

STABILISERING AV SCHAKTMASSOR

*Nyttjande av bindemedelsstabiliserad lös lera som
utfyllnadsmaterial*



Matilda Harlén

Skanska Sverige AB, Teknik

2021-09-30

FÖRORD

År 2021 utfördes Studien *Stabilisering av schaktmassor – Nyttjande av bindemedelsstabiliserad lös lera som utfyllnadsmaterial*. Projektet har finansierats av SBUF och Skanska Sverige AB.

Material för laboration har finansierats av:

SWECEM

Cementa

Tack Henry Flisell (SWECEM) och Thomas Lagerbäck (Cementa) för tid och engagemang.

Den ursprungliga projektiden är formulerad av David Ekstrand och Johannes Tornborg på Skanska Teknik, projektet har letts av David Ekstrand. Huvudförfattare och projektansvarig är Matilda Harlén med stöd av Fredrik Svensson (Skanska Teknik). Projektets laboratoriepersonal har utgjorts av Fredhy Hansen och Matilda Harlén på Skanska Teknik. Stort tack Fredhy för din tid och stöttning.

Projektets referensgrupp har utgjorts av Virginia Candan Bengtsson (Trafikverket), Axel Josefsson (AFRY) och Andreas Olsson Waage (Skanska Väg och Anläggning). Tack för er tid, stöttning och värdefulla åsikter.

Utöver nämnda personer skulle författaren vilja tacka följande kollegor på Skanska som bidragit med värdefulla åsikter och erfarenheter:

Fredrik Bernhardsson, Elin Elfwering, Zhaleh Habibnezhad, Per Ölmeby, Balsan Khachadorian, Cecilia Edmark, Johannes Tornborg och Henrik Wiberg.

Ett stort tack till alla som möjliggjort och hjälpt till med studien!

Göteborg september 2021

Matilda Harlén

Försättsida: Foton från projekten Södra Marieholmsbron (vänster) och Sisjömotet (höger).

SAMMANFATTNING

I Sverige transporteras schaktmassor bestående av lös lera i de flesta fall till deponi. Utvecklingstrenden i flera europeiska länder är att det ställs högre krav på användningsgrad av schaktmassor i takt med att deponiutrymme minskar. Att kunna använda schaktmassor inom projekt kan således komma att bli viktigare, även på platser med lös lera.

Syftet med föreliggande projekt är att undersöka om stabilisering med bindemedel är ett hållbart alternativ för att hantera schaktmassor bestående av lös lera. Studien undersöker stabilisering som ett möjligt alternativ för att minska transporter och deponibehov samt möjligheten att nyttja den stabiliserade leran som utfyllnadsmaterial.

Studien består dels av en laborationsdel, dels av en kalkyldel. Laborationsdelen omfattar inblandningsförsök med lera och bindemedel. Kalkyldelen omfattar en uppskattning av såväl kostnader som utsläpp av CO₂-ekvivalenter för olika hanteringsalternativ. De alternativ som jämförs är transport av lera till deponi och användning av stabiliserad lera som utfyllnadsmaterial.

Bindemedlen som har valts för laborationen baseras på dokumenterad effekt, tillgänglighet och miljöpåverkan. Totalt användes 5 olika bindemedel och lera från två platser i Göteborgsområdet (Pilekrogen och Ringön). Använda bindemedel var Kalkcement, Multicement, CKD, Merit samt Merit i kombination med byggcement. Målet med stabiliseringen var att inom 72 h uppnå en odränerad skjuvhållfasthet på 30 kPa. Generellt kan en hållfasthet på 30 kPa uppnås inom 3 dygn med 2,5 % inblandning av CKD, MC eller Merit + byggcement. För KC-inblandningar krävs något mindre inblandningsmängd för att uppnå samma resultat (ca 1 %). För inblandning av endast Merit krävs en större inblandningsmängd för att uppnå samma resultat (ca 20 %).

Vald stabiliseringsmetod för beräkningskalkylen är processtabilisering och valt bindemedel är CKD (slaggprodukt från cementtillverkning). Den utförda kalkylen visar att det är klart fördelaktigt att stabilisera leran om den går att använda inom projektet. Kostnadsmässigt är det mer än 50 % dyrare med alternativerna som innebär att leran deponeras. Deponialternativen leder även till 5–10 ggr så mycket utsläpp av CO₂-ekvivalenter. Det skall dock påpekas att CO₂-avtrycket från slaggprodukter kan vara missvisande då det endast är förädlingen av slaggen som räknas in. Generellt är det inte materialen (fyllnadsmaterial/ bindemedel) som är kostnadsdrivande eller genererar utsläpp, utan själva hanteringen av schaktmassor och fyllnadsmaterial.

För att sammanfatta finns förbättringspotential i hur lösa schaktmassor hanteras, oavsett om stabilisering utförs eller ej. Förbättringspotentialen ligger i att minska transporter, ställa om till förnyelsebart bränsle för fordon och minska mängden råvaror som behövs. Att optimera tillverkningsprocesser och kunna använda vad som betraktas som restprodukter idag är också ett steg i rätt riktning.

Vid valet huruvida markstabilisering skall utföras eller inte, bör resurser som krävs för deponi och transporter ställas mot resurser som krävs för bindemedelsframställning.

INNEHÅLL

BEGREPP OCH DEFINITIONER	4
1 INLEDNING	6
1.1 BAKGRUND	6
1.2 SYFTE	7
1.3 AVGRÄNSNINGAR	7
2 METOD	8
3 BESKRIVNING LABORATION	9
3.1 LERA FRÅN PILEKROGEN	9
3.2 LERA FRÅN RINGÖN	9
3.3 METOD LABORATION	11
4 LITTERATURSTUDIE	14
4.1 METODER FÖR MARKSTABILISERING MED BINDEMEDEL	14
4.1.1 <i>Pelarstabilisering</i>	14
4.1.2 <i>Masstabilisering</i>	15
4.1.3 <i>Processtabilisering</i>	16
4.2 BINDEMEDEL FÖR MARKSTABILISERING	17
4.2.1 <i>Merit</i>	18
4.2.2 <i>CKD</i>	18
4.3 KEMISKA REAKTIONER VID STABILISERING AV LERA MED CEMENT/KALKSTENSBASERADE BINDEMEDEL	19
4.3.1 <i>Cement</i>	19
4.3.2 <i>Kemiska reaktioner</i>	20
4.4 ERFARENHETER FRÅN STABILISERING I SVERIGE	22
5 RESULTAT LABORATION	24
5.1 HÅLLFASTHETSUTVECKLING	24
5.2 HÅLLFASTHET AV STÖRD STABILISERAD LERA	25
5.3 FÖRÄNDRING AV VATTENKVOT	26
6 KALKYLEXEMPEL	28
7 SLUTSATS	32
REFERENSER	34

Bilaga 1 Laborationsresultat

Bilaga 2 Input beräkningskalkyl

BEGREPP OCH DEFINITIONER

Beteckningar:

c_u	Odränerad skjuvhållfasthet
kPa	Kilopascal, enhet för tryck (1000 N/m ²)
ρ	Densitet
w_L	Konflytgräns
w_N	Naturlig vattenkvot

Benämningar:

BC	Byggcement
CKD	Cement kiln dust
CO ₂ e	Koldioxidekvivalent
GGBS	Ground Granulatet Blast furnace Slag, mald granulerad masugnsslagg
ISO	International Standards Organisation
KC	Kalkcement
MC	Multicement
OCR	Overconsolidation ratio = Överkonsolideringsgrad
PAH	Polycykliska aromatiska kolväten
PCB	Polyklorerade bifenyler
SD	Svensk Djupstabilisering
SGF	Svenska geotekniska föreningen
SGI	Statens geotekniska institut
SIS	Swedish Standards Institute
SS	Svensk standard
TBT	Tributyltenn

Begrepp:

Aluminat	Förening med aluminiumoxid (Al _x O _y)
Bränd kalk	Upphettad och krossad kalksten, samma som osläckt kalk eller CaO
CO ₂ -ekvivalent	Mått på utsläpp av växthusgaser, anger hur mycket CO ₂ som behövs för samma inverkan på växthuseffekten
Djupstabilisering	Stabilisering av mark där bindemedel blandas in i jord <i>in situ</i> med hjälp av blandningsverktyg (pelarstabilisering och masstabilisering omfattas)
Hydrostatiskt portryck	Portrycket ökar 10 kPa/m, d.v.s. samma tryckökning som fritt vatten
Hyttsten/hyttssand	Produkt som framställs genom att masugnsslagg kyls av med vatten
Konflytgräns	Definierar gräns mellan flytande och plastisk konsistens
Lös lera	Avser i denna rapport lera som beter sig rinnande och är svår att hantera på arbetsplats samt vid transport
Markstabilisering	Används i denna rapport synonymt med begreppet stabilisering och avser endast stabilisering av jord med bindemedel

Masstabilisering	Metod för stabilisering av jord där bindemedel blandas in direkt i jorden med ett roterande verktyg som rörs vertikalt och horisontellt (bildar block)
Pelarestabilisering	Metod för stabilisering av jord där bindemedel blandas in direkt i jorden med ett roterande verktyg som rörs vertikalt (bildar pelare)
Processtablisering	Metod för stabilisering av jord där inblandning av bindemedel sker ovan markytan i ett blandningskärl
Puzzolaner	Material som vid normal temperatur och i närvaro av vatten reagerar med kalciumhydroxid och bildar förening med cementerande egenskaper
Silikat	Förening med kiseloxid (Si_xO_y)
Sensitivitet	Förhållande mellan ostörd och störd odränerad skjuvhållfasthet
Stabilisering	Används i denna rapport synonymt med begreppet markstabilisering och avser endast stabilisering av jord med bindemedel
Vattenkvot	Förhållande mellan vattnets massa och det fasta materialets massa

1 INLEDNING

Föreliggande rapport behandlar stabilisering av schaktmassor bestående av lös lera och möjligheter att implementera metoden. Detta kapitel syftar till att ge en uppfattning om bakgrunden till det studerade ämnet samt vad studien har för avsikt och innehåll.

1.1 Bakgrund

Schaktmassor bestående av lös lera transporteras i de flesta fall till deponi eller används som utfyllnadsmassor i havsvikar (t.ex. Torsviken i Göteborg).

I projektet Sisjömotet/Söderleden (södra Göteborg) påträffades extremt lös lera vid schakt för breddning av befintlig motorväg. Traditionell masstabilisering utfördes genom inblandning av cement i leran ned till 5 m djup under mark. Inblandningsförsök i laboratorium samt resultat från två fältprovningar, utförda i augusti 2017, visade på en snabb hållfasthetsutveckling efter inblandning av cement i lera. Ungefär 4 h efter inblandning hade hållfastheten ökat från ca 5 kPa till ca 25 kPa och efter 24 h till ca 50–100 kPa genom inblandning av cement 75 kg/m³.

Om/när stabilisering av schaktbotten, inom t.ex. spontkonstruktioner, med kalkcement-pelare blir vanligare i Sverige bör man även undersöka möjligheten att nyttja de blandade schaktmassorna som fyllnadsmaterial.

Med ledning av att leran i Sisjön kunde stabiliseras borde även schaktmassor av lös lera kunna stabiliseras genom t.ex. en inblandningsstation, för att därefter kunna användas exempelvis som massor för utfyllnad av bullervallar etc. Vid användning som utfyllnadsmaterial behövs rimligtvis inte lika hög hållfasthet och därmed mindre stabiliseringsmedel än vid konventionell markstabilisering.

I grova drag kan möjligen en container (flyttbar eller monterad på lastbil) utrustas med ett inblandningsverktyg monterat på en travers. På så sätt kan inblandningsstationen ställas upp på olika projekt. Schaktmassor kan dumpas i sådana stationer, när stationen fyllts kan inblandning utföras vid lämplig tidpunkt. Efter t.ex. 4 h härdning till exempelvis 25 kPa (fast lera liknande torrskorpelera) kan sedan massorna hämtas för att transporteras till slutlig utfyllnadsplats där de härdar ytterligare.

Alternativet att lägga schaktmassor på deponi är fördelaktigt så länge avgiften inte är särskilt hög. Detta då massorna används för att täcka över annat avfall på deponin samt för att utforma själva deponin. Ett växande problem är dock att plats på deponier börjar ta slut samtidigt som krav på hållbarhet ökar. Idag finns på flera håll exempel där utrymmesbrist vid deponier skapar flaskhalsar i projekt och driver upp deponiavgifter. Dessutom förekommer även restriktioner för hur mycket schaktmassa som får deponeras och/eller extra insatta avgifter för deponering av just schaktmassor. Generellt sett går utvecklingen mot att minska massor till deponi, vilket alltså kan innebära att stabilisering, även av lösa lermassor, kan bli mer aktuellt än det är i dagsläget.

1.2 Syfte

Projektets syfte är att undersöka om inblandning av bindemedel är ett hållbart/grönt alternativ för att hantera schaktmassor bestående av lös lera: dels avseende lönsamheten i minskat transport- och deponibehov, dels avseende möjligheten att nyttja den stabiliserade leran som utfyllnadsmaterial. Minskade kostnader och miljöpåverkan från stabiliseringen måste dock ställas i relation till kostnader och miljöpåverkan från produktion och inblandning av det stabiliserande materialet.

Sammanfattningsvis är potentiella syften med stabilisering av schaktmassor bestående av lös lera:

- Använda schaktmassor som utfyllnadsmaterial
- Minska transport/deponikostnad
- Förenkla hantering av lös lera

Projektet anknyter till SBUF:s mål och inriktning framförallt avseende långsiktigt hållbar tillväxt inom byggsektorn samt mervärde för kund (funktion, kvalitet, kostnader) i branschföretagens produkter och tjänster.

Ett av projektets mål är att ge råd för hantering av lösa schaktmassor och ge en uppfattning om när det är lönsamt att nyttja stabilisering av schaktmassor. Avsikten är att reflektera utifrån praktiska, ekonomiska och miljömässiga perspektiv.

1.3 Avgränsningar

Inom ramen för projektet studeras endast markstabilisering med bindemedel. Vidare är det endast bindemedel anpassade för lös lera som innefattas av studien.

Begreppet lös lera avser lera som beter sig rinnande och är svår att hantera på arbetsplats samt vid transport. Notera att begreppet ej avser att ha någon koppling till hållfasthetsklassificering av lera.

Studien behandlar stabilisering av leror med egenskaper som liknar/motsvarar västsvenska leror. Använd lera för laboration kommer ifrån Göteborgsregionen. Stabilisering av leror med exempelvis hög sulfidhalt eller organiskt innehåll inkluderas ej.

Studien undersöker ej möjligheter att använda stabiliserad lös lera som ett bärande material.

Mass- och pelarstabilisering behandlas inte som alternativ för den utförda lönsamhetskalkylen.

Studien undersöker ej stabiliserande förmåga vid närvaro av olika föroreningar i leran. Vidare studeras inte heller urlakning av föroreningar från den stabiliserade leran. För muddermassor finns exempelvis problem med tungmetaller, TBT, PAH och PCB.

Långtidseffekter av stabilisering (längre än 72h efter stabilisering) ingår ej i denna studie. Effekt av väderpåverkan som regn och tjäle beaktas ej.

Studien bygger på att undersöka utveckling av odränerad skjuvhållfasthet för lera stabiliserad i laboratorium. För att få en bredare förståelse för stabiliseringens effekter och hur bindemedlen inverkar på lerans beteende bör fler parametrar och typer av tester utföras. Inblandningsförhållanden eller stabiliseringseffekt i fält undersöks ej.

2 METOD

Det generella tillvägagångssättet för denna studie presenteras enligt stegen nedan:

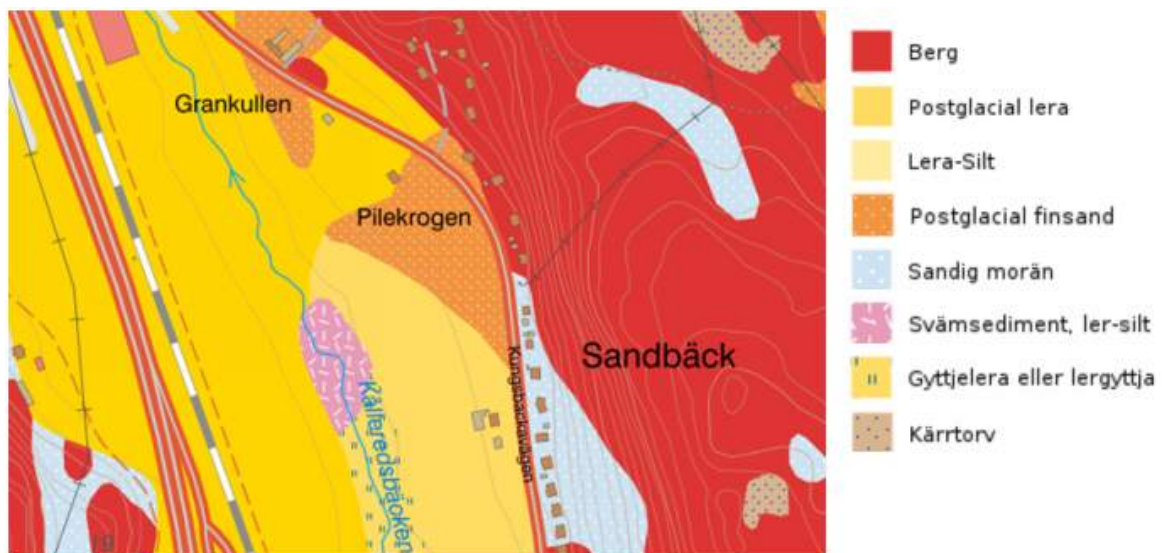
1. Kartläggning av stabiliseringsmedel via litteraturstudie
2. Val av stabiliseringsmedel (mängd och typ) för testning. Val baseras på dokumenterad effekt, tillgänglighet/tillgång och miljöpåverkan
3. Inblandningsförsök i laboratorium
4. Utvärdering av resultat
5. Beräkningskalkyl innefattande:
 - Kostnad
 - Deponi
 - Utfyllnadsmaterial
 - Stabiliseringsmedel
 - Transporter
 - Miljöpåverkan
 - Deponi
 - Utfyllnadsmaterial
 - Stabiliseringsmedel
 - Transporter

3 BESKRIVNING LABORATION

I detta kapitel beskrivs lera som använts vid laboration samt metoden för laborationen. Använd lera vid laboration kommer från Pilekrogen samt Ringön. Huvudsakligen har lera från Pilekrogen använts i studien.

3.1 Lera från Pilekrogen

Pilekrogen är ett område i Mölndal (sydost om Göteborg) beläget vid Källeredsbäcken. Det undersökta områdets jordarter består enligt SGU:s kartvisare av postglacial lera samt lera-silt, se Figur 3-1. Lera från Pilekrogen har tagits upp med kolvprovtagare. Den upptagna lera har generellt en naturlig vattenkvot på 70–100 % och en konflytgräns på 60–90 %. Densiteten varierar mellan 1,5 och 1,6 ton/m³. Den okorrigerade odränerade skjuvhållfastheten är ca 10 kPa vid 3 m djup och ökar till ca 30 kPa vid 12 m djup: detta betraktas enligt standard SS-EN/ISO 14688-2:2004 (SIS, 2004) som mycket låg respektive låg hållfasthet. Lera har en sensitivitet på 20–130. Sensitivitet över 30 klassificeras som högsensitivt enligt standard SS-EN/ISO 14688-2:2004 (SIS, 2004).



Figur 3-1 Jordarter i ytan vid Pilekrogen (från SGU:s kartvisare 2021).

3.2 Lera från Ringön

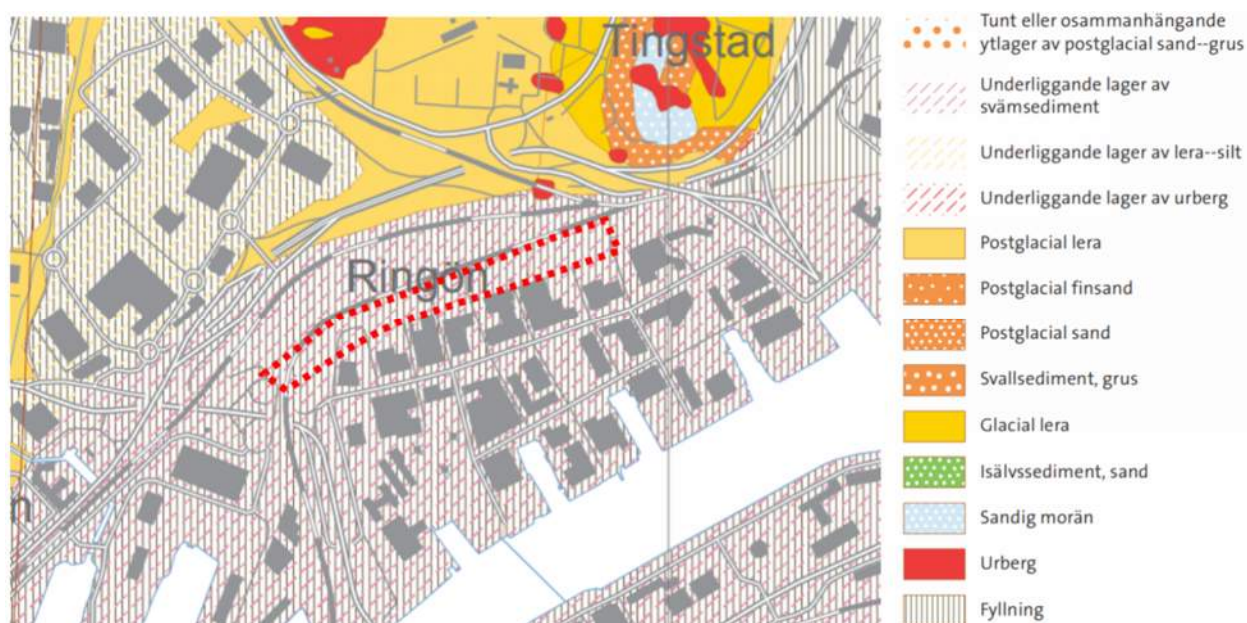
Ringön ligger i centrala Göteborg och är ett uppfyllt vassområde av Göta Älv. Uppfyllnaden utgörs bl.a. av muddermassor från Göta älv. Området har använts för industriverksamhet. Enligt SGU:s jordartskarta utgörs jordarterna av fyllnadsmaterial med underliggande lager av svåmsediment, se Figur 3-2. Det finns diverse byggavfall i fyllningsmassorna (trä, järn, tegel med mer) och marken är förorenad från tidigare industriverksamhet.

Lera som användes för laboration är schaktmassor från arbetsområdets östra del. Dessa schaktmassor bestod av lös lera, dock med rester från fyllnadsmaterial som i möjligaste mån fick sorteras bort innan laboration. Lera hämtades efter uppschaktning, från en upplagshög, och är alltså störd. Viss föroreningsgrad förekommer i all lera från det aktuella området på Ringön. Den hämtade lera är den minst förorenade lera som gick att få tag på i området.

Egenskaper för fyllning och lera som beskrivs i nedanstående två stycken har hämtats från projekterings PM geoteknik för Spårvagnsdepå Ringön Etapp 2 (Göteborgs Stad Trafikkontoret, 2016).

Fyllning bestående av lera i området har en naturlig vattenkvot mellan 40 och 90 %, konflytgränsen uppskattas ligga runt 70 %. Det finns ej mycket tester för fyllningen att tillgå och i PM har följande egenskaper ansatts: Densitet ca 1,6 ton/m³ och odränerad skjuvhållfasthet ca 13 kPa.

Lerans vattenkvot uppgår till 50–100 % och konflytgränsen uppgår till 55–90 %. Densiteten är 1,45–1,7 ton/m³. Leran är mellansensitiv och normalkonsoliderad till lätt överkonsoliderad (OCR 1,0–1,3).



Figur 3-2 Jordarter i ytan vid Ringön, aktuellt område inringat (från SGU:s kartgenerator 2021).

3.3 Metod laboration

Laborationen gick ut på att med inblandning av bindemedel stabilisera lös lera. Totalt användes 5 olika bindemedel och lera från två platser i Göteborgsområdet (Pilekrogen och Ringön). Bindemedelstyp och mängd att börja testa med bestämdes utifrån litteraturstudie samt erfarenheter som erhöles via kontakt med Skanska, Cementa och SWECEM. De valda bindemedlen går att få tag på och produceras i Sverige samt har dokumenterad effekt för stabilisering av lerjordar. Nedan listas de använda bindemedlen samt deras förkortningar.

KC: Kalkcement (bränd kalk & cement), vanligaste bindemedlet för markstabiliseringssyfte

Merit: Slaggprodukt från råjärnstillverkning

M+BC: Merit + Byggcement

CKD: Cement kiln dust, biprodukt från cementtillverkning

MC: Multicement består av CKD och Portlandcement

Lera från Pilekrogen hämtades med kolvprovtagare (ostörda prover) och lera från Ringön hämtades från upplagshög på byggarbetsplats och rensades på grus innan laboration. Inledningsvis testades Pilekrogsleran med alla bindemedel. Därefter testades Ringöleran med de bindemedel som anses mer miljövänliga (Merit, MC och CKD). Leran och bindemedlet blandades med hjälp av en vanlig köksassistent, se Figur 3-3.



Figur 3-3 Använd köksassistent, blandningsskål och blandningsverktyg.

Generell arbetsgång laboration:

1. Lägg lera i blandningsskål (ca 1,2 kg för Pilekrogslera och ca 1,5 kg för Ringölera)
2. Blanda om leran med köksassistent (låg effekt ca 20 sek)
3. Ta ut prover för hållfasthet, vattenkvot och konflytgräns på omrörd/störd lera innan stabiliseringsmedel hälls i
4. Blanda stabiliseringsmedel med hjälp av köksassistent, låg effekt i 2 min för alla prover
5. Häll ner blandning i kolv och packa med packningsstav
6. Ställ in prover i kylskåp, låt provet ha kontakt med luft (ingen plast eller gummilock på ovansida kolv)
7. Ta prover för skjuvhållfasthet efter 1h, 24h, 48h och 72h
8. Ta prover för vattenkvot på stabiliserad lera efter 72h
9. Ta prov för skjuvhållfasthet på stabiliserad omrörd lera efter 72h

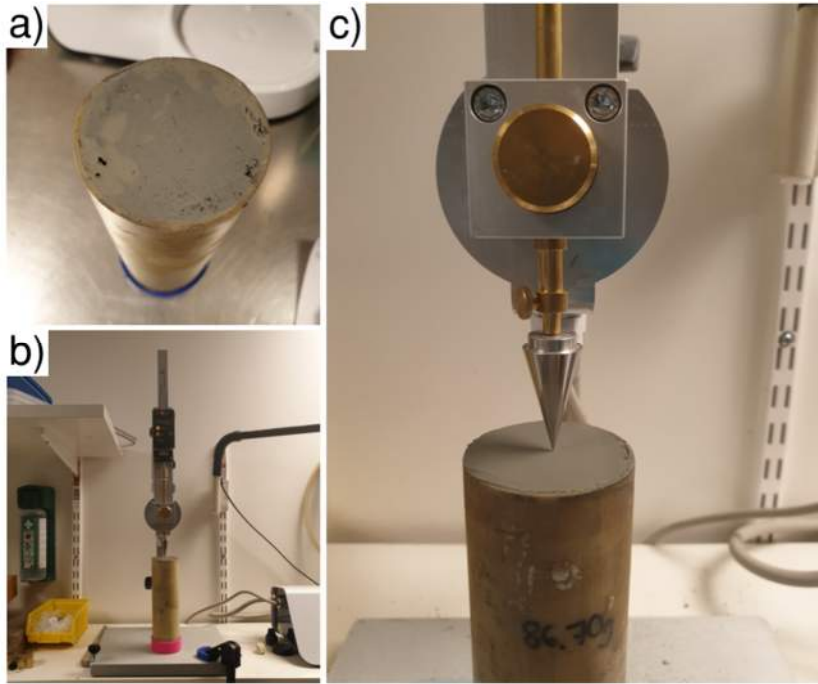
För vissa prover noterades också en konsistensbedömning hur leran upplevdes när man försökte bryta den: blöt, kladdig, seg, smulig eller spröd, se exempel i Figur 3-4.



Figur 3-4 Exempel på olika bedömda konsistenser för stabiliserad lera.

Mängden bindemedel som blandades i justerades/optimerades under tidens gång varför det t.ex. finns fler mätserier för Merit och KC (3 för övriga). Målet var att, inom 72 h, hamna runt ca 30 kPa och studera känsligheten för mängden stabiliseringsmedel. Den relativt korta tidsbegränsningen har satts då det är av intresse att få snabba resultat på arbetsplatsen för att slippa mellanlagring. 72 h ska representera det längsta tidsscenarioet utan mellanlagring, alltså att stabilisering utförs innan helgen och hanteras efter helgen. Gränsen 30 kPa har valts utifrån egenskaper av en typisk torrskorpelera, vilket bedöms vara tillräckligt för studiens syfte.

Odränerad skjuvhållfasthet bestämdes med konförsök. Leran trycktes upp ur kolven och de översta 2 cm skars av för att inte få med effekt av uttorkning/oxidering, se Figur 3-5 a). Konförsök gjordes direkt på avskuren lera i kolv. Medelvärde av 3 st konförsök användes för hållfasthetsutvärdering. Avläsning för konförsök var automatisk, se Figur 3-5 b) och c). Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet från fallkonförsök är halvempirisk: den använda leran ingår i empiriskt referensunderlag som karakteriseras av normalkonsoliderad till lätt överkonsoliderad lera enligt SGI (2007). Konförsök är känsligt för störningar, dock är detta av mindre betydelse då leran kommer vara störd vid inblandning. Det är alltså den störda lerans odränerade skjuvhållfasthet som har bestämts.



Figur 3-5 a) Oxidering b) konförsöksapparat med automatisk avläsning c) uppställning vid konförsök.

Enligt praxis (SS 02 71 28) bestäms hållfasthet för stabiliserad jord med enaxliga tryckförsök. Vanligtvis erhålls, och eftersträvas, en hållfasthet över 100 kPa vid markstabilisering. Då studiens syfte riktar sig till att stabilisera för hanterbarhet alternativt för användning som utfyllnadsmaterial och uppnå en hållfasthet kring 30 kPa är konförsök en mer lämplig metod för att bestämma odränerad skjuvhållfasthet.

Avvikanden från laborationsmetod:

- Punkt 6 och 7 utfördes ej för alla prover då det inte fanns med i laborationsmetoden från början, finns för ca 50 % av alla prover
- Antalet timmar mellan respektive mättillfälle kan variera +/- 1h, detta på grund av tidsbrist vid flera provningar samtidigt och tillgänglighet till laboratorium
- Mätningar efter 1h på MC- och Meritblandningar saknas för Ringöleran

4 LITTERATURSTUDIE

Att stabilisera lösa jordar med stabiliseringsmedel är en vanlig metod som blir allt mer populär. Även om markstabilisering med bindemedel har utförts sedan ca 5000 år tillbaka i tiden började det att användas som begrepp och utföras i kommersiell skala i början av 1900-talet (Firoozi et al., 2017). I Sverige har markstabilisering med bindemedel utförts sedan 1960-talet (Lindh, 2009).

Det dominerande området för markstabilisering med bindemedel är grundförstärkning för byggnation av väg- och järnvägsbankar. Stabilisering för broar, mindre byggnader och övrig infrastruktur förekommer också. Erfarenheten är därför störst inom dessa tillämpningsområden. I den studerade litteraturen förekommer även exempel på andra användningsområden som inte kräver lika höga hållfastheter som exempelvis stabilisering av schaktmassor för ökad hanterbarhet eller stabilisering av muddermassor för att använda som utfyllnadsmaterial. Andra syften med att blanda in bindemedel i jorden (utöver att öka hållfastheten) kan vara att minska sättningar, begränsa markföroreningar och att dämpa vibrationer (används t.ex. i Japan för att minska jordbävningvibrationer) (Holm, 2006).

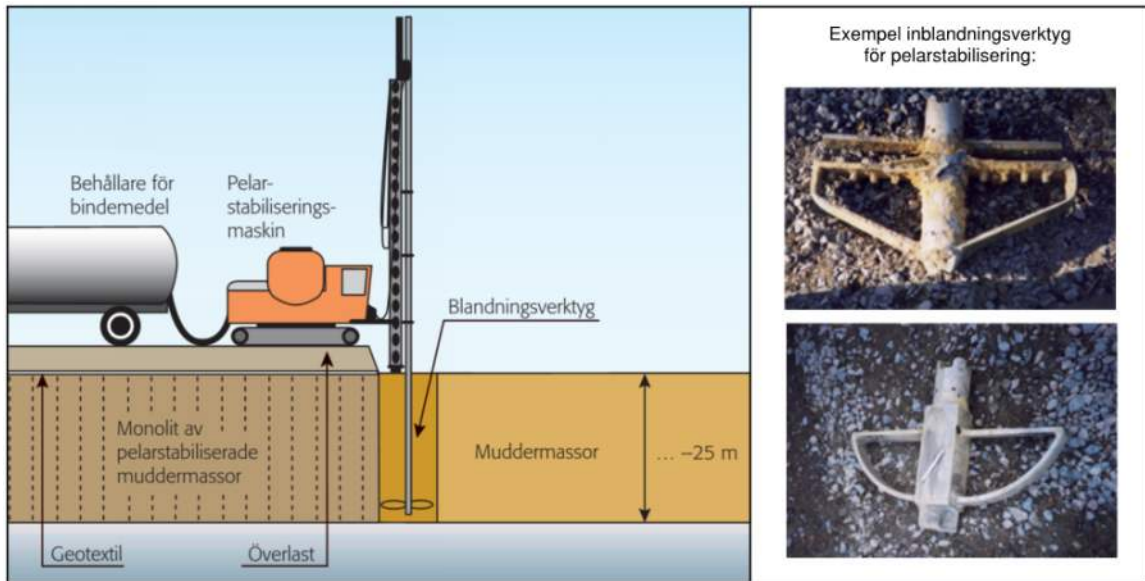
Denna litteraturstudie omfattar olika stabiliseringsmetoder samt olika bindemedel. Litteraturstudien baseras främst på den erfarenhet som finns inom Sverige (och Norden) men exempel från övriga världen har också studerats.

4.1 Metoder för markstabilisering med bindemedel

Metoder för att stabilisera lösa jordar med bindemedel omfattar bl.a. pelarstabilisering, masstabilisering och processtabilisering. Pelarstabilisering och masstabilisering ingår även i samlingsnamnet djupstabilisering: dessa metoder blandar in bindemedel direkt i marken medan processtabilisering sker ovan mark. I avsnitten nedan förklaras respektive metod mer ingående.

4.1.1 Pelarstabilisering

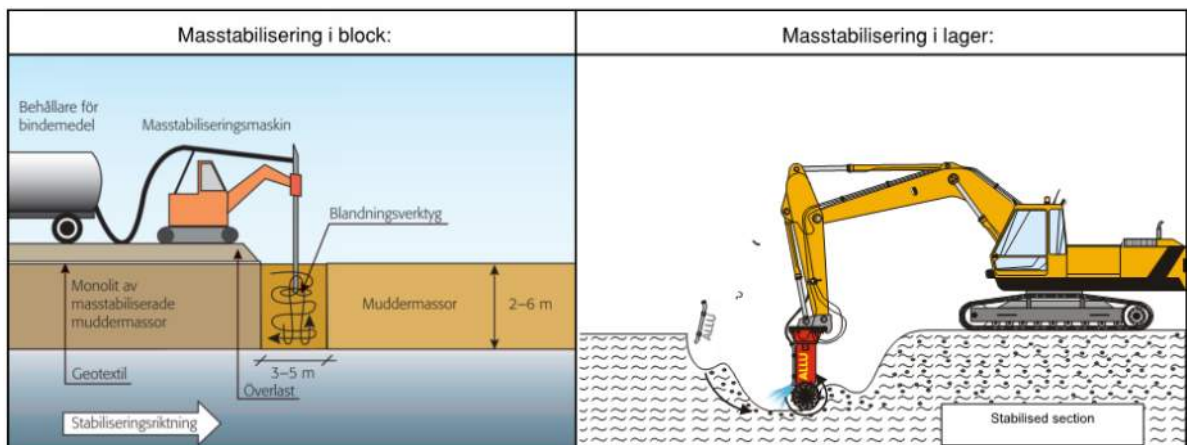
Pelare skapas genom att inblandningsverktyget ”blåser” ut bindemedel samtidigt som verktyget roterar och rörs vertikalt i jorden. Pelarna installeras i mönster över det område som skall stabiliseras. Pelarstabilisering lämpar sig för områden med stora djup. För vanligt förekommande installationsriggar kan pelare upp till 25 m djup utföras (SGI, 2011). För större riggar kan pelare upp till 40 m djup utföras (EuroSoilStab, 2002). För illustration av pelarstabilisering se Figur 4-1.



Figur 4-1 Princip pelarstabilisering och exempel inblandningsverktyg (SGI, 2011; EC 2002).

4.1.2 Masstabilisering

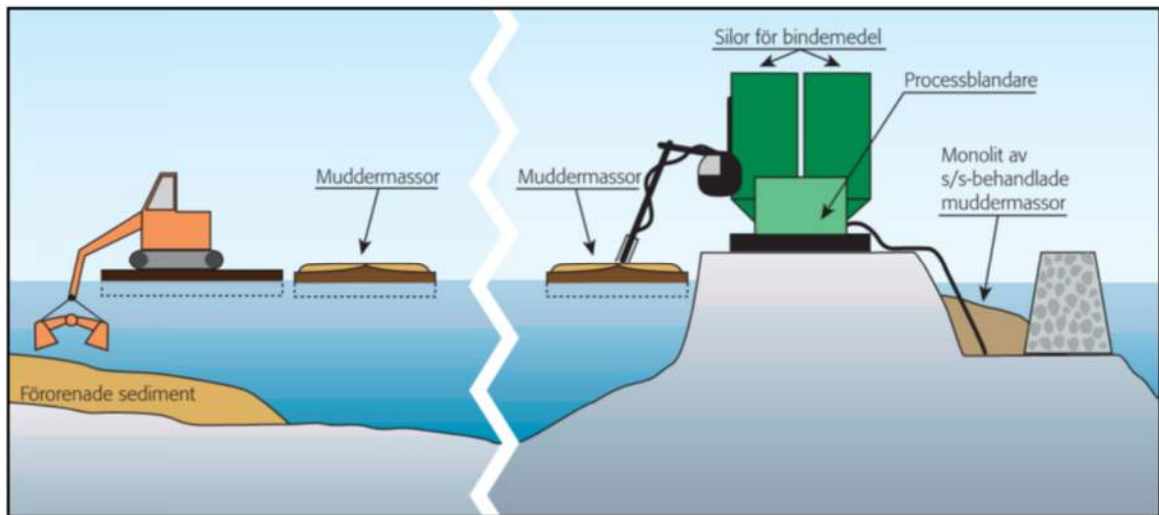
Vid masstabilisering rörs blandningsverktyget i både horisontell och vertikal riktning och skapar block-/lagervis en stabiliserad jordvolym. För lösa jordar sker stabiliseringen blockvis och då jorden är tillräckligt fast sker stabiliseringen i lager (ALLU & Ramboll, 2007). Masstabilisering lämpar sig för relativt små områden som inte kräver stabilisering på stort djup. Med dagens utrustning kan masstabilisering utföras till ett djup av ca 5 m (NVF, 2007). Inblandningsverktygen för masstabilisering kan se olika ut men samtliga går oftast att montera på en grävmaskinsarm. För illustration av masstabilisering, se Figur 4-2.



Figur 4-2 Princip masstabilisering (SGI, 2011; EC, 2002).

4.1.3 Processtabilisering

Till skillnad från pelar- och masstabilisering stabiliseras jorden inte direkt på plats vid processtabilisering. Vid processtabilisering tas den jordvolym som skall stabiliseras upp och blandas med bindemedel i ett kärl och förs sedan tillbaka till önskad plats. Vid processtabilisering kan bindemedelskomponenterna tillsättas var för sig vilket möjliggör en optimering av bindemedelsmängden. Genom processtabilisering skapas möjlighet att ge en mer kontrollerad och homogen jordvolym än genom pelar- och masstabilisering. För illustration och exempel av processtabilisering, se Figur 4-3 och Figur 4-4.



Figur 4-3 Princip processtabilisering (SGI, 2011).



Figur 4-4 Exempel på inblandningsstation för processtabilisering i Åbo (Lagerlund et al., 2010).

4.2 Bindemedel för markstabilisering

Traditionellt sett används en blandning av bränd kalk och cement för markstabilisering: ju finkornigare jorden är, desto större andel kalk består oftast bindemedlet av (Firoozi et al., 2017). Generellt kan man säga att cementen bidrar med snabb hållfasthetstillväxt och att kalken bidrar med att få en samverkan med den omgivande jorden (Åhnberg et al., 1995). Inblandning av diverse biprodukter (aska och slagg) har blivit vanligare på senare tid, huvudsakligen för att minska miljöbelastningen (Janz & Johansson, 2002). Exempel på biprodukter som används är flygaska, bioaska och masugnsslagg. Det dessa biprodukter (från förbränning) har gemensamt är att de innehåller stor andel kiseloxider och aluminiumoxider vilket vid inblandning med cement (eller bränd kalk) och markvatten påskyndar cementeringen. Exempel på sammansättning av ämnen i bindemedel visas i Tabell 4-1. För en mer ingående förklaring av hur jorden reagerar med bindemedlen som baseras på bränd kalk/cement, se avsnitt 4.3.

Tabell 4-1 Ungefärlig sammansättning av ämnen för bindemedel (Button, 2003; Merox, 2015; Åhnberg et al., 1995)

Beståndsdelar	Portlandcement	Bränd kalk	CKD	Merit
CaO	63,1 %	95,0 %	47,6 %	30,0 %
SiO ₂	20,5 %	2,2 %	16,5 %	34,0 %
MgO	4,0 %	1,5 %	2,3 %	16,5 %
Al ₂ O ₃	4,5 %	1,0 %	4,4 %	13,0 %
Na ₂ O	0,3 %	0,2 %	0,8 %	-
Fe ₂ O ₃	2,3 %	0,5 %	2,7 %	-
FeO	-	-	-	0,5 %
MnO	-	-	-	0,6 %
S	-	-	-	1,5 %
SO ₃	3,1 %	0,04 %	7,1 %	-
K ₂ O	1,4 %	0,2 %	5,5 %	-
LOI	-	-	16,0 %	-
TiO ₂	-	-	-	2,3 %

Även andra bindemedel som inte härstammar från förbränning har testats för markstabilisering, t.ex. träflis, stålflis, svamp, asfalt, polymerer, geopolimerer och geosyntetiska korta fibrer m.m., dock har inte dessa studerade tillämpningar fungerat väl i lerjordar. (Al-Refeai & Al-Karni, 1999; Preetham et al., 2019). En förklaring till varför bindemedel som inte innehåller cement/bränd kalk/puzzolaner inte fungerar så bra i lera kan vara att det tillförda materialet inte hårdnar samt ökar den hydrauliska konduktiviteten i leran. Det tillförda materialet bidrar endast med hållfasthet genom att fungera som fyllnadsmaterial.

Ett område som också berörs i den studerade litteraturen är användning av slagg/aska från avfallsförbränning, något som har stor potential då det exempelvis i Sverige 2014 genererades 1 miljon ton slagg från industri- och hushållsavfall (Naturvårdsverket, 2016). Nackdelen med bindemedel från avfallsförbränning kan vara att det är svårt att veta vilka ämnen bindemedlet består av, vilket kan leda till föroreningar i marken eller oönskade egenskaper hos den stabiliserade jorden.

4.2.1 Merit

Merit är ett bindemedel som tillverkas genom att mala granulerad masugnsslagg. Internationellt kallas motsvarande bindemedel för GGBS vilket står för Ground Granulatet Blast furnace Slag. Masugnsslaggen är biprodukt från råjärnstillverkning och är i princip omsmält berg. Granuleringen är processen där masugnsslagget kyls av med vatten (våtgranulering) vilket bildar hyttsten eller hyttsand beroende på hur snabbt avsvälningen sker. Den granulerade slaggen mals sedan för att få Merit. Masugnsslaggen (och således även hyttsten/Merit) består framförallt av oxider, bl.a. kalcium- och kiseloxid. Ungefärlig sammansättning av ämnen i Merit visas i Tabell 4-1.

Merit är ett produktnamn och tillverkas samt säljs av SWECEM (SWECEM, 2021). Produkten utvecklades av Merox som arbetade för att nyttiggöra biprodukter från SSAB EMEA (stålproducent). För att få perspektiv så står SSAB för 10 % av Sveriges CO₂-utsläpp och tillverkar ca 4 miljoner ton råstålsprodukter i Sverige vilket genererar ca 0,3 miljoner ton masugnsslagg per år (SSAB, 2020; SSAB EMEA AB, 2020). Då Merit är en biprodukt är det gynnsammare ur miljösynpunkt att använda än att använda cement. Tillverkning av 1 ton Merit motsvarar 20–40 kg CO₂-ekvivalenter medan 1 ton cement motsvarar 600–700 kg CO₂-ekvivalenter (SWECEM, 2021; Cementa, 2021).

Merit används huvudsakligen i betong men har också använts i markstabiliseringsprojekt i Sverige. Vid markstabilisering används Merit i kombination med vanlig cement (klass 1 eller 2).

4.2.2 CKD

CKD är en biprodukt från cementtillverkning och står för Cement Kiln Dust. CKD utgörs av stoft som samlas upp i de filter som fångar upp rökgas från roterugnen (från förbränning av kalkstensmjöl och lera/sand). Uppskattningsvis blir ca 10 % av råmaterialet vid cementtillverkning till CKD (Al-Karni & Al-Refeai, 1999). Exempel på kemisk sammansättning för CKD syns i Tabell 4-1.

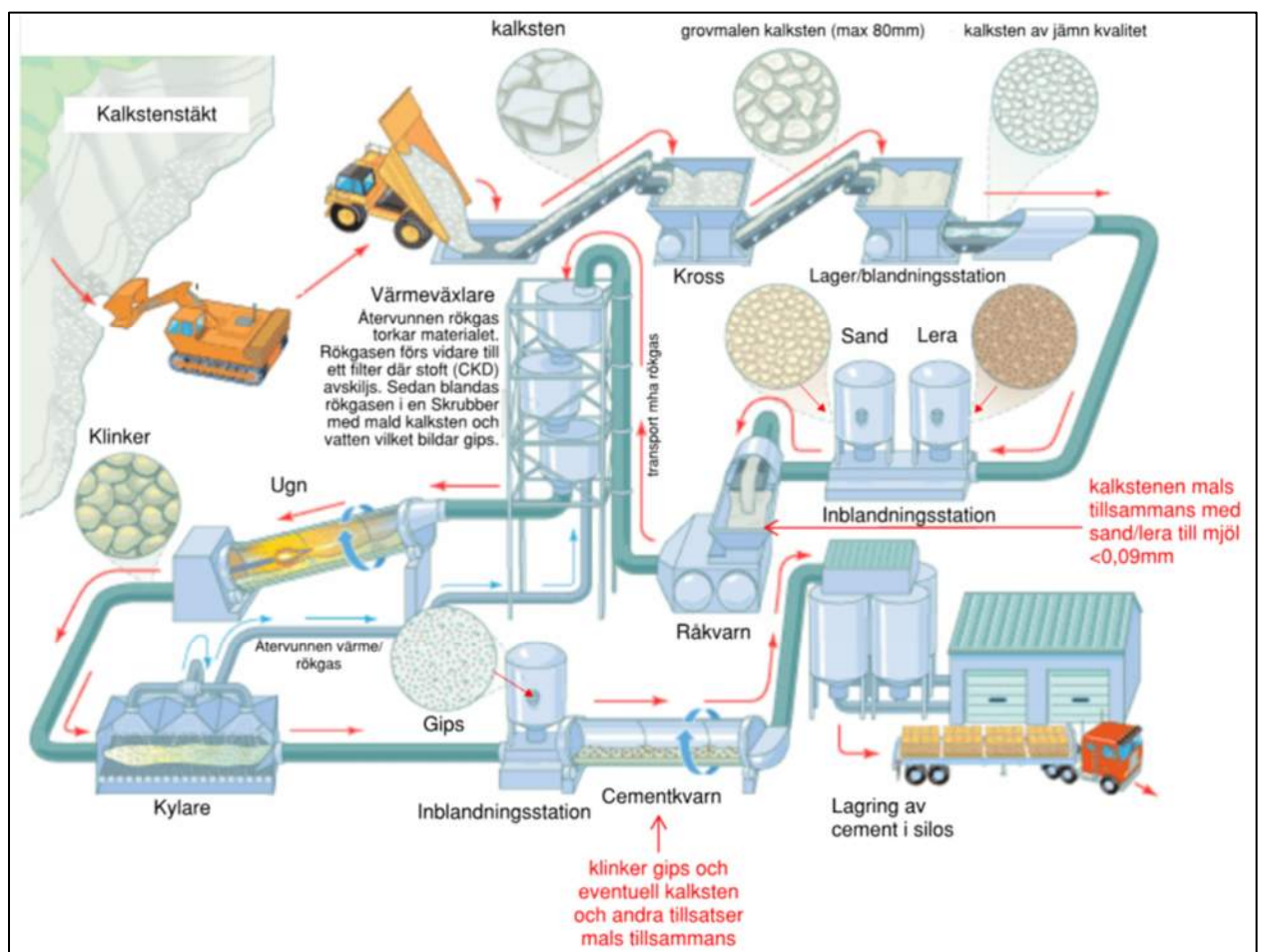
På svenska marknaden är multicement en mer känd produkt än CKD. Multicement (MC) är en blandning av CKD och cement, och har använts av Cementa sedan 2015 (Cementa, 2015). I Norge har MC använts sedan åtminstone 2005 i bl.a. infrastrukturprojekt med Jernbaneverket och Vegvesendet. MC används idag till markstabilisering och som bindemedel i asfalt. Vid markstabilisering är tanken att MC skall kunna vara ett alternativ till KC (samma inblandningsmängd för samma resultat). Erfarenhet från användning av MC är att hållfasthetsutvecklingen sker långsammare, varför något högre inblandningsmängd ofta används i jämförelse med KC. Jämfört med att stabilisera med KC sparas ca 500 kg CO₂-ekvivalenter per ton bindemedel (Cementa, 2015).

4.3 Kemiska reaktioner vid stabilisering av lera med cement/kalkstensbaserade bindemedel

Som nämnts i föregående kapitel används oftast bränd (osläckt) kalk och cement i olika proportioner vid stabilisering. Detta kapitel syftar till att förtydliga begreppet cement samt förklara varför stabilisering av lera med bränd kalk/cement fungerar.

4.3.1 Cement

Cement består huvudsakligen av bränd kalk och lera/sand. Figur 4-5 visar principen för hur cement framställs. Begreppet cement i sin tur innebär oftast portlandcement (Janz & Johansson, 2002; Burström, 2007). Portlandcement består av portlandklinker (95 %) och gips (5 %). Portlandklinker består vanligen av bränd lera och kalksten, men andra tillsatser förekommer också. Enligt svensk standard finns 5 olika cementklasser, varav de två första är vanligast att använda (Janz & Johansson, 2002). Typ 1 är ren portlandcement medan typ 2-cement innehåller minst 65 % portlandklinker (Burström, 2007). Cementtyp 3 innehåller mellan 20–65 % portlandklinker och resten utgörs av masugnsslagg (Burström, 2007). Exempel på typ 1 cement är SH-cement och anläggningcement. Exempel på typ 2-cement är byggcement som utöver portlandcement innehåller 15 % kalkstensfiller (CaCO_3).



Figur 4-5 Exempel på cementtillverkning (Skapad m.h.a. Burström, 2007; Cementa, 2021; Mason & Lea, 2021).

4.3.2 Kemiska reaktioner

Följande reaktioner spelar en avgörande roll för att stabilisering med kalkstensbaserade bindemedel ska vara möjligt:

Bränd kalk:



När kalkstensmjöl värms i roterugnen skapas kalciumoxid och koldioxid. Ju mer koldioxid som drivs ut, desto högre bränningsgrad säger man att den brända kalken har. Bränd kalk är samma sak som osläckt kalk.

Släckt kalk:



När den brända kalken blandas med markvattnet bildas kalciumhydroxid. Denna reaktion avger värme och höjer markens pH. Denna reaktion ger ökad hållfasthet då vatten åtgår men när marken blir fuktig på nytt försämras dock effekten.

Puzzolan reaktion:



Högerledet av reaktionen har förkortats enligt:

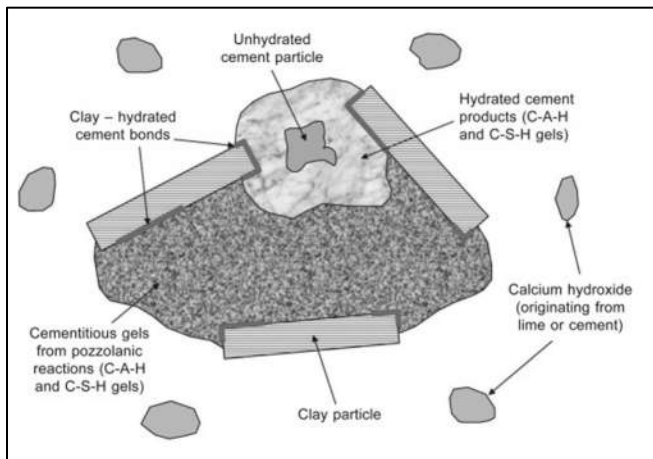
C=CaO, S=SiO₂, A=Al₂O₃ & H=H₂O, notera att molförhållandet mellan C, S, A och H varierar.

För att skapa cementering med lera måste puzzolan reaktion ske (Johansson et al., 2006). En puzzolan är ett material/ämne som själv inte har cementerande egenskaper men i närvaro av vatten reagerar med kalciumhydroxid (under normal temperatur) och bildar föreningar med cementerande egenskaper (Mehta, 1987). Puzzolaner utgörs främst av silikater och aluminater (kisel- och aluminiumoxider). Puzzolaner finns naturligt i många marker, speciellt i lera och silt, men kan tillsättas vid stabilisering om det skulle saknas eller behövas mer. Exempel på vanligen tillsatta puzzolaner är flygaska och kiselstoft.

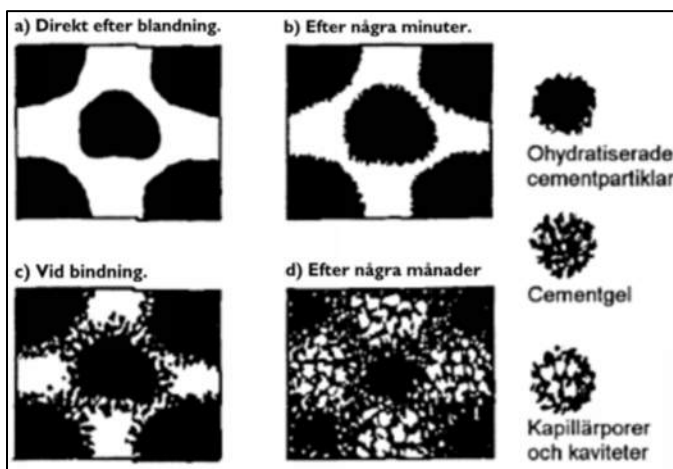
Stabilisering av lera i helhet

När kalkstensbaserade bindemedel (bränd kalk eller cement) blandas in i jorden sker omedelbart ett jonbyte mellan bindemedlets Ca²⁺-joner och lerans katjoner (ofta Na⁺ och K⁺). Detta leder till flockulering kring lerpartiklarna som ökar den effektiva partikelstorleken vilket i sin tur ökar hållfastheten (Firoozi et al., 2017).

Den höga koncentrationen av kalciumhydroxid ökar jordens pH vilket frigör silikater och aluminater från lera som sedan reagerar med kalciumhydroxid och vatten. Detta bildar kalciumsilikathydrat och/eller kalciumaluminathydrat, så kallad cementgel (CSH/CAH/CASH) vilket gradvis minskar porositeten och cementerar ihop lerpartiklarna (Åhnberg et al., 1995). För illustration, se Figur 4-6 och Figur 4-7.



Figur 4-6 Cementering av lerpartiklar med kalkstensbaserat bindemedel (Sargent, 2015).

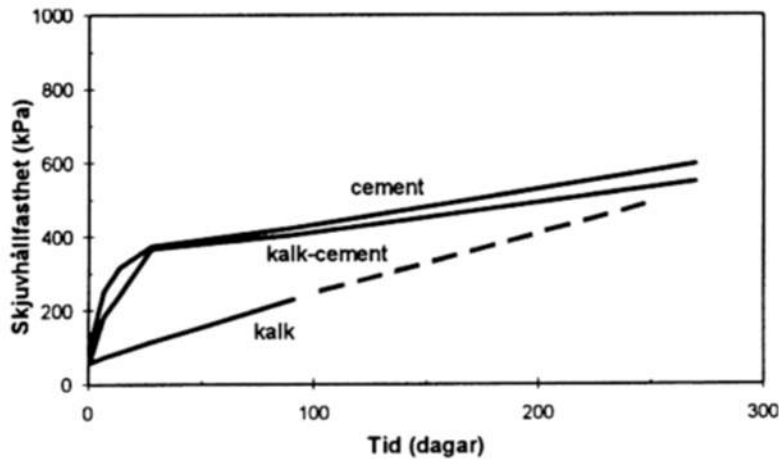


Figur 4-7 Strukturutveckling vid cementering (Burström, 2007).

Bildningen av kalciumsilikathydrat och kalciumaluminathydrat sker efter att cementen, jorden och markvattnet har blandats och pågår så länge dessa substanser finns kvar. Reaktionerna pågår över lång tid, månader till år. Bindemedel kan blandas i jorden både i torr och blöt form, vanligen torr för att inte tillföra mer vatten in i marken.

Reaktionshastigheten bestäms av förhållandet av bränd kalk och kiseloxid/aluminiumoxid samt hur stor del av lerpartiklarnas yta som är exponerad mot vatten: ju mindre partiklar desto större specifik yta, vilket ger snabbare reaktion.

Inblandning av endast bränd kalk har möjlighet att tillföra fler reaktanter än vad inblandning av cement gör, vilket innebär att för jordar med höga halter puzzolaner kan inblandning av endast bränd kalk ge en högre hållfasthet i slutändan. Puzzolana reaktioner sker dock långsamt. För snabbare hållfasthetstillväxt är därför cement bättre då det ökar mängden $\text{Ca}(\text{OH})_2$ som är i kontakt med puzzolaner. För illustration av hållfasthetsutveckling beroende på förhållande mellan kalk och cement, se Figur 4-8.



Figur 4-8 Hållfasthetsutveckling beroende på förhållande mellan kalk och cement (Åhnberg et al., 1995).

4.4 Erfarenheter från stabilisering i Sverige

Detta avsnitt sammanfattar erfarenheter av stabilisering i Sverige. För att få en uppfattning om vilka bindemedel som ger effekt och hur stor andel bindemedel som krävs har ett antal studier och projekt i Sverige studerats. De studier som har legat till grund för bedömning av bindemedelsmängder för laborationen presenteras i Tabell 4-22 och Tabell 4-33.

Vanligaste stabiliseringsmedlet för markstabilisering är blandning av bränd kalk och cement, ofta 50/50 (Larsson, 2011; Edstam, 1997). För lös lera behövs vanligen mellan 80 och 110 kg/m³, vilket för en lera med densitet på 1,5 ton/m³, motsvarar 5,3–7,3 viktprocent. Om jorden har hög halt organiskt innehåll behövs mer stabiliseringsmedel: enligt omfattande studie på stabilisering av torv (Pousette, 2001) behövs 150–300 kg/m³. Tabell 4-2 kommer från Larsson (2011) och redovisar vanliga bindemedelsmängder för de, i Sverige, mest använda bindemedlen för att djupstabilisera olika jordar. För pelarstabilisering uppnår man normalt sett i Sverige en hållfasthet på 150–300 kPa (Holm, 2006).

Tabell 4-2 Vanliga bindemedelsmängder för djupstabilisering i svenska jordar (Holm, 2006)

Typ av jord	Bindemedel	Bindemedelsmängd kg/m ³	Anmärkning
Lera	Kalk, kalk/cement	70–90, 80–110	
Lera med siltskikt/siltig lera	Kalk, kalk/cement	70–90, 80–110	Hög cementandel vid högt siltinnehåll
Gyttig lera	Kalk/cement, cement/slagg	100–200	Långsam reaktion
Gyttja	Cement, kalk/cement, cement/slagg	120–250	Långsam reaktion
Torv	Cement, cement/slagg	150–>300	
Sulfidhaltig lera och sulfidsilt	(Cement, kalk/cement, cement slagg) ¹⁾	120–250	Ofta långsam reaktion
Silt	Cement, cement/slagg	Liten erfarenhet	

1) Effekten varierar kraftigt mellan olika jordlager av denna typ.

Tabell 4-3 Sammanställning av resultat från undersökningar/projekt där stabilisering skett med bindemedel. OBS tabellen visar endast ett urval av resultat från listade studier som ansågs aktuella för detta projekt

Projekt/Rapport	Bindemedel	Beståndsdelar	Stabiliseringsmetod	Jord och egenskaper	Mängd Bindemedel	Uppnådd hållfasthet	Metod bestämning hållfasthet
Projekt Barkabystaden, uppgifter från Skanska Teknik	MC	portlandcement/ CKD 50/50	pelare	Lera c_u 10–30 kPa w_N 40–60 % ρ 1,7–1,8 t/m ³	80–120 kg/m ³	100–200 kPa efter 1 vecka-	FTPS- sondering
Forskningsrapport <i>Stabilisering torv- fältförsök och laboratoriestudier</i>	C Masugnsslagg	portlandcement/ hyttesten* 40/60	Blandas i lab.*	Torv w_N 650–940 %	200 kg/m ³	28–65 kPa efter 1 månad	Enaxligt tryckförsök
SBUF rapport <i>Fältförsök med stabiliserande muddermassor</i>	C Masugnsslagg Aska	portlandcement/ merit 5000/ aska 40/20/40	Processtab.	Lera (muddrad) c_u 10 kPa w_N 300–900 %	150 kg/m ³	ca 15 kPa på 1 månad	Enaxligt tryckförsök samt CPT
SBUF rapport Provnings av K/C- djupstabilisering med seismisk CPT	KC	kalk/cement 50/50	Blandas i lab.	Lera c_u 5–15 kPa w_N 40–100 % ρ 1,5–1,7 t/m ³	80–120 kg/m ³	ca 100 kPa efter 1 vecka och 200 kPa efter 1 månad	Enaxligt tryckförsök
SGI rapport 48 <i>Cement och kalk för djupstabilisering av jord</i>	KC	kalk/cement 25/75	Blandas i lab.	Lera, c_u 15 kPa w_N 80 % ρ 1,55 t/m ³	50–140 kg/m ³	30–50 kPa efter 1 dygn, 50–200 kPa efter 1 vecka	Enaxligt tryckförsök
SGI Varia 590 <i>Kalkrik aska som bindemedel i markstabilisering</i>	KC	kalk/cement 50/50	Blandas i lab.	Lera, w_N 95 % ρ 1,5 t/m ³	90–110 kg/m ³	75–125 kPa på 1 vecka	Enaxligt tryckförsök
	KC Aska	kalk/cement/aska** 40/40/20				60–100 kPa på 1 vecka	

* Provnings belastas med 40 kPa under härdningstiden

** Aska från förbränt fiberslam från Lilla Edet, produkt kallas Terra E

Utöver bindemedelstyp och bindemedelsmängd påverkar även andra faktorer hållfasthetsutvecklingen, t.ex.:

- Temperatur vid härdning (värme påskyndar reaktion, eventuell nedfrysning → hållfasthet tappas)
- Tid
- Jordens egenskaper
 - Vattenkvot (flera rapporter pekar på att lera med lägre vattenkvoter, ca 25 %, har högre stabiliseringspotential än de med högre vattenkvot, ca 100 % (Edstam, 1997). Noterbart är dock att undersökningar visar på omvänt förhållande vid stabilisering av torv (Axelsson et al., 2000)
 - Ursprunglig hållfasthet
 - Humifieringsgrad (torv)
 - Organisk halt
 - Kemisk sammansättning (t.ex. närvaro av salt och metaller)
 - Homogenitet
- Inblandningsteknik
 - Tid
 - Effekt
 - Blandningsverktygets utformning
 - Jordvolym som skall stabiliseras (större provvolym → lägre hållfasthet)
- Grovkornighet hos stabiliseringsmedel (fin=mer reaktiv yta, dock större risk för klumpar)
- Belastning under härdning

5 RESULTAT LABORATION

Nedan redovisas ett urval av resultat från laboratorieförsök. Försöken är i första hand utförda på lera från Pilekrogen, men även försök på Ringölera redovisas. Fullständiga laboratorieresultat redovisas i Bilaga 1.

5.1 Hållfasthetsutveckling

I Diagram 5-1 presenteras resultat från Pilekrogen och i Diagram 5-2 redovisas resultat från Ringön. För respektive bindemedel redovisas de två försöksserierna som generellt sett ligger närmast 30 kPa.

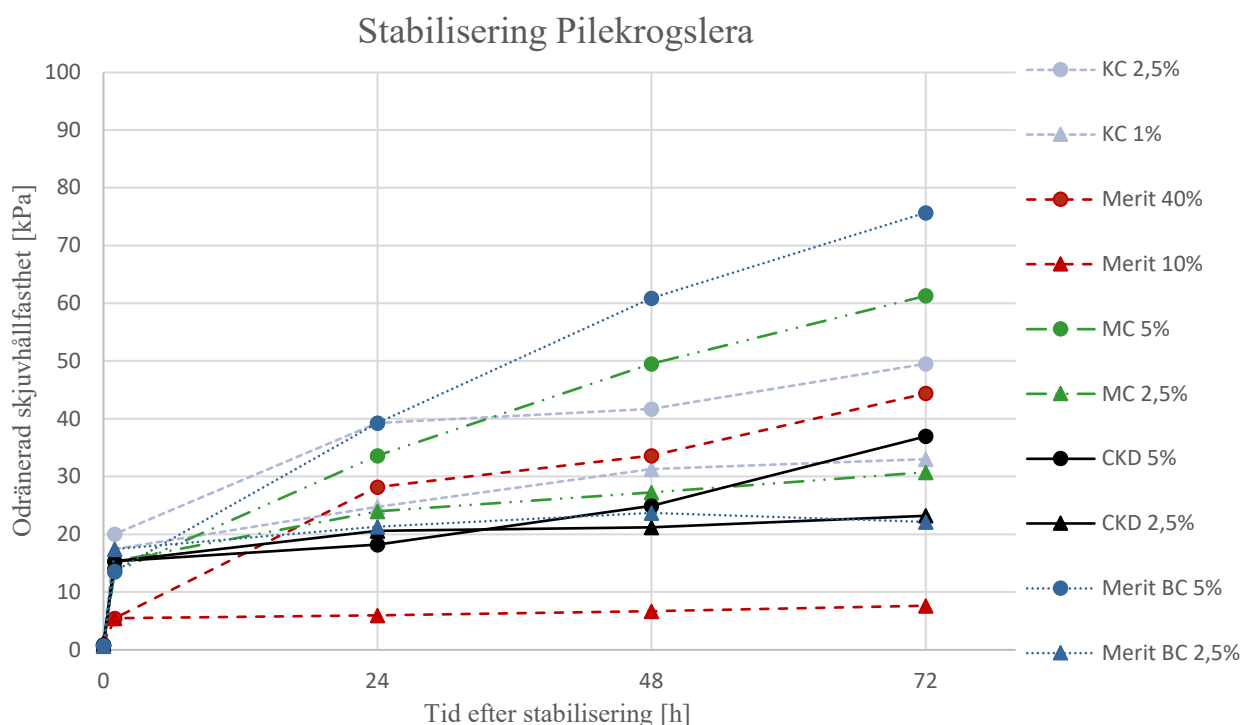


Diagram 5-1 Hållfasthetsutveckling för urval av prover från Pilekrogen.

Utifrån resultat redovisat i Diagram 5-1, krävs ca 2,5 viktprocent bindemedel för att öka hållfastheten till 30 kPa inom 72 h, med undantag för Merit (ca 20 viktprocent) och KC (ca 1 viktprocent). Det krävs alltså betydligt större massprocent Merit för att öka hållfastheten än de övriga stabiliseringsmedlen. Dock är Merit det enda bindemedlet som inte har sitt ursprung ur cementproduktion, vilket kan ge fördel ur hållbarhetssynpunkt trots att större mängd krävs. I övrigt ger Merit i kombination med byggcement en något högre hållfasthet än MC (CKD+byggcement) för inblandningsmängd på 5 %, för inblandningsmängden 2,5 % är det tvärtom.

Stabilisering Ringölera

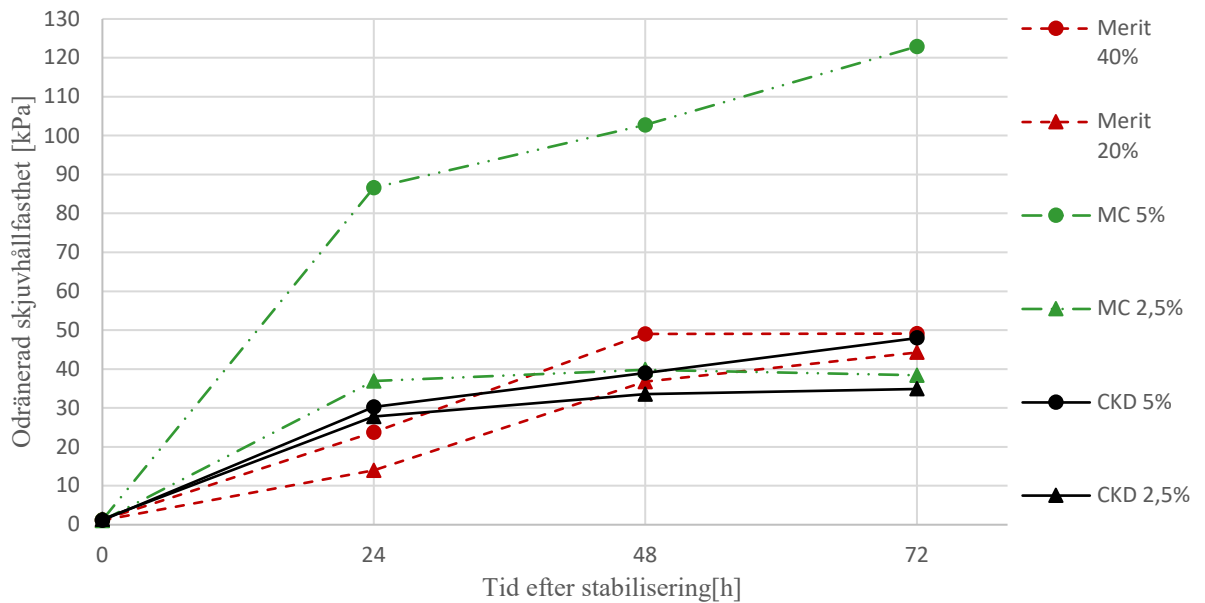


Diagram 5-2 Hållfasthetsutveckling för urval av prover från Ringön.

De testade bindemedlen visar samma trend på hållfasthetsutvecklingen på Ringöleran som för Pilekrogleran. Hållfasthetsutvecklingen för Ringöleran går snabbare och kommer upp i en högre hållfasthet efter 72 h än vad Pilekrogleran gör vid samma inblandningsmängder. Efter 24 h har MC och CKD en hållfasthet över 30 kPa.

5.2 Hållfasthet av störd stabiliserad lera

I ett verkligt scenario kommer den stabiliserade leran förmodligen att behöva störas igen, t.ex. flyttas med grävmaskin. För att få uppfattning om hur mycket hållfasthet den stabiliserade leran tappar vid en sekundär störning utfördes konförsök på lera som rörts om då det gått 72 h efter stabiliseringen. I Tabell 5-1 och Tabell 5-2 redovisas resultat för minskning av odränerad skjuvhållfasthet efter störning av den stabiliserade leran.

Tabell 5-1 Hållfasthet efter störning av stabiliserad Pilekrogleran

Pilekrogen	c_u [kPa] störd efter 72 h stabilisering	Minskning c_u	Ökning c_u
		störd efter stab. vs. 72 h efter stab.	störd efter stab. vs. störd innan stab.
KC 1 %	33,0	0 %	3452 %
Merit 10 %	2,9	62 %	121 %
MC 2,5 %	8,9	71 %	241 %
MC 1 %	3,5	71 %	972 %
CKD 5 %	14,2	62 %	382 %
CKD 2,5 %	9,8	58 %	871 %
CKD 1 %	4,5	64 %	1537 %
Merit BC 10 %	66,2	71 %	1116 %
Merit BC 5 %	18,4	76 %	2291 %
Merit BC 2,5 %	7,5	66 %	8724 %

Tabell 5-2 Hållfasthet efter störning av stabiliserad Ringölera

Ringön	c_u [kPa] störd efter 72 h stabilisering	Minskning c_u	Ökning c_u
		störd efter stab. vs. 72 h efter stab.	störd efter stab. vs. störd innan stab.
Merit 40 %	29,2	41 %	2252 %
Merit 20 %	39,2	11 %	3312 %
MC 5 %	82,4	33 %	6547 %
MC 2,5 %	22,9	40 %	2037 %
CKD 5 %	26,5	45 %	2200 %
CKD 2,5 %	15,1	57 %	974 %

Pilekrogsleran tappar ca 60–80 % av hållfastheten från stabiliseringen då den störs medan Ringölera tappar ca 10–60 % av hållfastheten. Även om hållfastheten minskar vid omrörning så är fortfarande en betydande del kvar. Av redovisade försök från Pilekrogen uppnår 20 % en hållfasthet över 30 kPa efter störning. För de redovisade försöken från Ringön är motsvarande siffra 66 %. För att säkerställa önskad effekt av stabilisering måste eventuell störning efter stabiliseringen beaktas, vilket kan öka erfordrad inblandningsmängd.

5.3 Förändring av vattenkvot

En förutsättning för att stabiliseringen skall bli effektiv i längden och kunna motstå uppluckring av nederbörd är att vatten åtgår i reaktionen mellan bindemedel och lera. För att kunna avgöra om vatten åtgått jämförs vattenkvoten innan och efter stabilisering. I Tabell 5-3 och Tabell 5-4 redovisas resultat för förändringen av vattenkvot innan stabilisering och 72 h efter stabilisering.

Tabell 5-3 Förändring vattenkvot efter 72h för Pilekrogsleran

Pilekrogen	Vattenkvot innan stabilisering	Vattenkvot efter 72h	Minskning vattenkvot
KC 1 %	77,0 %	53,4 %	31 %
Merit 10 %	68,1 %	52,6 %	23 %
MC 2,5 %	106,1 %	93,5 %	12 %
MC 1 %	105,8 %	97,2 %	8 %
CKD 5 %	81,3 %	67,7 %	17 %
CKD 2,5 %	81,1 %	72,3 %	11 %
CKD 1 %	98,1 %	88,5 %	10 %
Merit BC 10 %	93,3 %	79,3 %	15 %
Merit BC 5 %	101,8 %	89,1 %	12 %
Merit BC 2,5 %	88,7 %	81,5 %	8 %

Tabell 5-4 Förändring vattenkvot efter 72h för Ringöleran

Ringön	Vattenkvot innan stabilisering	Vattenkvot efter 72h	Minskning vattenkvot
Merit 60 %	84,6 %	37,9 %	55 %
Merit 40 %	84,4 %	46,0 %	45 %
Merit 20 %	83,4 %	57,0 %	32 %
MC 5 %	75,3 %	64,0 %	15 %
MC 2,5 %	80,8 %	66,2 %	18 %
MC 1 %	66,0 %	66,2 %	0 %
CKD 5 %	79,7 %	70,1 %	12 %
CKD 2,5 %	79,7 %	72,3 %	9 %
CKD 1 %	75,5 %	67,8 %	10 %

Jämförelsen av vattenkvoter innan respektive efter stabilisering visar att för de flesta försöken har vattenkvoten minskat. Vattnet sugs alltså inte bara upp av det tillsatta bindemedlet. Undantaget är inblandningen MC 1 % för Ringöleran, detta kan bero på att bindemedelsmängden är så pass liten att reaktionen blir långsammare alternativt inte märks av.

6 KALKYLEXEMPEL

För att få en uppfattning om stabilisering med bindemedel är lönsamt för att öka hanterbarhet av schaktmassor och/eller kunna använda dessa som utfyllnadsmaterial har en beräkningskalkyl utförts. Kalkylen har utförts för två extremfall: antingen att all lera inom projektet deponeras eller att all lera kan användas som utfyllnadsmaterial inom projektet. Vidare antas leran vara för lös för att transporteras med lastbil utan stabilisering, varför kalkylen omfattar 3 olika alternativ:

1. All lera deponeras, transport med sugbil
2. All lera stabiliseras och deponeras, transport med lastbil
3. All lera stabiliseras och används inom projektet

Det skall påpekas att lastbilar används för att transportera lös lera men att flakutrymmet ej fylls, dock är vanliga lastbilar egentligen inte dugliga för att transportera så pass lös lera. Detta då det innebär trafikfara att lasta väldigt lös lera då leran kommer skvätta ut vid inbromsning oavsett hur mycket flaket lastas.

Kalkylen baseras på ett fiktivt projekt som skall representera ett större projekt i Göteborg. För kalkylen har arbetsplatsen antagits vara lokaliserad vid Sisjömotet och använd deponi har antagits vara Samgrävs deponi i Härryda. Leran antas ha liknande egenskaper som den testade leran och antagen densitet är 1,5 ton/m³. Volym lera som skall schaktas har satts till 15 000 m³ (22 500 ton). Då leran deponeras ersätts den med krossad betong från återvinningsanläggning i Skogome.

Vidare antas att 30 kPa är tillräckligt för att uppnå hanterbarhet/potential som icke bärande fyllnadsmaterial. Den stabiliserade leran ska heller inte tappa all hållfasthet då den störs igen (t.ex. på lastbilsflak). Utifrån resultatdelen bedöms CKD 5 % vara det bästa alternativet ihop med kostnad, tillgänglighet och utsläpp av CO₂-ekvivalenter.

Idag låses ofta deponiavgiften efter uppskattad schaktmängd och konsistensklass men det kan tillkomma avgifter som blöttillägg. Det finns också tilläggskostnader för farligt och inert avfall. Det finns inget skrivet om hur bedömning av konsistensklass skall ske utan är erfarenhet som överförs muntligt. Bedömning sker hos projektet via okulär besiktning med stöd av geoteknisk undersökning. I Tabell 6-1 redovisas de olika konsistensklasser och dess deponiavgifter/kriterier som använts i denna kostnadskalkyl. Observera att deponiavgiften endast är ett exempel. För kalkylen har det antagits att vi från början har blöta massor och genom stabilisering kan få staplingsbara massor. Tilläggskostnader för farligt/inert avfall inkluderas inte.

Tabell 6-1 Använda konsistensklasser , deponiavgifter och kriterier

Konsistensklass	Deponiavgift*	Kriterier
Muddermassor alt. borrhslam	250 kr/ton	Om schakt utförs under vatten klassas schaktmassorna som muddermassor
Blöta massor	110 kr/ton	Lera under torrskorpan brukar klassas som blöt massa, en annan tumregel är om $w_N > 30\%$
Staplingsbara massor	70 kr/ton	Staplingsbar massa om den går att lägga i en 1 m hög med lutning 1:1 som står av sig själv, t.ex. uppblött torrskorpa
Torra massor	70 kr/ton	Torr massa

*Varierar beroende på mängd/kvalitet schaktmassa och deponi. Baserat på avgifter från Samgrävs deponi 2021.

Stabiliseringsmetoden som valts för kostnads kalkylen är processtabilisering då denna bäst reflekterar förhållanden i laboratoriet.

Kalkylen omfattar kostnader i SEK och utsläpp av CO₂-ekvivalenter och tar hänsyn till:

- Transport till och från deponi
- Deponikostnad
- Transport av bindemedel och fyllnadsmaterial till arbetsplats
- Uppschaktning
- Hantering schaktmassor på deponi eller arbetsplats
- Material
- Stabilisering

Etablering av arbetsmaskiner eller packning av fyllning/stabiliserad lera tas inte med i kalkylen. Utfallen för de olika alternativen redovisas i Tabell 6-2 - Tabell 6-4. För en mer fullständig redovisning av inputvärden och dess källor se Bilaga 2.

Tabell 6-2 Sammanställning kostnad och CO₂-ekvivalenter för alternativ 1

Alternativ 1 - deponi	Kostnad [miljoner SEK]	CO ₂ -ekvivalenter [ton]
Användning sugbil arbetsplats	1,95	150,7
Transport lera arbetsplats till deponi, sugbil	1,69	72,5
Transport deponi till arbetsplats, sugbil	1,69	17,1
Deponi	2,48	19,4
Fyllnadsmaterial	0,42	55,0
Transport fyllnadsmaterial till arbetsplats	0,53	29,9
Transport från arbetsplats till lager fyllning	0,53	9,6
Summa	9,3	354,1

Tabell 6-3 Sammanställning kostnad och CO₂-ekvivalenter för alternativ 2

Alternativ 2 - stabilisering + deponi	Kostnad [miljoner SEK]	CO ₂ -ekvivalenter [ton]
Bindemedel	0,90	22,5
Transport av bindemedel till arbetsplats	0,03	1,6
Processtabilisering	4,50	8,1
Användning grävare arbetsplats	0,21	1,2
Användning lastbil arbetsplats	0,21	21,5
Transport lera arbetsplats till deponi, lastbil	0,53	37,6
Transport deponi till arbetsplats, lastbil	0,53	12,1
Deponi	1,58	7,9
Fyllnadsmaterial	0,42	55,0
Transport fyllnadsmaterial till arbetsplats	0,53	29,9
Transport från arbetsplats till lager fyllning	0,53	9,6
Summa	10,0	206,9

Tabell 6-4 Sammanställning kostnad och CO₂-ekvivalenter för alternativ 3

Alternativ 3 - stabilisering	Kostnad [miljoner SEK]	CO ₂ -ekvivalenter [ton]
Bindemedel	0,90	22,5
Transport av bindemedel till arbetsplats, tåg	0,03	1,6
Transport av bindemedel till arbetsplats, lastbil	0,01	0,7
Transport lastbil till tågstation	0,01	0,2
Processtabilisering	4,50	8,1
Användning grävare till/från stab.station	0,43	2,4
Summa	5,9	35,5

Utifrån den utförda kalkylen är det klart fördelaktigt, både ekonomiskt och m.h.t. utsläpp CO₂-ekvivalenter, att stabilisera leran om det går att använda inom projektet (alternativ 3). Kostnadsmässigt är det över 50 % dyrare med deponialternativen. Alternativen med deponi leder även till 5–10 ggr så mycket utsläpp av CO₂-ekvivalenter. Vid jämförelse av deponialternativen, alternativ 1 och 2, så är alternativ 1 billigare (ca 7 %) trots de extra transportererna och den högre deponiavgiften, men släpper ut 70 % mer CO₂-ekvivalenter än alternativ 2.

Generellt är det inte materialen (fyllnadsmaterial vs bindemedel) som är kostnadsdrivande eller genererar utsläpp, utan själva hanteringen av schaktmassor och/eller fyllnadsmaterial. Som mest uppgår materialkostnaden till 16 % av den totala kostnaden.

I den utförda kalkylen är det tydligt att transportsätt påverkar den totala kostnaden och utsläppen till stor del. Om fler fordon än grävmaskiner körs på HVO och om lastningskapaciteten ökas minskar den relativa lönsamheten för stabiliseringsalternativet. Likaså om bindemedlet inte kan transporteras med tåg.

Att stabiliseringsalternativet visar sig vara fördelaktigt hänger på de antaganden som gjorts. I kalkylen har en kostnad på 300 kr/m³ för processtabilisering använts. Denna kostnad är dock relativt osäker då det är svårt att bedöma logistikflöden och kan variera mycket beroende på förutsättningar i projektet. Eventuella merkostnader med processtabiliseringen i jämförelse med deponialternativen kan vara:

- Krångligare att flytta stabiliseringsstationen än att flytta lastbil/sugbil
- Man blir inte av med schaktmassorna direkt från arbetsplatsen, dessa kanske måste mellanlagras innan de läggs på sin slutliga plats
- Det är inte lika enkelt att få tag på personal/förare och utrustning för processtabilisering som för deponering

Dock finns flera sätt att lösa dessa problem. Bland annat kan blandningskärlet anpassas efter aktuella förhållanden. Det är också vanligt att lös lera läggs i stora upplagshögar på tork innan den kan transporteras vidare, denna process går avsevärt mycket snabbare om leran stabiliseras. Den utförda kalkylen visar att det finns potential att spara både tid och utsläpp med processtabilisering.

Kalkylen är gjord med processtabilisering som vald stabiliseringsmetod, ett annat alternativ som inte kräver hantering av lös lera ovan mark är att stabilisera direkt i marken (masstabilisering). På

detta sätt undviks upplagshögar och logistikproblematik med stabiliseringsstation. Dock ger detta alternativ inte lika bra förutsättningar för en homogen inblandning.

För att se hur de olika faktorerna i kalkylen påverkar kostnad och utsläpp har en känslighetsanalys utförts. Sammanställningar av hur olika val/förutsättningar påverkar kostnad och utsläpp redovisas i Tabell 6-5 och Tabell 6-6.

Tabell 6-5 Känslighetsanalys för kostnad

Justering av kalkyl	Alternativ 1	Alternativ 2	Alternativ 3
	miljoner SEK	miljoner SEK	miljoner SEK
Ingen justering	9,3	10,0	5,9
Användning KC som bindemedel	9,3	9,4	5,3
Dubbelt avstånd till deponi (66km)	12,6	11,0	5,9
Alla fordon går på HVO	9,3	10,0	5,9
Mindre schaktmassa (5000 m ³)	3,1	3,3	2,0

Tabell 6-6 Känslighetsanalys för utsläpp

Justering av kalkyl	Alternativ 1	Alternativ 2	Alternativ 3
	ton CO2-ekvivalenter	ton CO2-ekvivalenter	ton CO2-ekvivalenter
Ingen justering	354,1	206,9	35,5
Användning KC som bindemedel	354,1	450,9	278,7
Dubbelt avstånd till deponi (66km)	443,6	256,7	35,5
Alla fordon går på HVO	108,3	102,3	27,3
Mindre schaktmassa (5000 m ³)	118,0	69,0	11,8

Denna beräkningskalkyl är utförd för olika ”extremfall” och tar inte hänsyn till alla aspekter som finns i verkligheten. Exempelvis kan inte alla projekt i dagsläget använda all stabiliserad lera som utfyllnadsmaterial. Det kalkylen tydliggör är att det med rätt förutsättningar och kunskap går att spara pengar och minska utsläpp genom att stabilisera lera istället för att skicka den direkt till deponi, oavsett om leran skall användas som utfyllnadsmaterial eller inte. Stor möjlighet för besparingar ligger i om det går att använda leran i projektet eller i närområdet.

7 SLUTSATS

Att utföra markstabilisering i syfte att göra lös lera mer hanterlig och/eller använda stabiliserad lös lera som utfyllnadsmaterial har i föreliggande studie visat sig kunna vara lönsamt. Beroende på projektets förutsättningar kan både kostnad och utsläpp av CO₂-ekvivalenter reduceras. Potentialen ligger framför allt i att minska eller undvika transporter av lera och fyllnadsmaterial.

Utifrån resultatet från laborationen framgår att alla testade stabiliseringsmedel kan ge erforderlig hållfasthet efter något dygn. Generellt kan en hållfasthet på 30 kPa uppnås inom 3 dygn med 2,5 % inblandning av CKD, MC och Merit i kombination med byggcement. För KC-inblandningar krävs något mindre inblandningsmängd för att uppnå samma resultat (ca 1 %). För inblandning av endast Merit krävs en större inblandningsmängd för att uppnå samma resultat (ca 20 %).

Det skall också nämnas att leran tappar en del av stabiliseringen då den störs igen, vilket innebär att högre inblandningsmängd kan behövas om leran inte förblir orörd efter stabiliseringen. Vidare är försöken utförda i en laboratoriemiljö vilket sannolikt genererar en mer homogen inblandning än ute i fält. För att uppnå önskad effekt i fullskaleförsök kan inblandningsmängden behöva justeras.

Utifrån alternativen i beräkningskalkylen är markstabilisering med KC något billigare än stabilisering med bindemedel bestående av slaggprodukter då det krävs mindre inblandningsmängd. Dock genererar stabilisering med KC avsevärt större utsläpp av CO₂-ekvivalenter. Det skall dock påpekas att CO₂-avtrycket från restprodukter/slaggprodukter kan vara missvisande då det endast är förädlingen av slaggen från filtren eller dylikt som räknas in i CO₂-avtrycket. Det är bra att slaggprodukter kommer till användning men kostnaden och CO₂-avtrycket representerar inte hela tillverkningsprocessen, vilket kan ändras när produkterna inte längre betraktas som restprodukter.

Stabilisering av lera med bindemedel är framgångsrikt beroende på att bindemedlen, i varierande grad, innehåller kalciumoxid vilket genereras vid förbränning. Det är således svårt att undvika utsläpp av CO₂ vid denna typ av markstabilisering. Hållbarhet är dock ett brett begrepp som bland annat innefattar utsläpp av växthusgaser, men även utsläpp av andra ämnen eller värdering av ändliga resurser som utrymme och råvaror. Vid valet om att utföra markstabilisering eller inte, bör resurser som krävs för deponi och transporter ställas mot resurser som krävs för bindemedelsframställning (exempelvis kalksten).

För att sammanfatta finns förbättringspotential i hur lös schaktmassor hanteras, oavsett om masstabilisering utförs eller ej. Förbättringspotentialen ligger i att minska transporter, ställa om till förnyelsebart bränsle för fordon och minska mängden råvaror som behövs. Att optimera tillverkningsprocesser och kunna använda vad som betraktas som restprodukter idag är också ett steg i rätt riktning.

Utvecklingstrenden i flera europeiska länder är att det ställs allt högre krav på användningsgrad av schaktmassor i takt med att tillgängligt deponiutrymme minskar och hållbarhetskrav ökar. Att kunna använda schaktmassor inom projekt, eller i närområde, kan således komma att bli viktigare, även på platser med lös lera.

I dagsläget används markstabilisering framför allt i syfte att skapa en bärande konstruktion. Att öka hanterbarheten på schaktmassor, alternativt att använda lermassorna som utfyllnadsmaterial kan dock komma att bli mer lönsamt framöver. Andra potentiella utvecklingsområden för markstabilisering med bindemedel är inkapsling av föroreningar eller minskning av vibrationer.

Denna studie har sammanfattat möjligheter och lönsamhet med att stabilisera schaktmassor bestående av lös lera för användning som utfyllnadsmaterial eller endast för ökad hanterbarhet av lösa schaktmassor. För att implementera detta i ett större sammanhang rekommenderas vidare undersökningar och fallstudier på bland annat:

- Storskaligt inblandningsförsök med process- eller masstabilisering
 - Studie av stabiliseringens långtidseffekt
 - Jämförelse av resultat från lera blandad i laboratorium med resultat från lera blandad i fält
- Studie av hur olika leror och föroreningar påverkar stabiliseringsförmågan
- Undersöka möjligheter till att göra en mer objektiv konsistensbedömning av schaktmassor inför hantering, transport och deponi
- Undersökning av hur stabiliserad lera reagerar på olika störningar som uppgrävning eller transport
 - Hur mycket av stabiliseringseffekten försvinner/behålls
 - Vilka egenskaper behöver stabiliserad lera ha för att transporteras på lastbilsflak på ett säkert sätt
- Användning av markstabilisering som alternativ för temporära konstruktioner
 - Alternativ till att använda spont
 - Erforderliga släntlutningar för stabiliserad lera

REFERENSER

ALLU & Ramboll. (2007). *Mass stabilization manual* [Manual].

Al-Refeai, T. O. & Al-Karni, A. A. (1999). *Experimental study on the utilization of cement kiln dust for ground modification*. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 11(2), 217-231. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018363918309991>

Axelsson, K., Johansson, S.-E. & Andersson, R. (2000). *Stabilisering av organisk jord med cement- och puzzolanreaktioner – förstudie* (SD rapport nr. 3). Svensk Djupstabilisering.

Burström, P.-G. (2007). *Byggnadsmaterial - Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper* (2:13 uppl.). Lund: Studentlitteratur AB.

Button, J. W. (2003). *Kiln dust for stabilization of pavement base and subgrade materials*. Texas Transportation Institute.

Cementa. (2015). *Markstabilisering med lägre koldioxidutsläpp*. Hämtad 2021-04-15, från <https://www.cementa.se/sv/Multicem-nyhet>

Cementa. (2021). *Redovisning av koldioxidutsläppen från vår verksamhet*. Hämtad 2021-04-22, från <https://www.cementa.se/sv/nollvision2030>

Edstam, T. (1997). *Erfarenhetsbank för kalk-cementpelare* (SD rapport nr. 1). Svensk Djupstabilisering.

EuroSoilStab. (2002). *Mass stabilization manual* [Design guide]. European Commission.

Firoozi, A. A., Olgun, C. G., Firoozi, A. A. & Baghini, M. S. (2017). *Fundamentals of soil stabilization*. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(26). doi: 10.1186/s40703-017-0064-9

Göteborgs Stad Trafikkontoret. (2016). *Spårvagnsdepå Ringön – Etapp 2* (version 1.1; projekterings PM geoteknik).

Holm, G. (2006). *Ett kunskapslyft inom djupstabilisering* (SD rapport nr. 18). Svensk Djupstabilisering.

Janz, M. & Johansson, S.-E. (2002). *Olika bindemedels funktion vid djupstabilisering* (SD rapport nr. 9). Svensk Djupstabilisering.

Johansson, S.-E., Åhnberg, H. & Pihl, H. (2006). *Kemiska reaktioner vid stabilisering av jord* (SD rapport nr. 38). Svensk Djupstabilisering.

Lagerlund, J., Holm, G. & Wilhelmsson, A. (2010). *Potential assessment of using fly ash as a binding agent for stabilization and solidification of dredged material*. Värmeforsk.

Larsson, R. (2011). *Djupstabilisering med bindemedelsstabiliserade pelare och masstabilisering – En vägledning* (SD rapport nr. 17). Svensk Djupstabilisering.

- Lindh, P. (2009). *Effekter av slagg och askor i bindemedel för stabilisering* (SBUF rapport nr. 12141). Svenska byggbranschens utvecklingsfond.
- Lindh, P. (2012). *Fältförsök med stabiliserade muddermassor, Gävle Hamn* (SBUF rapport nr. 12424). Svenska byggbranschens utvecklingsfond.
- Mason, T. O. & Lea, F. M. (2021). Cement – building material. *Encyclopedia Britannica*. Hämtad från <https://www.britannica.com/technology/cement-building-material>
- Mehta, P. K. (1987). Natural Pozzolans: Supplementary Cementing Materials in Concrete. *CANMET Special Publication*, 86, 1-33.
- Merox. (2015). *Hyttsten typer*. Hämtad 2021-04-22, från https://www.merox.se/index.pl/typer_5
- Naturvårdsverket. (2016). *Avfall i Sverige 2014* (Rapport nr. 6727).
- NVF. (2007). *Sammanställning av djupstabilisering – projekt i Finland 2000–2006*.
- Pousette, K. (2001). *Stabilisering av torv - Olika faktorerers inverkan på stabiliseringseffekten* [Licentiatuppsats]. Luleå tekniska universitetet.
- Preetham, H. K., Nayak, S. & Surya, E. V. (2019, nov). Experimental investigation on the stabilization of soft clay using granulated blast furnace slag. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 561, 012047.
- Sargent, P. (2015). 21 - the development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation. F. Pacheco-Torgal, J. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo & P. Chindapasirt (red.), *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes* (s. 555-604). Oxford: Woodhead Publishing.
- SGI. (2007). *Skjuvhållfasthet – utvärdering i kohesionsjord* (Information nr. 3). Statens geotekniska institut.
- SGI. (2011). *Vägledning för nyttiggörande av muddermassor i hamn- och anläggningskonstruktioner – Stabilisering och solidifiering av muddermassor* (Information nr. 20). Statens geotekniska institut.
- SSAB. (2020). *Miljörapport 2020 - SSAB Luleå*.
- SSAB EMEA AB. (2020). *Miljörapport 2020 - SSAB EMEA AB Borlänge*.
- SWECEM. (2021). *Merit*. Hämtad 2021-04-22, från <https://swecem.se/merit/>
- Swedish Standards Institute (SIS). (2004). *Geoteknisk undersökning och provning – Identifiering och klassificering av jord - Del 2: Klassificeringsprinciper (ISO 14688-2:2004)*. Stockholm: SIS.
- Trafikverket. (2020). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 7.0* (kapitel 14).

Åhnberg, H., Johansson, S.-E., Retelius, A., Ljungkrantz, C., Holmqvist, L. & Holm, G. (1995). *Cement och kalk för djupstabilisering av jord - En kemisk-fysikalisk studie av stabiliseringseffekter* (SGI Rapport nr. 48). Statensgeotekniska institut.

Pilekrogen - KC

innan stabilisering

Prov-ID	Djup [m]	omrörd c_u [kPa]	w_N [%]	w_L [%]
1	8-10	0,6	89	55
2	5-10	1,0	85	79
3	5-12	0,7	86	55
4	4-8	0,8	94	84
5	5-10	0,9	77	70

stabilisering

Prov-ID	vikt prov [kg]	Stab.medel	Mängd [vikt-%]	vikt stab.medel [g]	inblandningstid
1	1,3	KC 50/50	20	269	2 min, nivå 2-3
2	1,2	KC 50/50	10	120	2 min, nivå 2-3
3	1,2	KC 50/50	5	59	2 min, nivå 2-3
4	1,0	KC 50/50	2,5	26	2 min, nivå 2-3
5	1,3	KC 50/50	1	13	2 min, nivå 2-3

efter stabilisering

Prov-ID	Mängd stab.medel [vikt-%]	1h		24h		48h		72h			
		konsistens 1h	c_u [kPa] 1h	konsistens 24h	c_u [kPa] 24h	konsistens 48h	c_u [kPa] 48h	konsistens 72h	c_u [kPa] 72h	w_N [%] 72h	c_u störd [kPa] 72h
1	20	-	40,0	spröd (extremt)	339,5	-	627,8	-	981,0	-	-
2	10	-	32,4	spröd/smullig	77,8	-	139,7	-	233,4	-	-
3	5	-	32,4	seg/kladdig	49,5	-	80,1	-	105,5	-	-
4	2,5	-	20,0	seg/kladdig	39,2	-	41,7	-	49,5	-	-
5	1	-	17,4	seg/kladdig	24,7	-	31,3	-	33,0	53	320,3

c_u - odränerad skjuvhållfasthet erhållen via konförsök, angivna värden är medelvärde från 3st försök

Pilekrogen - Merit

innan stabilisering

Prov-ID	Djup [m]	omrörd c _u [kPa]	w _N [%]	w _L [%]
1	3	1,3	79	75
2	3-5	0,6	82	68
3	3-4	2,8	84	92
4	6-10	0,8	94	83
5	4-12	0,8	85	75
6	6-10	1,3	68	67

stabilisering

Prov-ID	vikt prov [kg]	Stab.medel	Mängd [vikt-%]	vikt stab.medel [g]	inblandningstid
1	0,8	Merit 100%	1,3	11	2 min, nivå 2-3
2	1,3	Merit 100%	0,7	9	2 min, nivå 2-3
3	1,3	Merit 100%	2,7	33	2 min, nivå 2-3
4	1,3	Merit 100%	40	516	2 min, nivå 2-3
5	1,6	Merit 100%	60	984	2 min, nivå 2-3
6	1,3	Merit 100%	10	135	3 min, nivå 2-3

efter stabilisering

Prov-ID	Mängd stab.medel [vikt-%]	1h		24h		48h		72h			
		konsistens 1h	c _u [kPa] 1h	konsistens 24h	c _u [kPa] 24h	konsistens 48h	c _u [kPa] 48h	konsistens 72h	c _u [kPa] 72h	w _N [%] 72h	c _u störd [kPa] 72h
1	1,3	blöt	1,3	samma	4,0	samma	3,3	samma	2,7	-	-
2	0,7	blöt	0,6	samma	0,8	samma	0,9	samma	2,7	-	-
3	2,7	blöt	2,2	samma	1,7	samma	2,6	samma	3,0	-	-
4	40	kladdig	5,4	samma	28,2	spröd	33,6	spröd	44,4	-	-
5	60	kladdig	9,8	samma	55,6	spröd	62,9	spröd	80,1	-	-
6	10	kladdig	5,4	samma	5,9	samma	6,7	samma	7,6	53	2,9

c_u - odränerad skjuvhållfasthet erhållen via konförsök, angivna värden är medelvärde från 3st försök

Pilekrogen - MC

innan stabilisering

Prov-ID	Djup [m]	omrörd c_u [kPa]	w_N [%]	w_L [%]
1	3-6	0,8	106	96
2	3-5	0,8	106	95
3	5-8	1,0	106	98

stabilisering

Prov-ID	vikt prov [kg]	Stab.medel	Mängd [vikt-%]	vikt stab.medel [g]	inblandningstid
1	1,4	MC 50/50	5	69	2 min, nivå 2-3
2	1,3	MC 50/50	3	32	2 min, nivå 2-3
3	1,2	MC 50/50	1	12	2 min, nivå 2-3

efter stabilisering

Prov-ID	Mängd stab.medel [vikt-%]	1h		24h		48h		72h			
		konsistens 1h	c_u [kPa] 1h	konsistens 24h	c_u [kPa] 24h	konsistens 48h	c_u [kPa] 48h	konsistens 72h	c_u [kPa] 72h	w_N [%] 72h	c_u störd [kPa] 72h
1	5	-	13,5	smulig	33,6	smulig	49,5	-	61,3	90	-
2	3	-	15,3	seg	24,0	seg	27,3	-	30,7	93	8,9
3	1	-	8,6	kladdig	10,1	kladdig	9,3	-	12,1	97	3,5

c_u - odränerad skjuvhållfasthet erhållen via konförsök, angivna värden är medelvärde från 3st försök

Pilekrogen - CKD

innan stabilisering

Prov-ID	Djup [m]	omrörd c_u [kPa]	w_N [%]	w_L [%]
1	3-12	0,9	81	73
2	8-12	1,0	81	76
3	3-12	0,9	98	91

stabilisering

Prov-ID	vikt prov [kg]	Stab.medel	Mängd [vikt-%]	vikt stab.medel [g]	inblandningstid
1	1,6	CKD	5	79	2 min, nivå 2-3
2	1,3	CKD	3	34	2 min, nivå 2-3
3	1,5	CKD	1	15	2 min, nivå 2-3

efter stabilisering

Prov-ID	Mängd stab.medel [vikt-%]	1h		24h		48h		72h			
		konsistens 1h	c_u [kPa] 1h	konsistens 24h	c_u [kPa] 24h	konsistens 48h	c_u [kPa] 48h	konsistens 72h	c_u [kPa] 72h	w_N [%] 72h	c_u störd [kPa] 72h
1	5	-	15,3	seg	18,2	seg	24,9	-	37,0	68	14,2
2	3	-	15,3	seg	20,6	seg	21,2	-	23,2	72	9,8
3	1	-	8,1	kladdig	9,4	kladdig	11,3	-	12,7	89	4,5

c_u - odränerad skjuvhållfasthet erhållen via konförsök, angivna värden är medelvärde från 3st försök

Pilekrogen - Merit och Byggcement

innan stabilisering

Prov-ID	Djup [m]	omrörd c_u [kPa]	w_N [%]	w_L [%]
1	3-4	0,8	93	90
2	5-6	0,8	102	91
3	4-5	0,6	89	71

stabilisering

Prov-ID	vikt prov [kg]	Stab.medel	Mängd [vikt-%]	vikt stab.medel [g]	inblandningstid
1	1,4	Merit + BC 50/50	10	69	2 min, nivå 2-3
2	1,2	Merit + BC 50/50	5	31	2 min, nivå 2-3
3	1,4	Merit + BC 50/50	2,5	18	2 min, nivå 2-3

efter stabilisering

Prov-ID	Mängd stab.medel [vikt-%]	1h		24h		48h		72h			
		konsistens 1h	c_u [kPa] 1h	konsistens 24h	c_u [kPa] 24h	konsistens 48h	c_u [kPa] 48h	konsistens 72h	c_u [kPa] 72h	w_N [%] 72h	c_u störd [kPa] 72h
1	10	-	32,4	spröd	157,0	samma	192,9	samma	224,6	79	66,2
2	5	-	13,6	smulig	39,2	samma	60,9	samma	75,7	89	18,4
3	2,5	kladdig	17,4	seg	21,3	samma	23,7	samma	22,1	82	7,5

c_u - odränerad skjuvhållfasthet erhållen via konförsök, angivna värden är medelvärde från 3st försök

Ringön - Merit

innan stabilisering

Prov-ID	Djup [m]	omrörd c_u [kPa]	w_N [%]	w_L [%]
1	1-4	1,4	85	84
2	1-4	1,2	84	81
3	1-4	1,2	83	76

stabilisering

Prov-ID	vikt prov [kg]	Stab.medel	Mängd [vikt-%]	vikt stab.medel [g]	inblandningstid
1	2,0	Merit	60	1215	2 min, nivå 2-3
2	1,7	Merit	40	677	2 min, nivå 2-3
3	1,4	Merit	20	286	2 min, nivå 2-3

efter stabilisering

Prov-ID	Mängd stab.medel [vikt-%]	1h		24h		48h		72h			
		konsistens 1h	c_u [kPa] 1h	konsistens 24h	c_u [kPa] 24h	konsistens 48h	c_u [kPa] 48h	konsistens 72h	c_u [kPa] 72h	w_N [%] 72h	c_u störd [kPa] 72h
1	60	-	-	spröd	35,5	spröd	61,5	spröd	70,1	38	46,2
2	40	-	-	seg	23,8	seg	49,0	seg	49,1	46	29,2
3	20	-	-	seg	13,9	seg	36,8	seg	44,3	57	39,2

c_u - odränerad skjuvhållfasthet erhållen via konförsök, angivna värden är medelvärde från 3st försök

Ringön - MC

innan stabilisering

Prov-ID	Djup [m]	omrörd c_u [kPa]	w_N [%]	w_L [%]
1	1-4	1,2	1	1
2	1-4	1,1	1	1
3	1-4	1,2	1	1

stabilisering

Prov-ID	vikt prov [kg]	Stab.medel	Mängd [vikt-%]	vikt stab.medel [g]	inblandningstid
1	1,7	MC	5	84	2 min, nivå 2-3
2	1,4	MC	3	34	2 min, nivå 2-3
3	1,5	MC	1	15	2 min, nivå 2-3

efter stabilisering

Prov-ID	Mängd stab.medel [vikt-%]	1h		24h		48h		72h			
		konsistens 1h	c_u [kPa] 1h	konsistens 24h	c_u [kPa] 24h	konsistens 48h	c_u [kPa] 48h	konsistens 72h	c_u [kPa] 72h	w_N [%] 72h	c_u störd [kPa] 72h
1	5	-	-	spröd	86,6	spröd	102,7	spröd	122,9	1	82,4
2	3	-	-	seg	36,9	smulig	39,9	smulig	38,4	1	22,9
3	1	kladdig	12,8	kladdig	12,3	kladdig	23,2	kladdig	16,7	1	8,9

c_u - odränerad skjuvhållfasthet erhållen via konförsök, angivna värden är medelvärde från 3st försök

Ringön - CKD

innan stabilisering

Prov-ID	Djup [m]	omrörd c_u [kPa]	w_N [%]	w_L [%]
1	1-4	1,2	80	76
2	1-4	1,4	80	76
3	1-4	1,2	76	77

stabilisering

Prov-ID	vikt prov [kg]	Stab.medel	Mängd [vikt-%]	vikt stab.medel [g]	inblandningstid
1	1,5	CKD	5	76	2 min, nivå 2-3
2	1,5	CKD	3	36	2 min, nivå 2-3
3	1,5	CKD	1	15	2 min, nivå 2-3

efter stabilisering

Prov-ID	Mängd stab.medel [vikt-%]	1h		24h		48h		72h			
		konsistens 1h	c_u [kPa] 1h	konsistens 24h	c_u [kPa] 24h	konsistens 48h	c_u [kPa] 48h	konsistens 72h	c_u [kPa] 72h	w_N [%] 72h	c_u störd [kPa] 72h
1	5	seg	35,5	seg	30,3	seg	39,0	smulig	48,0	70	26,5
2	3	kladdig	23,8	seg	27,8	seg	33,6	seg	34,9	72	15,1
3	1	blöt	13,9	kladdig	13,5	kladdig	22,5	kladdig	15,8	68	10,3

c_u - odränerad skjuvhållfasthet erhållen via konförsök, angivna värden är medelvärde från 3st försök

Projektdata		källa
Vikt schaktmassa [ton]	22500	påhittad
Volym schaktmassa [m3]	15000	påhittad
densitet lera [t/m3]	1,5	påhittad, typisk gbglera, samma som den testade leran
Avstånd arb.plats-deponi [km]	33	Google maps, Samgräv deponi
Avstånd bindemedel-arb.plats [km]	162	Google maps, kommunikation Thomas Lagerbäck (Cementa)
Avstånd merit-arb.plats [km]	210	Google maps, kommunikation Henry Flisell (SWECEM)
Avstånd fyllnadsmaterial-arb.plats [km]	21	Google maps
maxvikt transport lastbil [ton]	32	kommunikation Andreas Olsson Waage (Skanska)
maxvikt transport sugbil [ton]	13	kommunikation Andreas Olsson Waage (Skanska)
volym lastbil [m3]	21,3	uträknad
volym sugbil [m3]	8,7	uträknad
kapacitet lastbil (grävmaskin) [m3/h]	70	kommunikation Andreas Olsson Waage (Skanska)
kapacitet sugbil [m3/h]	10	kommunikation Andreas Olsson Waage (Skanska)
kostnad deponi blöt massa [kr/ton]	110	kommunikation Fredrik Bernhardsson (Skanska)
kostnad deponi torr massa [kr/ton]	70	kommunikation Fredrik Bernhardsson (Skanska)
antal lastbilsflak lera	703,1	uträknad
antal sugbilstankar lera	1730,8	uträknad
tid att fylla lastbil [h]	214,3	uträknad
tid att fylla sugbil [h]	1500	uträknad
tid fram och tillbaka arb.plats-deponi [h]	1,5	Google maps
tid att hantera schaktmassor vid deponi [h]	2	påhittad
tid transport av fyllnadsmaterial [h]	0,6	Google maps
vikt fyllnadsmaterial [ton]	28050	uträknat
antal lastbilsflak fyllnadsmaterial	876,6	uträknat
densitet fyllnadsmaterial [ton/m3]	1,7	kommunikation Fredrik Bernhardsson (Skanska)
Mängd CKD (5%) [ton]	1125	uträknat
kapacitet processtabilisering [m3/h]	70	Lindh (2012), egentligen högre men samma kap. som grävmaskinerna
tid processtabilisering [h]	214,3	uträknat
avstånd tågstation-arb.plats [km]	13	Google maps
antal lastbilsflak bindemedel [st]	35,2	uträknat
Tid tågstation-arbetsplats [h]	0,25	Google maps
Kostnadsdata		källa
lastbil [kr/h]	1000	kommunikation Andreas Olsson Waage (Skanska)
sugbil [kr/h]	1300	kommunikation Andreas Olsson Waage (Skanska)
grävare [kr/h]	1000	kommunikation Fredrik Bernhardsson (Skanska)
Tåg [kr/tonkm]	0,176	Trafikverket (2020)
masstabilisering [kr/m3]	200	kommunikation Svenska dmixab AB
processtabilisering [kr/m3]	300	Lindh (2012)
fyllnadsmaterial [kr/ton]	15	kommunikation Andreas Olsson Waage (Skanska)
byggcement [kr/ton]	854	kommunikation Thomas Lagerbäck (Cementa)
Merit [kr/ton]	915	kommunikation Henry Flisell (SWECEM)
CKD [kr/ton]	800	kommunikation Thomas Lagerbäck (Cementa)
MC [kr/ton]	800	kommunikation Thomas Lagerbäck (Cementa)
KC [kr/ton]	1450	kommunikation Thomas Lagerbäck (Cementa)
Utsläppsdata		källa
lastbil transport full [kg CO2e/km]	1,622	Skanskas beräkningsverktyg för klimatpåverkan
lastbil transport tom [kg CO2e/km]	0,522	Skanskas beräkningsverktyg för klimatpåverkan
lastbil arbetsplats [kg CO2e/h]	100,456	Skanskas beräkningsverktyg för klimatpåverkan
sugbil transport full [kg CO2e/km]	1,269	Skanskas beräkningsverktyg för klimatpåverkan
sugbil transport tom [kg CO2e/km]	0,299	Skanskas beräkningsverktyg för klimatpåverkan
sugbil arbetsplats [kg CO2e/h]	100,456	Skanskas beräkningsverktyg för klimatpåverkan

grävare [kg CO ₂ e/h]	5,6	Skanskas beräkningsverktyg för klimatpåverkan, HVO diesel, 28-33 ton
Tåg [kg CO ₂ e/tonkm]	0,007	Skanskas beräkningsverktyg för klimatpåverkan
masstabilisering [kg CO ₂ e/h]	37,7	Skanskas beräkningsverktyg för klimatpåverkan, KCmaskin 120-300 kW
processtabilisering [kg CO ₂ e/h]	37,7	Skanskas beräkningsverktyg för klimatpåverkan, KCmaskin 120-300 kW
fyllnadsmaterial [kg CO ₂ /ton]	1,96	Skanskas beräkningsverktyg för klimatpåverkan
byggcement [kg CO ₂ /ton]	668	Cementa (2021)
Merit [kg CO ₂ /ton]	30	SWCEM (2021)
CKD [kg CO ₂ /ton]	20	Skanskas beräkningsverktyg för klimatpåverkan, kommunikation Thomas Lagerbäck (Cementa)
MC [kg CO ₂ /ton]	396	Skanskas beräkningsverktyg för klimatpåverkan, Cementa (2021)
KC [kg CO ₂ /ton]	1190	Skanskas beräkningsverktyg för klimatpåverkan