Projekt: Gävle Hamn			Diarlenr 2-0902-0088	
Provbeteckning: Prov 227				
Ankomstdatum	Provdiameter	Lab. undersökning Datum	Av	Utfördad Teknisk ledare
2009-09-02	50mm	090903 - 090914	O.A	Inga-Maj Kalle

Stabiliserat bottensediment 29 dygn		
Densitet:	1,31 t/m³	
Torrdensitet:	0,50 t/m³	
Tid efter montering (timmar)	Permeabilitet (m/s)	Anmärkning
21,40	6,5E-9	
25,02	8,3E-9	
42,22	7,3E-9	
50,06	7,2E-9	
90,26	6,9E-9	
116,15	6,3E-9	
141,29	6,0E-9	
167,00	5,6E-9	
210,15	4,0E-9	
257,84	3,3E-9	

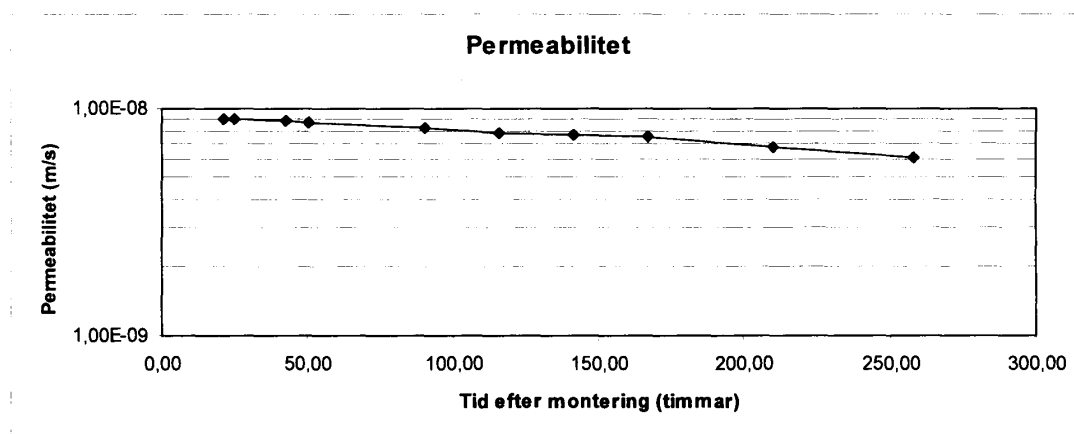


Figur 17. Permeabilitetsutveckling av C/M/A2, 50/20/30 150kg/m³.

SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
PERMEABILITET – CELLTRYCKSPERMEAMETER, ENLIGT METOD SGI NR. 15.

Beställare: Johan Lagerlund Vattenfall Utveckling AB 814 26 Älvkarleby				
Projekt: Gävle Hamn			Diariernr 2-0902-0088	
Provbeteckning: Prov 248				
Ankomstdatum	Provdiameter	Lab. undersökning Datum	Av	Utfördad Teknisk ledare
2009-09-02	50mm	090903 - 090914	O.A	Inga-Maj Kalle

Stabiliserat bottensediment 29 dygn		
Densitet:	1,30 t/m ³	
Torrdensitet:	0,49 t/m ³	
Tid efter montering (timmar)	Permeabilitet (m/s)	Anmärkning
21,52	9,1E-9	
25,09	9,0E-9	
42,35	8,8E-9	
50,16	8,6E-9	
90,36	8,2E-9	
116,28	7,9E-9	
141,41	7,7E-9	
167,11	7,6E-9	
210,32	6,8E-9	
257,96	6,0E-9	

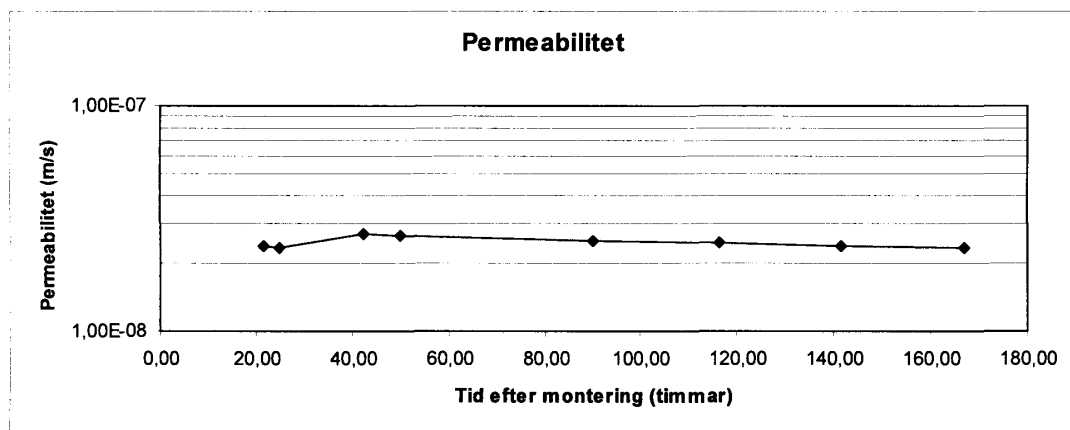


Figur 18. Permeabilitetsutveckling av C/M/A3, 50/20/30 150kg/m³.

SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
PERMEABILITET – CELLTRYCKSPERMEAMETER, ENLIGT METOD SGI NR. 15.

Beställare: Johan Lagerlund Vattenfall Utveckling AB 814 26 Älvkarleby				
Projekt: Gävle Hamn			Diariennr 2-0902-0088	
Provbeteckning: Prov 262				
Ankomstdatum	Provdiameter	Lab. undersökning Datum	Av	Utfördad Teknisk ledare
2009-09-02	50mm	090903 - 090910	O.A	<i>Inga-Maj Kalle</i>

Stabiliserat bottensediment 29 dygn		
Densitet:	1,29 t/m³	
Torrdensitet:	0,48 t/m³	
Tid efter montering (timmar)	Permeabilitet (m/s)	Anmärkning
21,34	2,4E-8	
24,96	2,4E-8	
42,13	2,7E-8	
50,01	2,7E-8	
90,15	2,5E-8	
116,09	2,5E-8	
141,22	2,4E-8	
166,78	2,4E-8	

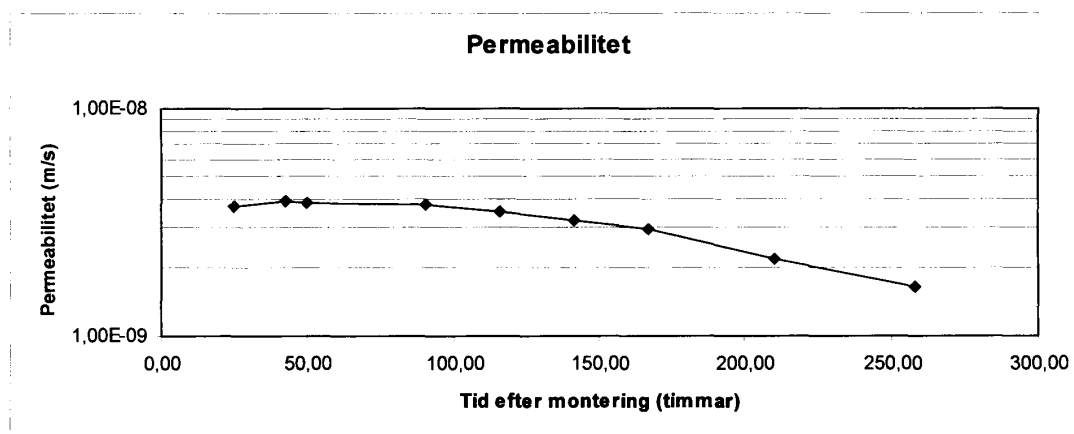


Figur 19. Permeabilitetsutveckling av C/M/A4, 50/20/30 150kg/m³.

SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
PERMEABILITET – CELLTRYCKSPERMEAMETER, ENLIGT METOD SGI NR. 15.

Beställare: Johan Lagerlund Vattenfall Utveckling AB 814 26 Älvkarleby				
Projekt: Gävle Hamn			Diarienumr 2-0902-0088	
Provbeteckning: Prov 241				
Ankomstdatum	Provdiameter	Lab. undersökning	Av	Utfärdad 2009-09-18
2009-09-02	50mm	Datum 090903 - 090914	O.A	Teknisk ledare <i>Inga-Maj Kallberg</i>

Stabiliserat bottensediment 29 dygn		
Densitet:	1,30 t/m ³	
Torrdensitet:	0,50 t/m ³	
Tid efter montering (timmar)	Permeabilitet (m/s)	Anmärkning
25,07	3,7E-9	
42,28	3,9E-9	
50,10	3,9E-9	
90,29	3,8E-9	
116,19	3,5E-9	
141,35	3,2E-9	
167,04	3,0E-9	
210,21	2,2E-9	
257,88	1,7E-9	



Figur 20. Permeabilitetsutveckling av C/M/A5, 50/20/30 150kg/m³.

Bilaga 3
Sammanställning av totalhalter i sediment
samt lakningsresultat

Lakning L/S=10, Gävle hamn sediment 2 (w=374 %)

Material / blandning	Totalhalter i sediment 2 (mg/kg TS)	Lakning Sediment 2 (mg/kg TS)	150 kg/m ³ C/M/A1 50/20/30		150 kg/m ³ C/M/A2 50/20/30		150 kg/m ³ C/M/A3 50/20/30		150 kg/m ³ C/M/A4 50/20/30		150 kg/m ³ C/M/A5 50/20/30		STABCON belastad 200 kg/m ³ C/M 30/70		STABCON obelastad 200 kg/m ³ C/M 30/70		Gränsvärde i miljön Nivå mindre än ringa risk **)	
			10	L/S	10	L/S	10	L/S	10	L/S	10	L/S	10	L/S	10	L/S	10	L/S
Ledningsförmåga (mS/m)			5,4															
Metaller																		
As	53,7	1,36	0,03995	0,05625	0,0417	0,05885	0,05835	0,04	0,037	0,5/0,09								
Ba	517	0,24	1,78	1,69	2,02	1,48	1,935	0,97	0,91	20/-								
Cd	2,6	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0006	0,04/0,02								
Cr	103	0,0352	<0,005	0,0804	0,06545	0,06545	0,06545	0,067	0,067	0,5/1								
Cu	137	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,065	2,3	2/0,80								
Hg	2,2	<0,0002	0,00416	0,01415	0,00305	0,00958	0,00271	0,0004	<0,0003	0,01/0,01								
Mo	<6	0,676	0,422	0,8285	0,671	0,4815	0,5365											
Ni	31,6	0,0127	1,09	1,58	0,786	1,22	1,37	0,61	0,9	0,4/0,4								
Pb	666	0,00479	0,00491	<0,002	0,00226	<0,002	0,00343	0,0062	0,0046	0,5/0,2								
Sb		0,0278	0,00678	0,00938	0,00791	0,00801	0,0061											
Se		0,00404	0,0262	0,03725	0,02825	0,02835	0,02635											
Zn		0,0365	0,0466	0,043	<0,02	0,0878	0,0237	<0,03	4/4									
DOC		180	590	705	595	555	690											
Cl		10700	3285	4000	3660	3535	3535											
F		<6	<6	<8	<6	<6	<8											
SO ₄		4400	420	150	385	250	580											
Organiska																		
Nitroben	0,69	0,00014	0,0012	<0,0010	<0,0010	0,001	<0,0010											
Acenafitylen	0,12	<0,0001	0,00011	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010											
Acenafthen	0,065	<0,0001	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010											
Fluoren	0,11	<0,0001	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002											
Fenantren	0,72	<0,0001	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003											
Antracen	0,21	<0,0001	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002											
Fluoranten	1,7	0,00021	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003											
Pyren	1,4	0,00023	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006											
Bens(a)antracen	0,73	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001											
Krysen	0,52	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001											
Bens(b)fluoranten	1,1	0,00014	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001											
Bens(k)fluoranten	0,56	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001											
Bens(a)pyren	1,1	<0,0001	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002											
Dibens(ah)antracen	0,3	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001											
Benso(ghi)perylen	1,2	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001											
Indeno(123cd)pyren	1,1	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001											
PAH, summa16 EPA-PAH	11,6	0,00072	0,0013	<0,0018	<0,0059	0,001	<0,0028											
PAH, summa cancerogena	5,4	0,00014	<0,004	<0,00040	<0,0040	<0,0004	<0,0013											
PAH, summa PAH-L		0,00014																
PAH, summa PAH-M		0,00044																
PAH, summa PAH-H		0,00014																
PAH, summa övriga	6,2	0,00132	<0,000011	<0,000145	<0,00019	0,001	<0,00145											
PCB 28	<0,0005	<0,0001	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011											
PCB 52	0,0016	<0,0001	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011											
PCB 101	0,0047	<0,0001	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008											
PCB 118	0,0029	<0,0001	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011											
PCB 138	0,0072	<0,0001	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012											
PCB 153	0,0092	<0,0001	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011											
PCB 180	0,0063	<0,0001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001											
PCB, summa 7	0,0319	n.d	<0,00004	<0,00004	<0,00004	<0,00004	<0,00004											

A1 = Uppsala aska	Klass 5	mkt stor avvikelse/mkt hög halt
A2 = Mälaren/egi	Klass 4	stor avvikelse/hög halt
A3 = Fortum	Klass 4	tydlig avvikelse/medelhög halt
A4 = blandning A1-A3	Klass 3	liten avvikelse/låg halt
A5 = blandning A1-A3 + andra utvalda askor	Klass 2	ingen avvikelse/ingen halt
	Klass 1	

Klassificering av totalhalter i sediment enligt NV bedömningsgrunder Kust och Hav rapport 4914

Askor	Klass 5	mkt stor avvikelse/mkt hög halt
A1 = Uppsala aska	Klass 4	stor avvikelse/hög halt
A2 = Mälaren/egi	Klass 4	tydlig avvikelse/medelhög halt
A3 = Fortum	Klass 3	liten avvikelse/låg halt
A4 = blandning A1-A3	Klass 2	ingen avvikelse/ingen halt
A5 = blandning A1-A3 + andra utvalda askor	Klass 1	

*) Gränsvärde för avfall till inert deponi enligt NFS 2004:10
**) Återvinning av avfall i anläggningsarbeten. Handbok 2010: 1

Lakning L/S=10, Gävle hamn sediment 3 (w=329 %)

Material / blandning		Totalhalter i sediment 3		Sediment 3		150 kg/m ³		150 kg/m ³		150 kg/m ³		150 kg/m ³		STABCON belastad		STABCON obelastad		Gränsvärde inert ^{*)} / NIVÅ för mindre än ringa risk ^{**)}	
Provnnummer	L/S	(mg/kg TS)	(mg/kg TS)	10	(mg/kg TS)	C/M/A1 50/20/30	C/M/A2 50/20/30	C/M/A3 50/20/30	C/M/A4 50/20/30	C/M/A5 50/20/30	10	C/M/A4 50/20/30	C/M/A5 50/20/30	200 kg/m ³	200 kg/m ³	200 kg/m ³	200 kg/m ³	(mg/kg TS)	(mg/kg TS)
Ledningsförmåga (mS/m)		7	7	7	12,16	12,16	12,16	12,16	12,23	12,11	11,6	11,7	305	328	305	328	10	10	
TOC (%)		4,7	375	370	356	345	360	367	305	328	10	10	10	10	10	10	10	10	
Metaller																			
As		54,8	1,08	0,0419	0,04335	0,05545	0,0603	0,06655	0,04	0,037	0,037	0,04	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,5/0,09
Ba		506	0,198	1,68	1,48	1,885	1,87	1,845	0,97	0,91	0,91	0,97	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	20/-
Cd		1,55	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,003	0,003	<0,0006	0,003	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	0,04/0,02
Cr		132	0,026	0,026	0,0748	0,0909	0,0748	0,0909	0,0742	0,0742	0,067	0,0742	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,5/1
Cu		87,6	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,065	2,3	2,3	2,3	2,3	2/0,8
Hg		0,0476	<0,0002	0,01012	0,0157	0,00417	0,01495	0,00284	0,0004	0,0004	<0,0003	0,0004	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	0,01/0,01
Mo		<6	0,659	0,4015	0,892	0,5665	0,5105	0,8925	0,61	0,9	0,9	0,61	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,4/0,4
Ni		33,5	0,0167	0,8605	1,5	0,7585	1,2	1,385	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,5/0,2
Pb		437	0,00329	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,00622	0,00622	0,00622	0,00622	0,00622	0,00622	0,00622	0,00622	0,00622	0,00622	0,00622
Sb			0,0144	0,00581	0,00807	0,00571	0,00677	0,00693	0,00677	0,00693	0,00693	0,00677	0,00693	0,00693	0,00693	0,00693	0,00693	0,00693	0,00693
Se			0,00345	0,0251	0,0319	0,073	0,02905	0,04865	0,04865	0,04865	0,04865	0,04865	0,04865	0,04865	0,04865	0,04865	0,04865	0,04865	0,04865
Zn		406	0,026	0,043	<0,02	0,1329	<0,02	0,049	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	4/4
DOC			100	635	655	590	3650	3615	3560	3560	3560	3615	3560	3560	3560	3560	3560	3560	3560
Cl			<6	<6	<6	<8	<6	<8	<6	<8	<8	<6	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8
F			4710	320	175	390	215	475	475	475	475	475	475	475	475	475	475	475	475
SO ₄																			
Organiska																			
Naftalen		0,13	0,00021	0,0013	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010
Acenafitylen		0,029	<0,001	0,00016	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010
Acenafiten		0,024	<0,001	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010	<0,00010
Fluoren		0,045	<0,001	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Fenantren		0,34	<0,001	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Antracen		0,1	<0,001	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Fluoranten		0,9	<0,001	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Pyren		0,71	0,0001	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006
Bens(a)antracen		0,45	<0,001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Krysen		0,36	<0,001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Bens(b)fluoranten		0,7	<0,001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Bens(b)fluoranten		0,4	<0,001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Bens(a)pyren		0,7	<0,001	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Dibens(ah)antracen		0,22	<0,001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Benso(ghi)perylen		0,8	<0,001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Indeno(123cd)pyren		0,76	<0,001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PAH, summa 16 EPA-PAH		6,67	0,00031	0,0014	<0,00018	<0,0059	<0,0018	<0,0018	<0,0018	<0,0018	<0,0018	<0,0018	<0,0018	<0,0018	<0,0018	<0,0018	<0,0018	<0,0018	<0,0018
PAH, summa cancerogena		3,59	n,n	<0,0004	<0,00040	<0,0040	<0,00040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040	<0,0040
PAH, summa PAH-L			0,00021																
PAH, summa PAH-M			0,0001																
PAH, summa PAH-H			n,d																
PAH, summa övriga		3,08		0,00141	<0,00145	<0,0019	<0,00145	<0,0019	<0,00145	<0,0019	<0,00145	<0,0019	<0,00145	<0,0019	<0,00145	<0,0019	<0,00145	<0,0019	<0,00145
PCB 28		<0,0005	<0,0001	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011
PCB 52		0,001	<0,001	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011
PCB 101		0,0027	<0,001	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008	<0,000008
PCB 118		0,002	<0,001	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011
PCB 138		0,0052	<0,001	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012	<0,000012
PCB 153		0,006	<0,001	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011	<0,000011
PCB 180		0,0041	<0,001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001
PCB, summa 7		0,021	n,d	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004

Askor

- A1 = Uppsala aska
- A2 = Mälarenergi
- A3 = Forum
- A4 = blandning A1-A3
- A5 = blandning A1-A3 + andra utvalda askor

Klassificering av totalhalter i sediment enligt NV bedömningsgrunder Kust och Hav rapport 4914

	klass 5
	klass 4
	klass 3
	klass 2
	klass 1

*) Gränsvärde för avfall till inert deponi enligt NFS 2004:10
**) Återvinning av avfall i anläggningsarbeten. Handbok 2010:1

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 ENERGIMYNDIGHET

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

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35