



UPPSALA
UNIVERSITET



UPTEC W 17 035

Examensarbete 30 hp
December 2017

Stabilisering av tjärförorenat sediment i området Kolkajen-Ropsten

Stabilization of tar contaminated sediments
in the area Kolkajen-Ropsten

Erik Sterud

Referat

Stabilisering av tjärförorenat sediment i området Kolkajen-Ropsten

Erik Sterud

Sedimenten i området Kolkajen-Ropsten, Stockholm, innehåller höga halter av tjäroljor till följd av tidigare produktion i gasverket på området. Stockholms stad planerar att utföra byggnation i det nuvarande vattenområdet, vilket ökar risken för spridning av föroreningar. För att skydda arbetande under planerad byggnation och framtida boende måste föroreningssituationen åtgärdas. Tjäroljorna innehåller höga halter av polyaromatiska kolväten (PAH) och det är föroreningen av PAH-16 som styr åtgärdsbehovet för området. En metod som använts med god framgång i flera projekt i Norden och andra delar av världen är stabilisering och solidifiering, s/s, av sediment. Metoden går ut på att blanda in utvalda bindemedel i sedimenten som då härdar. Därigenom minskar föroreningens mobilitet och de geotekniska egenskaperna förbättras. Om kravet på skjuvhållfasthet (>140 KPa), låg permeabilitet (10^{-8} - 10^{-9} m/s) samt minskad utlakning uppfylls kan de stabiliserade massorna utgöra grunden för planerad byggnation.

För att utvärdera möjligheterna av denna åtgärdsmetod analyserades en sats av prover från området för att tillhandahålla information om platsspecifika parametrar. Analysen visade att sedimenten hade hög vattenkvot och organiskt innehåll, dominerades av fina fraktioner samt en föroreningsgrad av PAH-16 på 13000 mg/kg TS. Utifrån dessa parametrar och med stöd från en litteraturstudie valdes fyra recept på bindemedel ut, med olika mängd bindemedel. De bindemedel som använts är: Bascement från Skövde som är ett portland-flygaskecement, Monofill som består av 20 % cement och 80 % granulerat masugnsslagg samt aktivt kol. De olika recepten blandades med sediment från området och lämnades att härdas under 28 dygn. Efter härdningen utvärderades de stabiliserade massorna med avseende på minskad utlakning av PAH jämfört med obehandlat sediment, skjuvhållfasthet och permeabilitet.

Analyser av de fyra blandningarna visade att kravet på skjuvhållfasthet och permeabilitet uppfylldes för samtliga tillsatser av bindemedel och överlag innebar större mängder tillsatt bindemedel högre skjuvhållfasthet och lägre permeabilitet. Resultaten från lakteter indikerade att en större tillsats av aktivt kol minskade utlakningen av PAH.

Tillsatsen av bindemedel som bedöms vara bäst lämpad för stabilisering av sedimenten från området var en total mängd av cement och Monofill på 250 kg/m^3 (30 % cement och 70 % Monofill) samt en tillsats av aktivt kol på 5 % av TS.

Inblandning i sedimenten enligt receptet ovan resulterade i en skjuvhållfasthet på 413 KPa samt en önskat låg permeabilitet. Utlakningen av PAH-16 reducerades med ~45 % jämfört med obehandlat sediment.

Nyckelord: sediment, PAH, s/s, bindemedel, stabilisering, solidifiering, muddermassor

*Institutionen för mark och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU),
Box 7014, SE-750 07 Uppsala, Sverige*

Abstract

Stabilization of tar contaminated sediments in the area Kolkajen-Ropsten

Erik Sterud

The sediments in the area Kolkajen-Ropsten, Stockholm, have shown high levels of tar oils due to the gasworks in the area. The city of Stockholm is planning construction in the area which increases the risk of contaminants spreading to the surrounding area. In order to protect workers during the planned construction and future inhabitants, remediation has to be carried out. The tar oils have high concentrations of polyaromatic hydrocarbons (PAH) and it is pollution of PAH-16 that dictates the need for remediation.

A remediation method that has been used in similar projects, with good results, is stabilization and solidification (s/s) of the sediments. This is done by mixing binder materials with the sediments which harden and it results in lowered mobility of the contaminants and improved geotechnical properties of the soil. If the shear strength is high enough (>140 KPa), the permeability is low enough (10^{-8} - 10^{-9} m/s) and the leaching is reduced sufficiently, the stabilized sediments can be used as a foundation.

To evaluate the possibility of this remediation method, a batch of sediment samples from the area was analyzed to obtain information about site specific parameters. The analysis showed that the sediments had high water content and were rich in organic matter. They were dominated by small particle fractions and had a PAH-16 concentration of 13000 mg/kg DM. With regard to these site specific parameters and a literature study, four different recipes with different amounts of binders were selected and tested in a laboratory study. The used binders were: cement from Skövde which is a portland-fly ash cement, Monofill composed of 20 % cement and 80 % granulated furnace slag, and addition of activated carbon.

The sediments were mixed with binders according to the recipes and left to harden for 28 days. Following the 28 days of hardening, the stabilized mixtures were evaluated with regard to: the reduction of leaching of PAH in comparison to the untreated sediments, shear strength, and permeability.

Analyses of the four mixtures showed that the desirable values of both shear strength and permeability were achieved for all mixtures, and that a higher concentration of binders resulted in a higher shear strength and lower permeability. The results from the leaching tests indicated that a higher concentration of activated carbon resulted in a lowered leaching of PAH.

The mixture of binders that was deemed to be most suitable for stabilizing the sediments from the area was a total amount of cement and Monofill at 250 kg/m³ (30 % cement and 70 % Monofill) with an addition of activated carbon at 5 % of DM (dry matter).

Addition of this binder mixture to the sediments resulted in a shear strength of 413 KPa and a desired low permeability. The reduced leaching of PAH-16 was ~45 % compared to untreated sediments.

Keywords: sediments, PAH, s/s, binders, stabilization, solidification, dredging

*Department of soil and environment, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU),
Box 7014, SE-750 07 Uppsala, Sverige*

Förord

Denna studie är ett examensarbete inom civilingenjörsprogrammet i miljö-och vattenteknik vid Uppsala universitet. Examensarbetet genomfördes i samarbete med Golder Associates AB med Maria Sundesten som handledare. Dan Berggren Kleja vid Institutionen för mark och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU) har varit ämnesgranskare.

Utöver ovannämnda personer vill jag tacka personalen på SGI för ett gott samarbete vid utförda laborationsstudier.

Mitt största tack går till min älskade Maria Adolfsson som stöttat och lyft mig under arbetets gång.

Erik Sterud

Uppsala, december 2017

Copyright © Erik Sterud och Institutionen för mark och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU) UPTEC W 17 035

Digitalt publicerad vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet 2017

Populärvetenskaplig sammanfattning

Stabilisering av tjärförorenat sediment i området Kolkajen-Ropsten

Erik Sterud

Till följd av det ökade behovet för byggnation blir det allt vanligare att områden som tidigare använts till industri önskas att bebyggas. Detta är fallet i området Kolkajen-Ropsten i Norra Djurgårdsstaden, Stockholm. Stockholms stad planerar att bygga i det nuvarande vattenområdet, där sedimenten är kraftigt förorenade av tjäroljor till följd av tidigare produktion i gasverket som ligger i området. I samband med planerad byggnation ökar risken för spridning av föroreningar till närmiljön. För att skydda arbetande vid byggnation samt framtida boende behöver föroreningsituationen åtgärdas. Tjäroljor innehåller höga halter av polyaromatiska kolväten (PAH) som vid provtagning av sedimenten uppmätts till höga nivåer i hela området där byggnation planeras. Ämnesgruppen PAH är stor och för att underlätta t.ex. riskbedömningar och analyser kategoriseras dessa ämnen ofta med avseende på deras molekylvikt. PAH i samma grupp har liknande egenskaper så som vattenlöslighet och affinitet till organiskt material och av denna anledning återfinns de ofta i snarlika miljöer. PAH bildas vid ofullständig förbränning av organiskt material så som trä, olja och diesel. De kan även ha naturligt ursprung från t.ex. skogsbränder och vulkanutbrott. PAH är överlag hydrofoba och större PAH (molmassa) uppbyggda av flera bensenringar har lägre vattenlöslighet och större affinitet till organiskt material jämfört med PAH med färre bensenringar och lägre molmassa. Denna rapport fokuserar främst på föroreningen av PAH-16, även om andra föroreningar som tungmetaller påträffats, då de ofta prioriteras vid avhjälpande åtgärder enligt rekommendation av USEPA (United States Environmental Protection Agency). PAH-16 har klassats som mutagen och cancerogen och det är föroreningen av dessa som styr åtgärdsbehovet för området.

En åtgärdsmetod för förorenade jordar och sediment som givit bra resultat i flera projekt är stabilisering och solidifiering (s/s). Metoden går ut på att valda bindemedel blandas in i sedimenten som då härdar till en solid kropp vilket ger de behandlade massorna förbättrade geotekniska egenskaper. De stabiliserade sedimenten utvärderas med avseende på skjuvhållfasthet, permeabilitet och utlakning, i relation till de obehandlade sedimenten. För att de stabiliserade massorna ska kunna utgöra grunden för planerad byggnation ställs krav på en skjuvhållfasthet (>140 KPa), en låg permeabilitet (10^{-8} - 10^{-9} m/s) samt en minskad utlakning av föroreningar. S/s - metoden kan delas in i två kategorier, masstabilisering och processtabilisering. Masstabilisering utförs genom att valda bindemedel blandas in i sedimenten in-situ. Processtabilisering görs genom att sedimenten muddras för att sedan blandas med valda bindemedel, varpå de placeras ut på önskad plats. Fördelen med masstabilisering är att massorna inte behöver flyttas, utan de kan stabiliseras på önskad plats för geokonstruktionen vilket innebär en minskad kostnad och risk för spridning av förorening. Fördelen med processtabilisering är att det är lättare att uppnå en homogen inblandning av bindemedel.

Det finns flera olika bindemedel med olika för- och nackdelar beroende på den jord som ska stabiliseras. Valet av bindemedel för laborationsstudien baserades i denna studie på tidigare försök och med hänsyn till sedimentens platsspecifika parametrar. De bindemedel som valts är cement, Monofill och aktivt kol. Cement framställs genom att bränna kalksten och kiselhaltigt material vid hög temperatur. Den färdiga produkten består till största del av

mineraler av kalciumsilikat vilka reagerar/aktiveras i kontakt med vatten i en exoterm reaktion där en cementsande gel bildas. Gelen binder samman cementskorn och partiklar i jorden. Cement är det bindemedel som använts i störst utsträckning vid stabilisering av jordar på grund av dess förmåga att förbättra jordars geotekniska egenskaper. Cementen som använts i laborationsstudien är ett portland-flygaskecement från Skövde. Monofill är en produkt framtagen av Trollhättan mineral bestående av 20 % cement och 80 % granulerad masugnsslagg. Slagg är likartat cement men inte cementsande i sig utan aktiveras av material i jorden eller vid tillsats av cement. Slagg har i tidigare försök uppvisat god förmåga att stabilisera hydrofoba föroreningar som PAH. Eftersom slagg är en restprodukt från framställning av järn från malm är det ett effektivt sätt att minska kostnaderna för bindemedel. Aktivt kol har mycket stor specifik area och rapporterat god förmåga att adsorbera PAH.

Fyra recept med olika mängder av ovanstående bindemedel valdes till laborationsstudien. De olika recepten för bindemedel blandades med sediment från området och lämnades att härda i 28 dygn. Efter härdning utvärderades de stabiliserade blandningarna med avseende på skjuvhållfasthet, permeabilitet samt utlakning av PAH, jämfört med de obehandlade sedimenten.

Resultaten från undersökningen visade att inblandning av samtliga recept på bindemedel uppfyllde kraven på skjuvhållfasthet och permeabilitet. Resultaten indikerade också att en större mängd tillsatt bindemedel gav en högre skjuvhållfasthet och lägre permeabilitet. Lakttesterna visade att en större mängd tillsatt aktivt kol resulterade i en större reduktion med avseende på utlakning av PAH. Receptet för bindemedel som ledde till störst reduktion av utlakningen av PAH (~45 %) var en blandning bindemedel av totalt 250 kg/m³ blött sediment (30 % cement och 70 % Monofill) med en tillsats av aktivt kol på 5 % av TS, varför denna blandning anses bäst lämpad för stabilisering av sedimenten i området. Skjuvhållfastheten för denna blandning (sediment-bindemedel) var 413 KPa.

Innehållsförteckning

1 INLEDNING	1
1.1 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR	2
1.2 AVGRÄNSNINGAR	2
1.3 BAKGRUND: PAH	3
2 MATERIAL OCH METODER	5
2.1 TEORI	5
2.1.1 Sediment	5
2.1.3 s/s – metoden	7
2.1.4 Bindemedel	8
2.2 LABORATORIEFÖRSÖK	11
2.2.1 Recept bindemedel	11
2.2.2 Inblandning och tillverkning av provkroppar	12
3.1 ENAXLIGA TRYCKFÖRSÖK	15
3.2 PERMEABILITETSFÖRSÖK	16
3.3 LAKTESTER	16
4 DISKUSSION	17
5 SLUTSATSER	19
6 REFERENSER	20

1 INLEDNING

I och med att vi människor blir fler och fler ökar behovet av ytor att bygga på och material att bygga med, något som är påtagligt i Stockholms stad. I området Norra Djurgårdsstaden i Stockholm planerar Stockholms stad att anlägga två utfyllnadsområden för bostadsbebyggelse i det nuvarande vattenområdet (Figur 1). Stadsdelen växer och potentialen och behovet för byggnation är stort. Delar av landområdet angränsande sedimenten har tidigare använts för gasproduktion. En restprodukt från gasproduktionen är de tjäroljor som påträffats i delområdet Kolkajen-Ropsten (Fanger & Broms, 2016) vilka innehåller höga koncentrationer av polyaromatiska kolväten, förkortat PAH från engelskans polyaromatic hydrocarbons. Negativ miljöpåverkan av PAH har dokumenterats vid koncentrationer 1-2 mg/kg TS. Bakgrundshalten i Stockholms innerskärgård är ca 5 mg/kg torrs substans (TS) (Fanger & Broms, 2016). I den stora ämnesgruppen PAH prioriteras 16 av dessa ämnen, PAH-16, vid avhjälpande åtgärder p.g.a. deras utbredning och potentiella hälsorisker (Lundstedt, 2003). Det är föroreningen av PAH som styr åtgärdsbehovet i området. Det platsspecifika riktvärdet för PAH-16 i sedimenten i området är satt till 300 mg/kg TS. Detta värde överskrids i majoriteten av de sedimentprover som tagits i området (Fanger & Broms, 2016).



Figur 1: Bild över fokusområdet, från maps.google.se

Med planerad byggnation ökar risken för spridning av föroreningar och förorenade sediment. För att skydda närmiljön och framtida arbetande och boende i området måste föroreningssituationen åtgärdas.

En tänkbar åtgärdsmetod är in situ-stabilisering och solidifiering (s/s) av sedimenten. Målet med s/s är att stabilisera föroreningarna genom att minska deras mobilitet och därmed exponering samt att solidifiera massorna till en monolit för att förbättra deras geotekniska egenskaper (Holm, m.fl., 2011). Detta görs på plats genom att blanda in valda bindemedel i sedimenten som med tiden härdar till en monolit och, om korrekt utförd, uppfyller ovanstående mål. Fördelar med metoden är att sedimenten inte behöver grävas upp och deponeras (Holm, m.fl., 2011) samt att om kravet på tryckhållfasthet (>140 KPa) och önskad låg permeabilitet (<~10⁻⁸-10⁻⁹ m/s) (Wilhelmsson, m.fl., 2010) uppfylls kan de stabiliserade massorna användas som grund för planerad byggnation istället för att området muddras och återfylls (Blažauskas, m.fl., 2012). Bindemedel utgör en stor del av totalkostnaden (Holm, m.fl., 2011), varför det är önskvärt att optimera mängd och typ.

Användning av in situ s/s har givit bra resultat i flera projekt, men också visat hur viktiga de plats specifika förutsättningarna är (Holm, m.fl., 2011). Recept för bindemedel väljs utifrån sedimentens egenskaper och parametrar så som vattenkvot, halt organiskt material, kornstorlek, föroreningens koncentration och egenskaper och till dess förväntade interaktion med sediment och valda bindemedel.

1.1 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR

Syftet med detta examensarbete var att utreda vilken kostnadseffektiv kombination av bindemedel som är bäst lämpad för att förhindra eller minska spridningen av de påträffade föroreningarna och de förorenade sedimenten ur ett miljö- och hälsoperspektiv, samt att utreda möjligheten att solidifiera massorna för att kunna genomföra önskad byggnation ovanpå dessa.

För att uppnå syftet utreds följande frågor genom en litteraturstudie och laboratorieförsök:

- Hur påverkar mängd och typ av bindemedel s/s av de förorenade massorna?
- Vilka parametrar påverkar s/s hos de aktuella förorenade sedimenten och är det någon parameter som skapar särskilda problem?
- Går resultaten från laborationsstudien att tillämpa på större skala inom det aktuella området Kolkajen/Ropsten?

1.2 AVGRÄNSNINGAR

Detta examensarbete fokuserar på föroreningen av PAH även om flera andra påträffats i området. I laborationsstudien hade det varit önskvärt att använda dubbelprover vid försöken och även att utvärdera flera recept. Försöken begränsades dock av tillgängligt material från provtagningen i området och budget för projektet.

1.3 BAKGRUND: PAH

PAH bildas vid ofullständig förbränning av organiskt material som t.ex. olja, kol, trä och diesel. PAH bildas även vid naturliga processer så som vulkanutbrott och skogsbränder (Lundstedt, 2003). Ämnesgruppen PAH är stor, fler än 500 ämnen i gruppen har hittats i luft (Kemikalieinspektionen, 2016). PAH är uppbyggda av två eller fler bensenringar och är överlag neutrala och lipofila, även om bensenringar kan uppvisa viss polaritet. Vissa PAH har klassats som cancerogena och mutagena. För att underlätta riskbedömningar och analyser kategoriseras de ofta i grupper: PAH-L, PAH-M och PAH-H, där L, M och H står för låg, medel och hög respektive, och syftar på deras molekylvikt. PAH i samma grupp har liknande egenskaper, så som löslighet i vatten, och återfinns därför ofta i samma typer av miljöer (Lundstedt, 2003). Ytterligare en kategorisering är PAH-16, som syftar till 16 st. PAH prioriterade av EU och USEPA p.g.a. att de ofta återfinns i höga koncentrationer och är potentiellt hälsofarliga (Ahangar, 2010).

PAH kan omvandlas till s.k. oxy-PAH genom fotooxidation, kemisk oxidation och biologisk nedbrytning. Dessa sekundära produkter är i vissa fall farligare än de ursprungliga PAH till följd av att de ofta är mer vattenlösliga och toxiska (Ahangar, 2010).

Samtliga PAH är mer eller mindre hydrofoba och deras löslighet i vatten minskar överlag med ökande molmassa (Lundstedt, 2003) (Tabell 1).

Tabell 1 Egenskaper för PAH-16 (Lundstedt, 2003)

	Antal ringar	Molmassa (g/mol)	Löslighet i vatten (mg/l)	Ångtryck (Pa)	Log K_{ow}
Naftalen	2	128	31	$1,0 \cdot 10^2$	3,37
Acenaftylen	3	152	16	$9,0 \cdot 10^{-1}$	4,00
Acenaften	3	154	3,8	$3,0 \cdot 10^{-1}$	3,92
Fluoren	3	166	1,9	$9,0 \cdot 10^{-2}$	4,18
Fenantren	3	178	1,1	$2,0 \cdot 10^{-2}$	4,57
Antracen	3	178	0,045	$1,0 \cdot 10^{-3}$	4,54
Pyren	4	202	0,13	$6,0 \cdot 10^{-4}$	5,18
Fluoranten	4	202	0,26	$1,2 \cdot 10^{-3}$	5,22
Bens(a)antracen	4	228	0,011	$2,8 \cdot 10^{-5}$	5,91
Krysen	4	228	0,006	$5,7 \cdot 10^{-7}$	5,91
Benso(b)fluoranten	5	252	0,0015	-	5,80
Benso(k)fluoranten	5	252	0,0008	$5,2 \cdot 10^{-8}$	6,00
Bens(a)pyren	5	252	0,0038	$7,0 \cdot 10^{-7}$	5,91
Dibens(a,h)antracen	6	278	0,0006	$3,7 \cdot 10^{-10}$	6,75
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	6	276	0,00019	-	6,50
Benso(g,h,i)perylen	6	276	0,00026	$1,4 \cdot 10^{-8}$	6,50

Till följd av deras hydrofoba/lipofila egenskaper återfinns de i stor utsträckning adsorberade till partikelytor, speciellt i jordar innehållande organiskt kol (Ahangar, 2010), som de aktuella sedimenten har en hög halt av. PAH med högre molmassa har större affinitet till organiskt material, vilket är relaterat till en högre oktanol-vatten fördelningskoefficient (K_{ow}). Molekyler med större K_{ow} har högre fettlöslighet vilket också innebär en större affinitet till organiskt material. Molekylerna tenderar att adsorbera till organiskt material snarare än att lösas i vatten (Lundstedt, 2003). Ett högre K_{ow} , dvs en högre fettlöslighet, betyder också att de lättare bioackumuleras (Risbecker, 2009). En stark inbindning till organiskt material innebär att föroreningstransporten från det förorenade området kan väntas ske i samband med spridning av sediment och kolloidala partiklar där organiska föroreningar, som PAH, adsorberats (Holm, et al., 2007). PAH adsorption till organiskt material är entropidrivna och en följd av hydrofob interaktion och Van der Waals krafter. Laboratiestudier gällande PAH adsorption i jordar har visat att PAH adsorberas vid en högre takt än vad de släpper från samma medium till följd av att de rör sig längre in i mediet, via porer, med ökad kontakttid (Site, 2000). När PAH når längre in i sedimentmatrisen minskar deras biotillgänglighet, varför muddring av förorenade sediment utgör en risk då PAH riskerar att exponeras och således öka biotillgängligheten igen. Till följd av PAH lipofila egenskaper riskerar de att bioackumuleras och återfinnas i naturen under en lång tid (Lundstedt, 2003). Enligt Site (2000) är det till humussyror snarare än fulvosyror som sorberar PAH, på grund av att humussyror har en lägre O+N/C kvot, jämfört med fulvosyror, vilket gör dem mindre polära.

2 MATERIAL OCH METODER

Examensarbetet inleddes med en litteraturstudie för att tillhandahålla information om föroreningsituationen och sedimenten i det aktuella området samt väntad interaktion mellan förorening, sediment och bindemedel. Med stöd av litteraturstudien och analys av de obehandlade sedimenten valdes tre recept med olika mängd bindemedel som efter inblandning med sediment analyserades i laboratorium med avseende på tryckhållfasthet, permeabilitet och utlakning.

2.1 TEORI

För att kunna välja bindemedel som efter inblandning med sedimenten förväntas uppfylla kraven på tryckhållfasthet, permeabilitet och utlakning är det viktigt att ha förståelse för sedimentens egenskaper och dess interaktion med förorening och bindemedel.

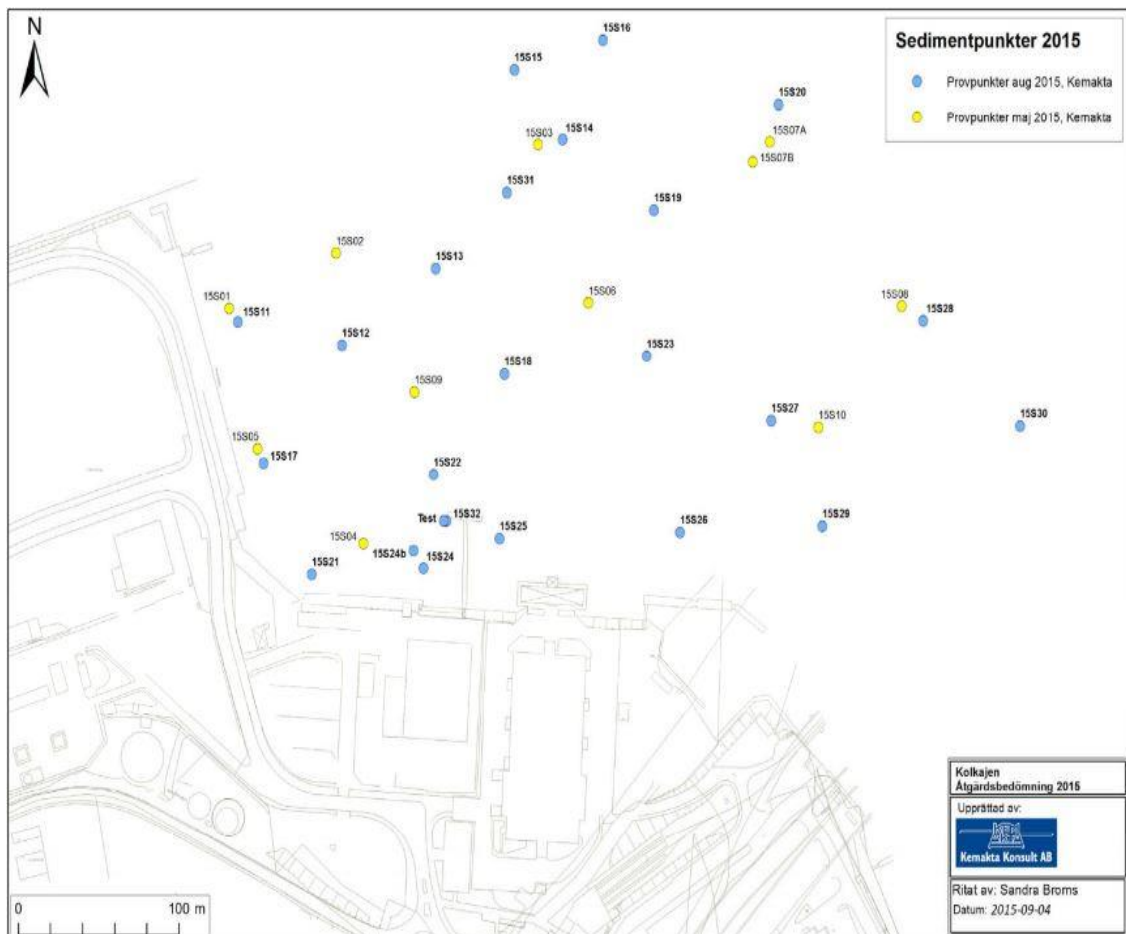
2.1.1 Sediment

Sediment är ofta lösa och domineras av finkorniga partiklar (Wilhelmsson, m.fl., 2010) och högt organiskt innehåll (Bendz, m.fl., 2011). Information om dessa platsspecifika parametrar ger stöd vid valet av bindemedel. Låg torrsubstans innebär lösa sediment med liten andel fasta partiklar, vilket kräver mer bindemedel för en lyckad s/s (Axelsson, m.fl., 2000). Kornstorlek avgör tillgänglig yta för förorening att sorbera, där finare fraktioner innebär en större specifik area (Makusa, 2015). Små fraktioner hämmar också inblandningen av cement-sediment (Maher, m.fl., 2005). PAH har stor affinitet till organiskt kol (Lundstedt, 2003) och TOC (totalhalten organiskt kol) ger således en indikation om hur benägen föroreningen är att sorbera och stanna i sedimenten. Halten av organiskt kol ger information om halten av organiskt material, vilket har stor inverkan på den mängd bindemedel som krävs, se vidare i avsnittet bindemedel.

Koncentrationen av PAH-16 är intressant då utlakning jämförs mellan obehandlat och stabiliserat sediment. Föroreningsgraden är relevant nu, och vid framtida försök med liknande förutsättningar. I flera av provtagningspunkterna i området, speciellt närmast land, påträffades fri-fas av tjäroljor (Fanger & Broms, 2016). Tillgängliga porer i sedimenten har stor inverkan på sorption av organiska föreningar, fler porer innebär en större yta för adsorption. Lågmolekylära PAH, med högre vattenlöslighet, är svårare att fastlägga jämfört med högmolekylära. Även strukturen på aktuell molekyl spelar roll då denna avgör om molekylerna kan nå nanoporer i materialet eller ej. PAH är ofta platta, dvs uppträder ofta i ett plan, vilket innebär att de kan nå nanoporer i sedimenten och således tillgå en större yta för sorption och också nå längre in i sedimentmatrisen (Harvey, 2010).

Kemakta utförde under vår och höst 2015 en provtagning av sedimenten i form av sedimentproppar från olika nivåer i det förorenade området (Figur 2). Prover som inte förbrukats vid Kemaktas analyser fanns tillgängliga för vidare undersökningar. I flera av provpunkterna har enstaka nivåer analyserats och prov finns således från de mellanliggande nivåerna. För att undersöka möjligheten att stabilisera de kraftigt förorenade sedimenten i området, en typ av ”worst case”, valdes prover som antogs ha koncentration av PAH-16 > 600 mg/kg TS. Prover valdes efter en interpolation mellan nivåer med bekräftade koncentrationer, med kravet att ovan- och underliggande nivåer uppvisat halter av PAH-16 > 600 mg/kg TS. De utvalda sedimentproverna blandades till

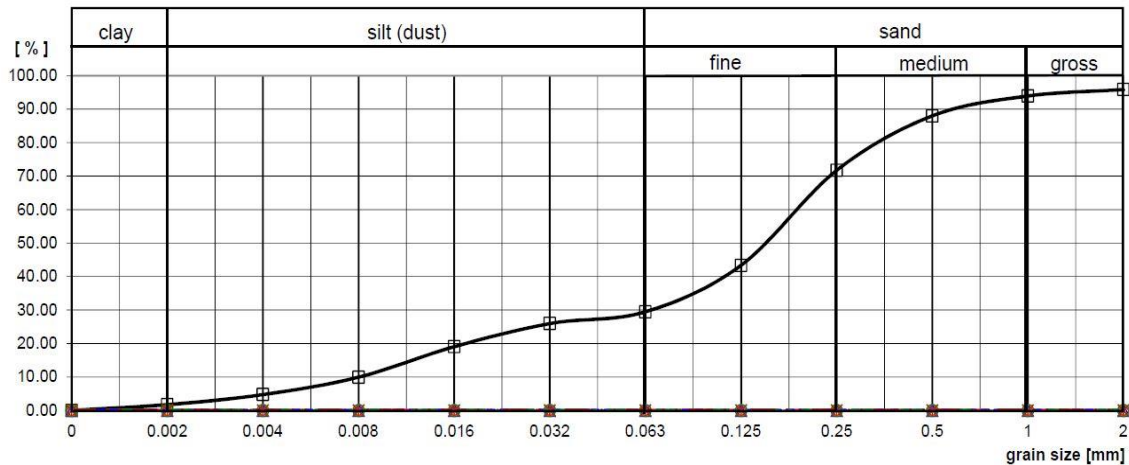
en homogen sats för vidare undersökningar. För att kunna välja typ och mängd av bindemedel, med hänsyn till de platsspecifika parametrarna, skickades ett stickprov från denna sats till ALS Global för analys. Resultaten från analysen redovisas i Tabell 2 och Figur 3.



Figur 2: Provpunkter i sedimenten

Tabell 2 Selektiv presentation av analysresultat

Parameter	Enhet	Osäkerhet	Resultat
TS _{105°C}	%	2,56	42,2
TOC	% av TS		33,8
pH		0,2	7,8
ΣPAH-16	mg/kg TS		13000

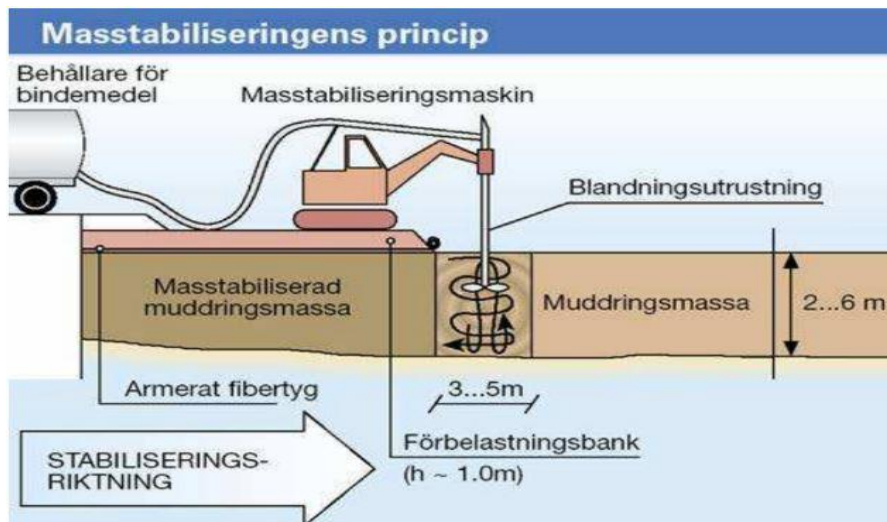


Figur 3: Kornstorlekskurva för stickprov

2.1.3 s/s – metoden

Stabilisering och solidifiering (s/s) av muddermassor har givit goda resultat i flera remedieringsprojekt (Axelsson, m.fl., 2000) och metoden har tillämpats i Sverige sedan drygt 40 år tillbaka (Holm, m.fl., 2011). Syftet med s/s av förorenade muddermassor är att stabilisera föroreningen d.v.s. minska dess mobilitet samt att solidifiera massorna (Wilhelmsson, m.fl., 2010). Detta görs genom att blanda in valda bindemedel i massorna som med tiden härdar till en solid kropp med förbättrade geotekniska egenskaper och lägre permeabilitet jämfört med obehandlade massor (Bendz, m.fl., 2011). Detta innebär att massorna blir mer lätthanterliga och kan nyttjas som fyllnadsmaterial eller utgöra grunden för byggnation på plats (Wilhelmsson, m.fl., 2010). Mobiliteten hos en förorening kan minskas genom olika processer så som sorption eller genom en reaktion bindemedel-förorening som resulterar i en mindre mobil form av föroreningen. Den minskade mobiliteten av PAH beror främst på att föroreningen sorberas eller kapslas in i porer materialet, snarare än kemisk omvandling. Detta innebär att utlakningen av PAH från det stabiliserade materialet främst styrs av lösligheten i vatten (och därmed permeabiliteten hos de stabiliserade massorna) samt PAH:s förmåga att diffundera genom matrisen (Bendz, m.fl., 2011).

Det finns två olika tekniker för att utföra s/s av muddermassor; masstabilisering och processtabilisering. Masstabilisering utförs genom att bindemedel direkt blandas in i muddermassorna, med hjälp av en grävmaskin försedd med blandningsutrustning (Wilhelmsson, m.fl., 2010), på avsedd plats för geokonstruktionen (Figur 4) (Bendz, m.fl., 2011). Processtabilisering innebär att massorna muddras för att sedan blandas med bindemedel, varpå blandningen transporteras och läggs på önskad plats (Wilhelmsson, m.fl., 2010). Fördelen med masstabilisering är att den kan utföras utan att flytta massorna, alltså in-situ (Wilhelmsson, m.fl., 2010) och fördelen med processtabilisering är att det är lättare att kontrollera inblandningen av bindemedel med avseende på mängd och homogenitet (Bendz, m.fl., 2011)



Figur 4 Masstabilisering principskiss (Bendz, m.fl., 2011)

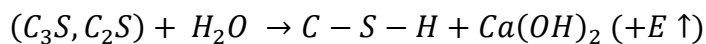
2.1.4 Bindemedel

Det finns flera olika bindemedel, var och ett med sina för- och nackdelar beroende på typ av förorening och muddermassor som ska stabiliseras och solidifieras.

De bindemedel som valdes i laborationsstudien listas och förklaras nedan, i relation till sedimenten från området.

Cement

Cement är det bindemedel som har använts i störst utsträckning och under längst tid vid s/s av jordar (Makusa, 2012), vilket även gäller i Norden (Bendz, m.fl., 2011). Cement framställs av kalksten och kiselhaltigt material, som bränns vid hög temperatur (~1450 °C) och bildar den färdiga produkten cement som till störst del består av mineraler av kalciumsilikat (Bendz, m.fl., 2011). Cement är ett hydrauliskt bindemedel vilket innebär att det krävs vatten för att det ska reagera och aktiveras (Makusa, 2012). Vattnet reagerar med kalciumsilikaterna i en exoterm ($E \uparrow$) reaktion,



Här används beteckningar som är gängse inom cementindustrin där C står för CaO, S för SiO₂, och H för H₂O. Den huvudsakliga produkten, C-S-H, uppträder som en gel av kalciumsilikathydrat vilken verkar cementerande genom att binda samman cementkorn och mineralpartiklar (Bendz, m.fl., 2011).

Bildningen av C-S-H-gelen styrs av upplösnings-och utfällningsmekanismer.

Upplösningsfasen sker när pH höjs till följd av tillsats av kalk som återfinns i cementen. Vid höga pH-värden frigörs kiseldioxid från mineraler i jorden. Utfällningsfasen sker när den frigjorda kiseldioxiden reagerar med de fria kalciumjonerna, som primärt kommer från cement, och faller ut som C-S-H-gel (Harvey, 2010). C-S-H-gelen har stor specifik area (100-700 m²/g) vilket möjliggör stor fastläggning av föroreningar. Det är även C-S-H-gelen som har störst betydelse för cementens styrka och därmed solidifieringen av sedimenten (Bendz, m.fl., 2011). C₃S och C₂S i kontakt med vatten

reagerar med olika hastighet, där C_3S reagerar snabbare än C_2S . Det innebär att det främst är C_3S som bidrar till ökad stabilitet och hållfasthet till en början, under den första månaden, medan C_2S bidrar i senare skeden. Om man ser till hållfasthetsutvecklingen över ett år, under lika förhållanden, uppnås ungefär samma hållfasthet av ren C_3S som C_2S (Makusa, 2015).

Vid s/s av sediment, som ofta har höga halter organiskt material, krävs det större mängder cement för att uppnå önskade resultat jämfört med jordar eller sediment med lägre halt organiskt material. Det beror dels på att organiska jordar och sediment har hög katjonbyteskapacitet eller CEC (eng. cation exchange capacity) som förklaras av de negativt laddade ytorna som dominerar i det organiska materialet. Det innebär också att organiskt material bestående av mindre organiska molekyler har fler bindningsytor, d.v.s. större specifik area, jämfört med större organiska molekyler. Vid nedbrytning av organiskt material bildas fulvosyror och humussyror. Fulvosyror består av mindre organiska molekyler och har högre CEC än humussyror. Bildningen av C-S-H-gelen hämmas således mer av fulvosyror än av humussyror (Harvey, 2010). De negativt laddade ytorna i sedimenten attraherar de lösta kalciumjonerna som frigjorts under hydratiseringen av kalciumsilikater. Kalciumjonerna binder till det organiska materialet vilket innebär att det finns färre tillgängliga kalciumjoner att bidra till bildningen av den önskade C-S-H-gelen (Makusa, 2015). Detta kompenseras lättast för genom att öka mängden cement så att både sedimentens CEC tillfredsställs och att det finns nog lösta kalciumjoner för att bilda en tillräcklig mängd CSH-gel (Harvey, 2010). Organiskt material hämmar även inblandningen av cement-sediment då det suspenderade finkorniga organiska materialet riskerar att fästa till ytan på cementpartiklarna och förhindra vidare interaktion mellan cement-sediment (Maher, m.fl., 2005) I laboriestedien har Basement Skövde (CEM II/A-V 52,5 N), som är ett Portland-flygaskecement, använts.

Monofill

Monofill är en produkt framtagen av Trollhättan Mineral som består av 20 % cement och 80 % slagg. Det är denna produkt som hädanefter kommer att användas av SGI vid s/s-försök. Monofill är en unik produkt, men det finns andra bindemedel med liknande sammansättning och egenskaper.

Slagg är en biprodukt vid framställning av metall från malm. Det slagg som främst används vid masstabilisering är biprodukten från framställningen av järn (Axelsson, m.fl., 2000). Slagg är sett till sammansättning och egenskaper likartat cement och aktiveras i kontakt med vatten och alkalina material (Makusa, 2012), t.ex. kalciumhydroxid som återfinns i cement. Slagg bidrar främst till ökad hållfasthet över längre tidsspänn då det inte härdar lika snabbt som cement (Axelsson, m.fl., 2000). Tillsats av slagg i kombination med cement har i försök visat god reduktion av utlakningen av PAH samtidigt som det lett till ökad stabilitet (Benz, m.fl., 2011). Det anses även vara ett kostnadseffektivt substitut för cement (EuroSoilStab, 2002).

Aktivt kol

Det finns flera olika typer av aktivt kol. Det som använts i detta examensarbete är Pulsorb FG4. Aktivt kol framställs från material med högt innehåll av kol, t.ex. träkol, och är en typ av oarbetad grafit med slumpartad porstruktur vilket ger en mycket stor specifik area ($\sim 1000 \text{ m}^2/\text{g}$) (Chemviron, 2016). Aktivt kol har god förmåga att adsorbera hydrofoba ämnen och har använts i försök för att minska utlakningen av hydrofoba ämnen, t.ex. PAH-16 (Larsson & Holm, 2012). Produkten som använts är av typen granulärt aktivt kol, med en partikeldiameter mellan 0,2-5 mm (Chemviron, 2016).

2.2 LABORATORIEFÖRSÖK

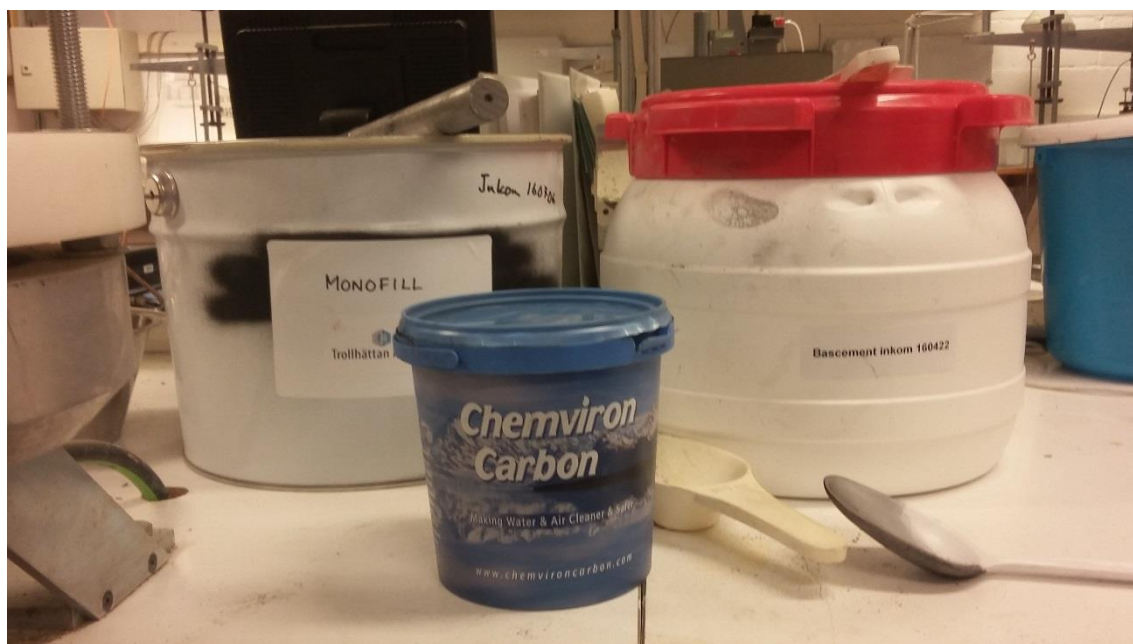
Med analysvaren från de obehandlade sedimenten och litteraturstudien som grund valdes 6 recept på bindemedel ut. Inblandningen av sediment och bindemedel gjordes tillsammans med personal från SGI i deras laboratorium i Linköping.

2.2.1 Recept bindemedel

Tabell 3 Recept för bindemedel som önskats utvärderas. C=Bascement, M=Monofill, AK=Aktivt kol

Recept #	Bascement+Monofill (kg/m ³ blöt sed.)	C (%)	M (%)	AK (% av TS)
1	250	30	70	0
2	250	30	70	2
3	250	30	70	5
4	350	30	70	0
5	350	30	70	2
6	350	30	70	5

På grund av otillräcklig mängd sediment valdes recept 1 helt bort. Inga lakteter tillhörandes recept 4 utfördes, av samma anledning som ovan.



Figur 5: Bindemedel som användes i laborationsstudien

2.2.2 Inblandning och tillverkning av provkroppar

Sediment och bindemedel blandades i omgångar, enligt de olika recepten, till homogena massor med hjälp av en degblandare (Figur 6)..



Figur 6: inblandning av bindemedel och sediment

De olika blandningarna fördelades jämnt i plastcylindrar för att härda. Tre hylsor gjordes per recept eftersom det krävs en provkropp för respektive analys av tryckhållfasthet, permeabilitet och lakning. Botten av hylsan täcktes med en skurduk för att tillåta vatten att passera samtidigt som materialet hålls på plats. Väl fyllda lades en filtersten överst i varje hylsa. Filterstenen är till för att jämnt fördela den tillförda belastningen över massorna vid härdning (Figur 7).



Figur 7: Hylsor med filtersten

När alla cylindrar fyllts sattes de i en behållare med vatten (Figur 8) i ett kylrum vid en temperatur av ca 7 °C. I varje hylsa, i kontakt med filterstenen, påfördes en vikt motsvarande ett tryck på 18 KPa. Hylsorna med blandningen av sediment och bindemedel lämnades att härda i 28 dygn innan vidare analyser gjordes.



Figur 8: Hylsor i vattenbad med påförd last

Efter 28 dygn utförde SGI enaxliga tryckförsök och permeabilitetsförsök för utvärdering av skjuvhållfasthet respektive permeabilitet för på de nu härdade massorna.

En provkropp för respektive recept (förutom nr 4) skickades till ALS Global för lakteter och analys av lakvattnet.

Bestämning av skjuvhållfasthet

Laboratiemätningarna för bestämning av provkropparnas skjuvhållfasthet gjordes av Johan Averland vid SGIs laboratorium i Linköping. Nedan följer en kort beskrivning av försöken.

För att bestämma skjuvhållfastheten för de härdade provkropparna utfördes ett enaxligt tryckförsök på de cylindriska proverna. Vid de enaxliga tryckförsöken placerades en provkropp i en press där vertikallasten kontinuerligt ökades till brott (Larsson, 2008). Vid respektive tryckförsök erhöles en graf över påfört tryck och relativ deformation.

Formen på kurvorna ger information om hur väl provkropparna stått emot påfört tryck. En större lutning kring maxvärdet indikerar ett sprödare material och vice versa. Påfört tryck vid brott, maximipunkt, avser provkroppens tryckhållfasthet.

Skjuvhållfastheten (τ_{fu}) vid de enaxliga tryckförsöken utvärderades som halva tryckhållfastheten (P_f) (Löfroth, 2005) enligt formeln:

$$\tau_{fu} = \frac{P_f}{2}. \quad (\text{ekvation 1})$$

Försöken är utförda och utvärderade enligt ISO/TS 17892-4. Originalhandlingarna av resultaten från tryckförsöken hittas i appendix.

Bestämning av permeabilitet

Permeabiliteten för respektive provkropp bestämdes av Ola Antehag vid SGIs laboratorium i Linköping. Nedan följer en kort beskrivning av den metod som använts.

För bestämning av provkropparnas permeabilitet användes en celltryckspermeameter enligt SS 02 71 09 där vatten pressas genom provkroppen.

Permeabiliteten (k) bestäms genom att mäta den mängd vatten som strömmat genom provet under given tid, enligt formeln:

$$k = \frac{Ql}{Ath} \quad (\text{ekvation 2})$$

där Q är genomströmmad vattenmängd under tiden t , h är tryckhöjd från vattenbehållarens yta till provets underkant, A är provets tvärsnittsarea och l dess längd (Larsson, 2008).

Lakteter

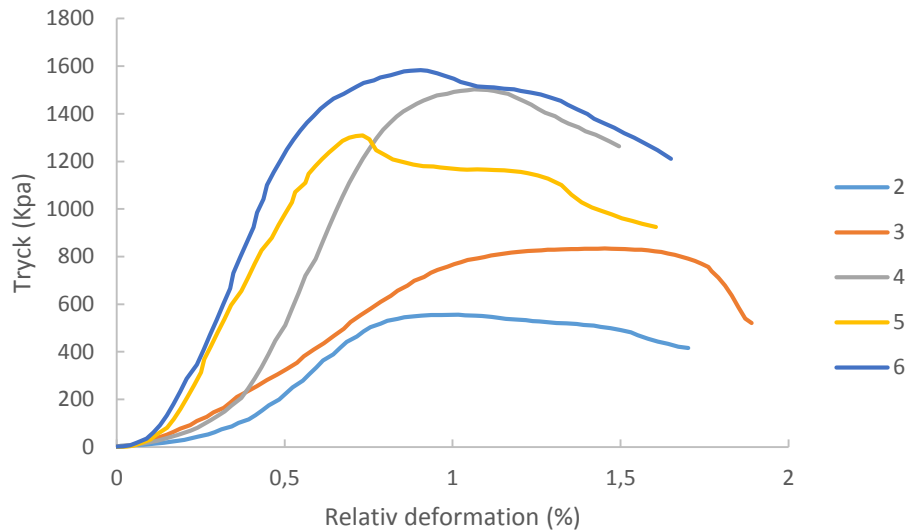
Lakteterna på provkropparna utfördes av ALS Global. Nedan följer en kort beskrivning av försöken.

Lakteterna utfördes som skakförsök enligt EN 12457-3 L/S 10. L/S står för liquid/solid och är massförhållandet mellan lakvätskan och det fasta materialet.

Vid försöken krossades och siktades provkropparna ned till 4 mm och skakades sedan med avjonat vatten vid L/S 10 i 24 h (ALS, 2016). Lakvattnet analyserades med avseende på PAH (Tabell 5).

3 RESULTAT

3.1 ENAXLIGA TRYCKFÖRSÖK



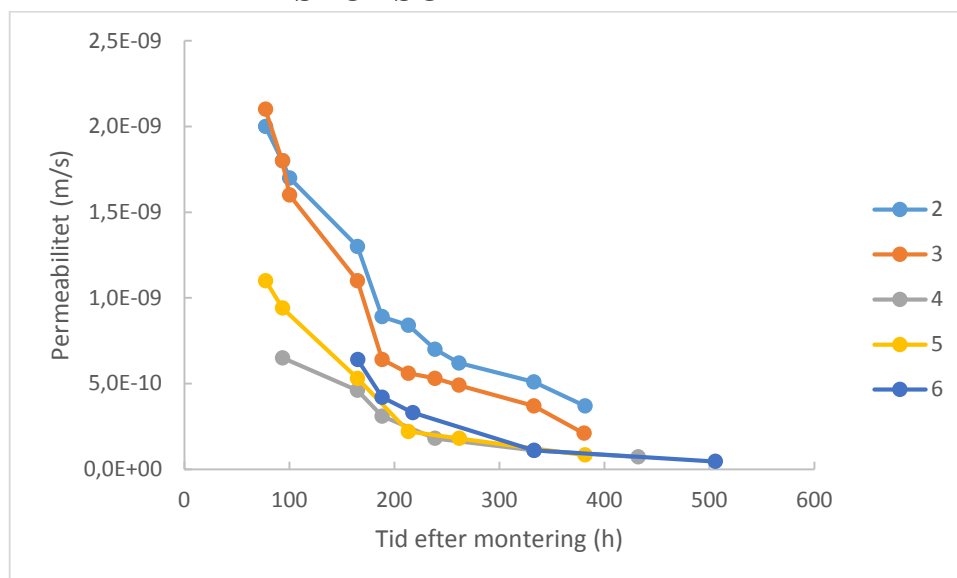
Figur 9 Sammanställning av enaxliga tryckförsök för de olika blandningarna, 2-6 (Tabell 3)

Graferna visar att lägst halt bindemedel, blandning 2, gav lägst tryck- och skjuvhållfasthet. Blandning 6 med högst halt bindemedel och högst halt aktivt kol gav högst tryck- och skjuvhållfasthet.

Tabell 4 Skjuvhållfasthet (ekv 1) från enaxliga tryckförsök för resp. blandning (2-6)

	2	3	4	5	6
Skjuvhållfasthet (KPa)	276	413	746	649	782

3.2 PERMEABILITETSFÖRSÖK



Figur 10 Sammanställning av permeabilitetsförsök för de olika blandningarna, 2-6

Lutningen på kurvorna indikerar att härdningen går snabbare i början jämfört med senare i försöket (Figur 10). Graferna visar att blandningarna med större tillsatser bindemedel och aktivt kol, t.ex. blandning 6, givit en lägre permeabilitet jämfört med blandningarna med lägre tillsatser, t.ex. blandning 2, under tiden för försöket.

3.3 LAKTESTER

Tabell 5 Selektiv redovisning av analysresultat från lakteter, L/S 10, utförda av ALS Global. Blandning 2-6.

	Obehandlat sediment	2	3	5	6
Σ PAH-16 ($\mu\text{g/L}$)	9610	10600	5160	8880	6080
Σ PAH _L ($\mu\text{g/L}$)	8210	9990	4940	8340	5790
Σ PAH _M ($\mu\text{g/L}$)	1220	570	202	522	278
Σ PAH _H ($\mu\text{g/L}$)	178	35,6	15,6	25,1	11,0

Utlakningen av valda PAH jämförs mellan obehandlat sediment och de olika blandningarna (Tabell 5). Blandningarna 3 och 6 med 5 % tillsats av aktivt kol gav lägre utlakning av PAH jämfört med blandningarna 2 och 5 med en tillsats av 2 % aktivt kol. Koncentrationerna är uppmätta i lakvattnet.

4 DISKUSSION

Tidigare studier av s/s utgjorde grunden för valet av bindemedel och vilka halter som skulle undersökas men som nämnt spelar de platsspecifika parametrarna en avgörande roll (Holm, m.fl., 2011). Därför har tidigare studier mest bidragit genom att redogöra för tendenser kopplat till de olika parametrarna och även ungefärlig storleksordning på halten bindemedel. Enligt Lennart Larsson (SGI) bedöms sediment med TOC > 10 % som ”ostabiliserbara”, men det beror snarare på den stora mängden bindemedel som krävs vilket leder till stora kostnader. Lennart Larsson redogjorde för att vid försök där tillsatsen av aktivt kol varit större än 2 % av TS i kombination med flygaska lett till sämre hållfasthet jämfört med mindre tillsatser (Larsson & Holm, 2012). Därför valdes flygaska bort som bindemedel i recepten och istället ökades tillsatsen av aktivt kol i en kombination med cement och Monofill.

Resultaten från tryckförsöken (Figur 9) visar att samtliga utvärderade blandningar uppfyller kravet för skjuvhållfasthet > 140 KPa efter 28 dygns härdning. Det faktum att kravet på skjuvhållfastheten uppfylls även för blandningen med minst mängd tillsatt bindemedel innebär att tillsats av större mängder bindemedel kan anses överflödigt. Dessutom kan skjuvhållfastheten väntas öka ytterligare till följd av de solidifierande processer som fortlöper under betydligt längre tid än 28 dygn (Axelsson, m.fl., 2000).

Blandning 2 med lägst halt bindemedel gav lägst skjuvhållfasthet. Blandning 6 med högst halt bindemedel gav högst skjuvhållfasthet. I flera projekt där s/s metoden använts har en högre halt bindemedel givit högre skjuvhållfasthet och lägre permeabilitet, jämfört med lägre halter tillsatt bindemedel (Holm, m.fl., 2007). För blandningarna 2 och 3, med 250 kg bindemedel/m³ sediment, gav en större tillsats aktivt kol en högre skjuvhållfasthet. För blandningarna 4, 5 och 6, med 350 kg bindemedel/m³ sediment gav blandning 6 med störst tillsats aktivt kol, 5 % av TS, högst skjuvhållfasthet. Blandning 4 utan tillsats av aktivt kol gav högre skjuvhållfasthet än blandning 5 med tillsatsen aktivt kol 2 % av TS. Vad detta beror på går inte säkert att säga utifrån resultaten från denna laboratoriestudie. Vid tryckförsök undersöks vanligen dubbelprover d.v.s. två provkroppar för respektive blandning. På grund av otillräcklig mängd sediment var detta inte möjligt i denna laboratoriestudie.

Samtliga utvärderade blandningar uppfyller också kravet på låg permeabilitet, 10⁻⁸-10⁻⁹ m/s (Figur 10). Enligt personal på SGI fortlöper vanligtvis permeabilitetstesterna tills ett relativt konstant värde erhålls. Trots långt gången tid fortsatte permeabiliteten att minska och försöken avbröts innan ett konstant värde uppnåts. En teori till varför inget konstant värde på permeabiliteten nåddes under den tid försöken var igång är att det fortfarande pågick solidifierande reaktioner mellan bindemedel-sediment, vilket rimligtvis resulterar i att permeabiliteten minskar ytterligare. Denna teori stöds av det faktum att testerna utfördes efter 28 dygn härdning, och flera tidigare försök har visat att de solidifierande processerna fortlöper under betydligt längre tid. Då speciellt med tillsats av slagg (Monfill) vars processer sker långsammare och under en längre tid, jämfört med cement (Axelsson, m.fl., 2000).

Resultaten från laktesterna (Tabell 5) visar att recept 3, 250 kg bindemedel/m³ blött sediment, 30 % cement, 70 % Monofill och tillsats av aktivt kol på 5 % av TS, är den som lett till störst sammanlagd reduktion i utlakning av redovisade PAH. Resultaten

visar också att recept 2 (minst tillsatt bindemedel) givit lägst reduktion. För de redovisade halterna har tillsynes utlakningen av PAH-16 och PAH_L ökat jämfört med det obehandlade sedimenten, men det är viktigt att tänka på att mätosäkerheten och rumslig variation för analyserna mycket väl kan innebära att utlakningen inte ökat. Oavsett om utlakningen från blandningen enligt recept 2 ökat eller ej, är utlakningen störst från denna blandning. En tanke är att den energi som frigörs vid hydratiseringen av cement lett till frigörande av PAH från partikelytor, och då speciellt de med lägre molekylvikt som är mer vattenlösliga och inte binder lika hårt till materialet. En vidare tanke, kopplat till resonemanget ovan, är att denna blandning även uppvisat högst permeabilitet, vilket innebär att lösta PAH lättare kan transporteras igenom och ut ur matrisen jämfört med blandningarna med mer aktivt kol och lägre permeabilitet. En trend som går att utläsa är att blandningarna med störst mängd aktivt kol lett till störst reduktion av utlakningen av PAH. Detta faktum gör det intressant att vid framtida försök, med liknande parametrar, tillsätta större mängder aktivt kol i blandningarna.

Laktest för stabiliserade massor utförs vanligtvis som diffusionstest snarare än skakförsök. Vid diffusionstest placeras provkroppen i lakvätska och den kumulativa utlakningen mäts. Eftersom provkropparna krossats inför skakförsöken, något som inte görs vid diffusionstest, ger detta en betydligt större utlakning än vad som kan väntas vid ett diffusionstest. Priset för diffusionstest överskred budgeten för detta examensarbete.

Masstabilisering bör lämpa sig väl i detta projekt då de förorenade massorna redan ligger på den plats där geokonstruktionen önskas och s/s kan då utföras in situ innanför en konstruerad spont och således minska risken för spridning av föroreningar/förorenat sediment. Området där sedimenten ska stabiliseras delas lämpligen in i celler (~5,5×4,3×3,1 m) vilka stabiliseras i omgångar för att uppnå en mer homogen inblandning (Maher, m.fl., 2005). När sedimenten härdat till en monolit kan grunden för planerad byggnation ytterligare stärkas genom pålning ner till berg. En faktor som talar mot masstabilisering är att det rör sig om relativt stora djup och mäktiga sedimentlager, vilket gör homogen inblandning vid masstabilisering svårare (Bendz, m.fl., 2011).

Produkten Monofill har valts att användas i laborationsstudien på grund av dess innehåll av slagg som har uppvisat god fastläggning av PAH (Bendz, et al., 2011). Monofill är den produkt SGI ämnar använda vid framtida s/s - projekt och hittills har mycket få försök gjorts med denna produkt, varför resultaten från denna laborationsstudie är lite extra intressanta.

Tillsatsen av aktivt kol gjordes främst på grund av dess dokumenterade effekt på fastläggningen av PAH (Larsson & Holm, 2012) men också i hopp om att kolet kunde adsorbera en del av det lösta/kolloidala organiska materialet som annars tenderar att fästa på ytan på cementpartiklarna och således hämma inblandningen av cement och sediment. Om ovanstående tes stämde eller ej är svårt att avgöra utifrån resultaten.

Då s/s metoden är relativt ny saknas undersökningar om långtidseffekter för geokonstruktionerna (Bendz, m.fl., 2011). Geokonstruktionen försvagas med tiden genom inre och yttre kemiska, mekaniska och biologiska processer. Studier som undersökt beständigheten under ca 15 år efter utförandet har inte visat på någon nedbrytning av konstruktionen (Holm, m.fl., 2007) och en livslängd på 100 år ses som ett rimligt antagande (Bendz, m.fl., 2011).

5 SLUTSATSER

Efter tolkning av resultaten från tryck-, permeabilitet- och lakteter dras slutsatsen att inblandning enligt recept 3, 250 kg bindemedel/m³ blött sediment, 30 % cement, 70 % Monofill och tillsats av aktivt kol på 5 % är bäst lämpad för användning i området. Både kravet för skjuthållfasthet (>140 KPa) och låg permeabilitet ($\sim 10^{-8}$ - 10^{-9} m/s) uppnås, samt att det är denna blandning som givit störst reduktion av utlakning av PAH-16. Denna blandning är också mer kostnadseffektiv jämfört med blandningar med större mängder tillsatt bindemedel.

6 REFERENSER

Ahangar, A. G., 2010. *Sorption of PAHs in the Soil Environment with Emphasis on the Role of Soil Organic Matter: A Review*, Zabol: World Applied Sciences Journal.

ALS, 2016. *Laktest*, ALS Global.

Axelsson, K., Johansson, S.-E. & Andersson, R., 2000. *Stabilisering av organisk jord med cement- och puzzolanreaktioner - Förstudie*, Svensk Djupstabilisering c/o Statens geotekniska institut.

Bendz, D., Suer, P. & Kleja Berggren, D., 2011. *Stabilisering och solidifiering av muddermassor*, Statens geotekniska institut.

Blažauskas, N., Larsson, L. & Rostmark, S., 2012. *Technologies and Solutions for Handling of Contaminated Sediments*, Sustainable Management of Contaminated Sediments (SMOCS).

Chemviron, 2016. *Activated carbon*. [Online]
<http://www.chemviron.eu/products/activated-carbon/>
[Accessed 22/8 2016].

EuroSoilStab, 2002. *Design Guide Soft Soil Stabilisation*

Fanger, G. & Broms, S., 2016. *PM - Föroreningar inom detaljplaneområde Kolkajen-Ropsten, Norra Djurgårdsstaden*, Stockholm: Kemakta Konsult AB.

Harvey, O. R., 2010. *Mechanisms of organic-inorganic interactions on soils and aqueous environments elucidated using calorimetric techniques*, Texas A&M University.

Holm, G., Bendz, D., Larsson, L., Rogbeck, Y., Leppänen, M., Mácsik, J., Pehrson, P & Svedberg, B., 2007. *Stabilisering och solidifiering av förorenad jord och muddermassor - Lämplighet och potential för svenska förhållanden*, Naturvårdsverket.

Holm, G., Svedberg, B. & Eriksson, K., 2011. *Vägledning för nyttiggörande av muddermassor i hamn- och anläggningskonstruktioner - Stabilisering och solidifiering av förorenade muddermassor*, Linköping: Statens Geotekniska Institut.

Kemikalieinspektionen, 2016. *Kemikalieinspektionen*. [Online]
<http://www.kemi.se/prio-start/kemikalier-i-praktiken/kemikaliegrupper/polycykliska-aromatiska-kolvaten-pah>
[Accessed 10 10 2016].

Larsson, L. & Holm, G., 2012. *Inverkan av valda bindemedelsmixer på laktbart tributyltenn (TBT) och irgarol från stabiliserat sediment*, Statens geotekniska institut.

Larsson, R., 2008. *Jords egenskaper*, Statens geotekniska institut.

Lundstedt, S., 2003. *Analysis of PAHs and their transformation products in contaminated soil and remedial processes*, Umeå: Umeå Universitet.

Löfroth, G., 2005. *Långtidsegenskaper hos kalkcementpelare - en studie av 10 år gamla kalkcementpelarförstärkningar*, Linköping: Svensk Djupstabilisering.

Maher, A., Najm, H. & Boile, M., 2005. *Solidification/Stabilization of Soft River Sediments Using Deep Soil Mixing*, Center for Advanced Infrastructure & Transportation (CAIT).

Makusa, G., 2012. *Soil stabilization methods and materials*, Luleå Universitet.

Makusa, G., 2015. *Stabilization-Solidification of High Water Content Dredged Sediments - Strength, Compressibility and Durability Evaluations*, Luleå Universitet.

Risbecker, L., 2009. *Organiska miljögifter i Dalälven*, Länsstyrelsen Dalarnas län.

Site, A. D., 2000. *Factors Affecting Sorption of Organic Compounds in Natural Sorbent/Water Systems and Sorption Coefficients for Selected Pollutants. A Review*, American Institute of Physics.

Wilhelmsson, A., Holm, G., Lagerlund, J., Majjala, A., Mácsik, J ., 2010. *Potentialbedömning av flygaskor som bindemedelskomponent för stabilisering och solidifiering (s/s) av muddermassor*, Stockholm: VÄRMEFORSK Service AB.