



# CHALMERS

---

## Bankpålning och kalkcementpelare

En teknisk, ekonomisk, och miljömässig analys och jämförelse

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

RAMI EL HAMAD

ALEXANDER WAERME



EXAMENSARBETE ACEX20-19-40

# Bankpålning och kalkcementpelare

En teknisk, ekonomisk och miljömässig analys och jämförelse

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

Rami El Hamad

Alexander Waerne

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Geologi och geoteknik

Geoteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2019

Bankpålning och kalkcementpelare  
En teknisk, ekonomisk och miljömässig analys och jämförelse  
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet  
Samhällsbyggnadsteknik  
RAMI EL HAMAD  
ALEXANDER WAERME

© RAMI EL HAMAD & ALEXANDER WAERME, 2019

Examensarbete ACEX20-19-40  
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Chalmers tekniska högskola 2019

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Avdelningen för Geologi och geoteknik  
Geoteknik  
Chalmers tekniska högskola  
412 96 Göteborg  
Telefon: 031-772 10 00

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik  
Göteborg 2019

Bankpålning och kalkcementpelare

En teknisk, ekonomisk och miljömässig analys och jämförelse

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

RAMI EL HAMAD

ALEXANDER WAERME

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Geologi och Geoteknik

Geoteknik

Chalmers tekniska högskola

## SAMMANFATTNING

Inom olika infrastrukturprojekt används grundläggningsmetoderna bankpålning och kalkcementpelare mycket. Valet av vilken grundläggningsmetod som skall användas i ett visst projekt är i varierande grad svårt att avgöra. I vissa projekt kan markförhållanden och övriga förutsättningar vara sådana att valet av grundläggningsmetod är givet. Medan situationen i vissa lägen kan vara väldigt svåröverskådlig då flera faktorer måste analyseras för att kunna ge ett bra svar på vilken grundläggningsmetod som är lämplig att använda. De faktorer som denna rapport syftar till att analysera och jämföra är tekniska, ekonomiska och miljö- och klimatmässiga. Syftet med denna rapport är att analysera men också jämföra dessa tre faktorer. Detta görs genom att besvara frågeställningar beträffande hur grundläggningsmetoderna skiljer sig åt ur ett tekniskt, ekonomiskt och miljömässigt perspektiv.

I den tekniska analysen gjordes en litteraturstudie för att få kunskap kring metodernas egenskaper. Dessa egenskaper kunde under rapportens senare del ställas mot varandra för att göra en jämförelse. För att utvärdera den ekonomiska aspekten utfördes två kostnadsberäkningar på en given vägbank. Det gjordes en kostnadsberäkning för grundläggning med bankpålning och en för grundläggning med kalkcementpelare. Dessutom har det i rapporten även gjorts en analys och jämförelse med avseende på den miljö- och klimatpåverkan som metoderna ger upphov till.

Resultaten från jämförelsen utifrån ett tekniskt perspektiv visade att de två grundläggningsmetoderna har olika för- och nackdelar. Metodernas användbarhet är väldigt beroende av jordlagerföljden och markförhållandet på platsen. Det är också stora skillnader i hur de installeras, hur provningsmetoderna ser ut och hur logistiken fungerar på projektplatsen. Vidare visade resultaten från kostnadsundersökningen att bankpålningen blev dyrare än förstärkningen med kalkcementpelare för det studerade markförhållandet. Skillnaden i kostnad kan dessutom förväntas bli större om det studerade jorddjupet hade varit större och mindre ifall jorddjupet hade varit mindre. Från miljö- och klimatpåverkansanalysen kunde det konstateras att mycket utsläpp av framförallt koldioxid uppkommer från tillverkningen av cement som används som bindemedel i båda grundläggningsmetoderna. Dock ingår det i regel betydligt mycket mer cement i en kalkcementpelarförstärkning vilket gör kalkcementpelare till ett sämre alternativ ur ett klimatpåverkansperspektiv i det avseendet. Däremot finns många andra typer av miljöpåverkan förknippade med användandet av bankpålning.

Embankment piling and lime-cement columns

A technical, economical and environmental analysis and comparison

Degree Project in the Engineering Programme  
Civil and Environmental Engineering

RAMI EL HAMAD

ALEXANDER WAERME

Department of Architecture and Civil Engineering  
Division of Geology and geotechnics  
Geotechnics  
Chalmers University of Technology

## ABSTRACT

In infrastructure projects embankment piling and lime-cement columns are two commonly used ground improvement methods. Depending on the characteristics of the soil and other factors the choice of ground improvement method sometimes is easy. In other cases, it can be very difficult since there are several factors that needs to be analysed in order to make a good decision of what ground improvement method that should be used. The factors that this study aims to analyse and discuss are the technical and economic factors, but also the environmental effect the methods cause. The purpose of this report is to analyse but also compare the three factors that leads to the choice of method. This was done by answering the formulated question of how the foundations differs from a technical, economic and environmental perspective.

In terms of the technical analysis, a literature study was made to gain knowledge about the properties of the methods, these properties are then set against each other in the latter part of the study to make a comparison. In order to analyse the economic aspect two different examples were established to evaluate what the cost of the foundation would be for a given road embankment. In the first example the embankment was reinforced with embankment piling and in the second example the embankment was reinforced with lime-cement columns. Furthermore, an analysis of what environmental impact associated with the use of both ground improvement methods has been made.

When comparing the technical aspect, it is shown that the two methods have different advantages and disadvantages. The condition of the soil is of great importance for the choice of ground improvement method. Differences in the installation process, how the testing is done and how the logistics are organised on site are other factors that are of great interest when choosing between the methods. Furthermore, when compared from an economic point of view the examples showed that embankment piling is more expensive than lime-cement columns and continues to be more expensive even at greater soil depths. From the environmental impact analysis, it was shown that a great impact comes from the production of cement which is used as a binder in both foundation methods. It was also shown that the production of other materials and other activities related to the installation of both methods also leads to a substantial environmental impact.

# Innehållsförteckning

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	III
FÖRORD	V
1 INLEDNING	1
1.1 Syfte och mål	1
1.2 Frågeställning	1
1.3 Metod	1
1.4 Avgränsningar	2
2 TEKNISK BESKRIVNING	3
2.1 Allmänt om grundläggningsmetoder	3
2.2 Bankpålning	4
2.2.1 Utformning	5
2.2.2 Utförande	6
2.2.3 Provning	7
2.3 Kalkcementpelare	9
2.3.1 Utformning	9
2.3.2 Utförande	11
2.3.3 Provning	12
3 MARKFÖRHÅLLANDEN	15
3.1 Torv, gyttja och organiska jordar	15
3.1.1 Bankpålning på torv, gyttja och organiska jordar	15
3.1.2 Kalkcementpelare på torv, gyttja och organiska jordar	16
3.2 Lera och siltiga leror	16
3.2.1 Bankpålning på lera och siltiga leror	17
3.2.2 Kalkcementpelare på lera och siltiga leror	17
4 EKONOMISK ANALYS	18
4.1 Kostnadsberäkning kalkcementpelare	18
4.1.1 Sättningsberäkning	19
4.1.2 Kostnadskalkyl	19
4.2 Kostnadsberäkning bankpålning	21
4.2.1 Dimensionering	21
4.2.2 Kostnadskalkyl	22
5 MILJÖ OCH KLIMATPÅVERKAN	24
5.1 Gemensamma miljö och klimatpåverkansmoment	24
<b>CHALMERS</b> , <i>Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik</i> , Examensarbete ACEX20-19-40	III

5.1.1	Cementtillverkning	24
5.2	Kalkcementpelare	25
5.3	Bankpålning	26
6	DISKUSSION	28
6.1	Teknisk analys och jämförelse	28
6.1.1	Projektering och förbearbetning	28
6.1.2	Tillverkning	28
6.1.3	Installation	28
6.1.4	Dimensioner	29
6.1.5	Provning	29
6.1.6	Långtidseffekter	30
6.2	Ekonomisk analys och jämförelse	31
6.3	Miljömässig analys och jämförelse	32
7	SLUTSATS	34
7.1	Metodkritik och förslag till vidare arbete	35
8	REFERENSER	36
9	BILAGOR	39
9.1	Bilaga 1 - Underlag för kostnadsundersökning	39
9.2	Bilaga 2 - Beräkningsgång sättningsberäkning	46



## Förord

Detta examensarbete är genomfört på Chalmers tekniska högskola. Examensarbetet omfattar 15 högskolepoäng och avslutar utbildningen Samhällsbyggnadsteknik, högskoleingenjör.

Vi vill rikta ett tack till vår handledare och examinator Mats Karlsson för hjälp och feedback under arbetets gång. Därutöver vill vi tacka Marcus Dahlström från Inhousetech som ställt upp på en intervju och bidragit med att plocka fram underlag för kostnadsundersökningen.

Göteborg juni 2019  
Rami El Hamad  
Alexander Waerne



# 1 Inledning

Vägar och järnvägar utgör en stor del av Sveriges infrastruktur och fyller en viktig funktion för ett fungerande samhälle. Vid nybyggnation och underhåll av vägar och järnvägar är det ibland nödvändigt att genomföra grundläggningsarbeten för att inte stabilitet- och sättningsproblem skall uppstå i en för stor utsträckning.

Två grundläggningsmetoder som idag används mycket inom olika infrastrukturprojekt är bankpålning och kalkcementpelare. Valet mellan vilken grundläggningsmetoder som skall användas i ett visst projekt är i varierande grad svårt att avgöra. Ibland är valet enkelt där en metod genast ses som den mest fördelaktiga ur de mest avgörande aspekterna. Ibland kan valet av grundläggningsmetod istället vara mycket komplext där bland annat tekniska, ekonomiska, logistiska och miljömässiga aspekter alla måste utvärderas för att komma fram till vilken metod som är mest fördelaktig i ett visst fall.

## 1.1 Syfte och mål

Rapporten bygger på en bedömning och jämförelse av grundläggningsmetoderna bankpålning och kalkcementpelare. Syftet med rapporten är att ge en förenklad bild av valet av grundläggningsmetod utifrån utvärderande av flera olika perspektiv.

Grundläggningsmetoderna utvärderas utifrån ett tekniskt, ett ekonomiskt och ett miljö- och klimatpåverkansperspektiv. Detta för att uppnå målet med examensarbetet om att besvara frågeställningen.

## 1.2 Frågeställning

Vilken grundläggningsmetod av bankpålning och kalkcementpelare är att föredra utifrån ett tekniskt perspektiv, ett ekonomiskt perspektiv och ett miljö- och klimatpåverkansperspektiv?

## 1.3 Metod

För att kunna göra en rättvis bedömning och jämförelse har de båda grundläggningsmetoderna beskrivits och utvärderas ur flera olika aspekter. Båda metoderna har beskrivits ur ett tekniskt perspektiv. Det tekniska perspektivet inkluderar i det här fallet hur metoden fungerar, hur installationsprocessen går till och hur tester och prover genomförs och utvärderas. Metoden som legat till grund för detta delmomentet har varit en litteraturstudie. Även om grundläggningsmetoderna i många avseenden skiljer sig åt har rapportens struktur utformats så att olika delmoment skall kunna jämföras mot varandra.

Metoden som legat till grund för den ekonomiska analysen har varit kostnadsberäkningar för en vägbank på lera. Två kostnadsberäkningar genomfördes. En för grundläggning med bankpålning och en för grundläggning med kalkcementpelare. Förutsättningarna i form av markbeskaffenhet och jorddjup valdes på så sätt att båda metoderna potentiellt skulle kunna användas. Vilket möjliggjorde en någorlunda rättvis jämförelse metoderna emellan.

Metoden som användes för miljö- och klimatpåverkansanalysen baserades på en litteraturstudie. Fokus i litteraturstudien låg på att beskriva de ingående material och delmoment i tillverkningsprocesserna som hade störst miljö- och klimatpåverkan. För att få en uppfattning om vilka material och processer som gav upphov till den största miljö- och

klimatpåverkan studerades tidigare gjorda livscykelanalyser för bankpålning och kalkcementpelare. En kartläggning av var i produktionskedjan det skulle ge mest effekt att vidta åtgärder kunde på så sätt göras.

## 1.4 Avgränsningar

För att jämförelsen ska bli så rättvis som möjligt har rapporten avgränsats till att endast handla om grundläggning i markförhållanden där båda metoderna skulle kunna användas. Vilket i det här fallet är grundläggning på lera och till viss utsträckning siltiga och sandiga leror och leror med en mindre andel organiskt innehåll.

Inom respektive grundläggningsmetod finns en stor variation i metodernas utformning. Vid användning av bankpålning kan till exempel olika typer av pålar användas såsom stålplålar, träpålar och betongpålar. Rapporten har dock avgränsats till att endast behandla användningen av standardbetongpålar. Detta eftersom betongpålar är den vanligaste påltypen i Sverige då 57% av alla installerade pålar i Sverige 2018 var slagna betongpålar (Pålkommisionen, 2019). Vad gäller grundläggning med kalkcementpelare finns framförallt två metoder som används ”den torra metoden” och ”den våta metoden”. Båda metoderna beskrivs övergripligt men kostnadsberäkningen och den miljö- och klimatomfattiga bedömningen bygger på att ”den torra metoden” använts.

Vid kostnadsberäkningen har dimensioneringen för de båda metoderna gjorts så att sättningspunkter inte förväntas uppstå i en omfattning att det kan skada eller begränsa användningen av konstruktionen. Dock har rapporten avgränsats till att inte omfatta någon stabilitetsanalys för de två grundläggningsmetoderna. Vilket enligt Trafikverkets krav för geokonstruktioner egentligen också skall göras.

## 2 Teknisk beskrivning

Det tekniska perspektivet i det här kapitlet inkluderar grundläggande fakta för olika grundläggningsmetoder. Samt beskriver mer detaljerat hur de två studerade metoderna bankpålning och kalkcementpelare fungerar, hur installationsprocessen går till och hur tester och prover genomförs och utvärderas.

### 2.1 Allmänt om grundläggningsmetoder

En grund är den del av en konstruktion som överför laster till den underliggande marken. För att denna lastöverföring skall ske på ett bra och fungerande sätt finns enligt de europagemensamma dimensioneringsreglerna Eurocode 7 vissa krav på vad en grundläggningskonstruktion måste uppfylla. Dels finns krav om brottgränstillstånd som anger att geokonstruktionen skall stå emot laster på ett sätt som förhindrar att kollaps sker. Det finns också krav angående bruksgränstillstånd som syftar till att se till att inga deformationer i geokonstruktioner blir så stora att de riskerar att skada konstruktionen eller leda till att konstruktionen inte kan användas på det sätt den är avsedd för (Knappet & Craig, 2012).

Det finns många olika grundläggningsmetoder som kan används vid väg- och järnvägsprojekt. Flera faktorer är avgörande vid val av grundläggningsmetoder men markförhållanden är den faktor som är enskilt viktigast. Den funktion som en grundkonstruktion främst förväntas att uppnå är förmågan att bära laster utan att deformeras i för stor utsträckning. Dock finns det även andra krav. Dessa kan till exempel vara att dränera vatten, isolera mot kyla eller förhindra att miljöfarliga ämnen sprids. De krav som ställs på en konstruktion kan också variera stort beroende av hur viktigt eller oviktigt det är ifall sättningar skulle uppstå och är ofta kopplat till var konstruktionen är belägen. Vissa konstruktioner tolererar endast små sättningar medan andra konstruktioner kan fungera för sitt avsedda ändamål trots stora sättningar. Är konstruktionen belägen i stadsmiljö kan det till exempel finnas känsliga konstruktioner intill som inte tillåter att stora sättningar får uppkomma (Statens Geotekniska institut [SGI], 2019).

Grundläggningsmetoder kan generellt delas in i ytlig och djup grundläggning. Ytlig grundläggning genomförs när markförhållandena är tillräckligt bra för att deformationer enligt ovan inte beräknas inträffa (SGI, 2019). Djup grundläggning genomförs istället när markförhållandena är sämre och eller när marken utsätts för stora laster. Det kan också göras om marken är heterogen eller om exempelvis jordlagerföljden lutar och är ojämn. Djup grundläggning görs framförallt med pålar. Pålar är ofta tillverkade av betong, stål eller trä och karakteriseras av att ha en längd som är betydligt större än dess bredd (Knappet & Craig, 2012).

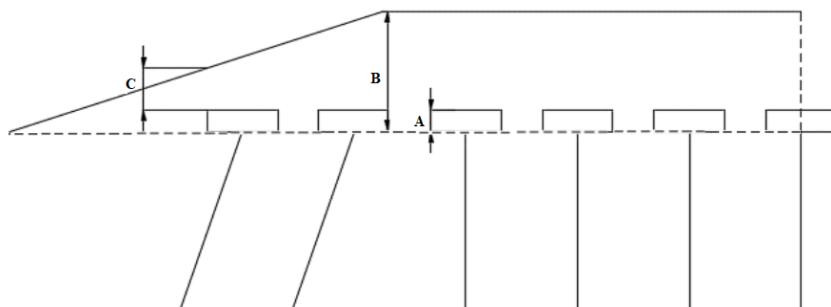
En annan typ av grundläggningsteknik som är vanlig vid anläggning av vägar och bankar är jordförstärkning. Jordförstärkning innebär att man förbättrar jordens egenskaper genom till exempel packning, dränering, armering och stabilisering. Kalkcementpelare räknas till denna gren inom grundläggningsteknik då det är ett sätt att stabilisera jorden på (SGI, 2019).

Innan rapporten går in på att handla om enbart bankpålning och kalkcementpelare presenteras här andra vanliga jordförstärkningsmetoder för att sätta in användandet av bankpålning och kalkcementpelare i ett sammanhang. Olika jordförstärkningsmetoder kan dessutom användas kombinerat med bankpålning eller kalkcementpelare i samma projekt vilket motiverar att kortfattat beskriva de vanligaste jordförstärkningsmetoderna.

En väl beprövad och kostnadseffektiv jordförstärkningsmetod är packning. Packning syftar framförallt till att öka olika fyllnadsmaterial bärighet och stabilitet. Det minskar dessutom vattengenomsläppligheten och minskar risken för att stora sättningar ska uppkomma långt efter att byggnationen är färdig. Oftast görs packning till ganska ytligt djup men det finns metoder för djuppackning som framförallt görs på sand men även andra jordar. Dränering är en annan förstärkningsåtgärd som oftast görs på leror och andra finkorniga jordar där det lätt uppkommer konsolideringssättningar som kan pågå under lång tid. Åtgärden görs framförallt med vertikaldräner som installeras under byggskedet för att jorden skall sätta sig så fort som möjligt för att på så sätt inte orsaka stora sättningar och andra problem framöver. Stabilisering är en annan åtgärd som utförs i stor utsträckning. Till denna kategori hör som nämnts bindemedelsstabiliserade pelare såsom kalkcementpelare. Till kategorin stabilisering hör även masstabilisering som till skillnad från kalkcementpelare som görs i pelare istället blandar in bindemedlet i jorden i ett helt sammanhängande område. Masstabilisering görs oftast i jordar med låg hållfasthet som inte sällan har ett högt organiskt innehåll. Stabiliseringen kan göras med en grävmaskin som har modifierats med en arm med ett blandningsverktyg och en tillhörande bindemedelsbehållare. Verktyget kan röra sig i både horisontell och vertikal riktning och kan på så sätt bilda ett helt block av stabiliserad jord. Armering är en annan jordförstärkningsmetod som ofta läggs ut ovanför pålarna eller i själva banken för att förstärka de olika fyllnadslagren och förhindra farliga glidytor i en bank. En sista förstärkningsåtgärd som kan vara värd att nämna är stenpelare. Stenpelare används framförallt i lera och i siltiga jordar och består av krossat berg eller grus som sedan packas i vertikala pelare (Sveriges Geotekniska Förening [SGF], 2005).

## 2.2 Bankpålning

Bankpålning är en inom infrastrukturprojekt vanligt förekommande grundläggningsmetod. Bankpålning består av olika samverkande komponenter vilka är pålar, pålplattor, lastfördelande jordlager och fyllnadsmaterial. Pålarna har till uppgift att överföra laster från konstruktionen ovan mark ner till ett mer bärkraftigt jordlager eller till berg. Detta görs med avsikten att öka bärförmågan eller för att minska risken för att sättningar skall uppstå (Olsson & Holm, 1993). Pålarna är i sin tur sammankopplade med så kallade pålplattor. Pålplattorna är utplacerade med fritt avstånd mellan varandra och har till uppgift att föra ner laster från den ovanförliggande vägbanken ner till pålarna. Själva vägbanken är uppbyggd dels av ett lastfördelande jordlager som läggs ut ovanför och mellan pålplattorna. Därutöver består vägbanken av ett fyllnadsmaterial som läggs ut så att vägbanken får den höjd som det är projekterat för (Trafikverket, 2016). Ett exempel på hur bankpålning kan se ut visas i figur 2.1 nedan.



Figur 2.1 Tvärsnitt över bankpålning där A, B och C motsvarar mått (Författarens egen bild).

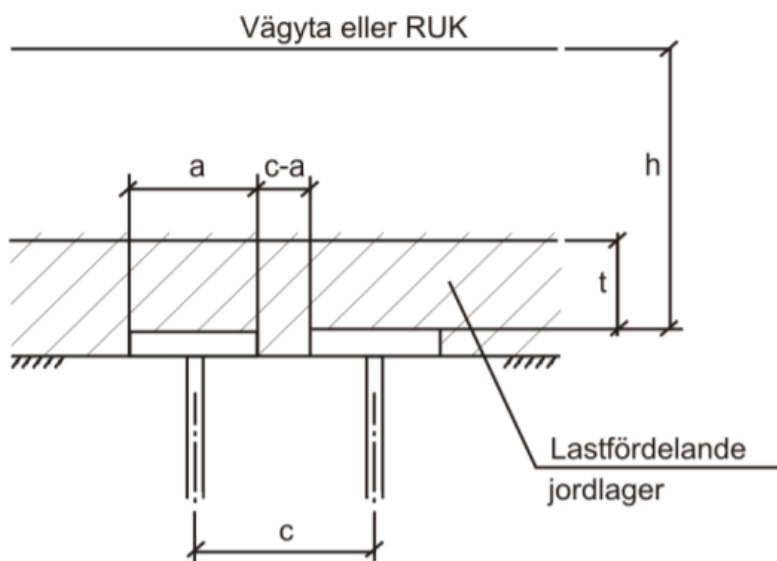
## 2.2.1 Utformning

Pålar som används till bankpålning är vanligtvis standardpålar i betong. Standardpålar tillverkas i fabrik i element som normalt är minst 3 meter långa och maximalt 13 meter långa. I samband med installation skarvas pålarna ihop och pålgrundläggningen kan på så sätt genomföras till ett stort djup. Pålarna är avsedda att användas vid normala markförhållanden och skal inte stå fritt i luft eller vatten på delar av sin längd. Standardpålar är utformade med ett kvadratisk tvärsnitt och är armerade med ospänd armering. Armeringen är utplacerad i pålens längdriktning med bygelarmering virad runt om (Olsson & Holm, 1993). Betongen som används i pålar tillverkas vanligtvis i hållfasthetsklass C50/60 med en maximal ballaststorlek på 25 mm. Vattencementtalet, vct brukar i standardpålar vara lika med eller mindre än 0,45 och utförs som lägst med ett vct på 0,35 beroende av vilka krav som ställs (Hercules, 2018). Standardpålar brukar delas in i 3 olika klasser som kallas för SP1, SP2 och SP3. SP1 har kantmättet 235 mm och medan SP2 och SP3 har kantmått 270 mm eller 275 mm. Vid skarvning mellan pålelementen skall skarven utföras så att vinkeländringen mellan två element efter skarvning inte lutar mer än 1:75 (Olsson & Holm, 1993).

Vid användandet av spetsburna pålar används ofta så kallade bergskor. Bergskor används för att centrera de krafter från lasten som uppstår ner i berget och för att stora skador på pålspetsen ej skall uppstå (Olsson & Holm, 1993).

Vid utformning och dimensionering av bankpålning finns i TK Geo 13 vissa krav uppsatta. Bankpålningen skall utformas så att all last från banken förutom fyllningsmaterial mellan pålarna, pålplattorna och under eventuell armering bärs av pålarna. Detta kräver att alla ingående komponenter har erforderlig bärlighet för att bära lasten från banken och trafiken. Avståndet mellan pålarna skall väljas så att valvverkan kan uppstå så att lasterna helt och hållet bärs av pålarna. Avståndet mellan pålarna måste dessutom väljas så att det är fritt avstånd mellan pålplattorna (Trafikverket, 2016).

Det lastfördelande jordlagrets tjocklek skall utformas enligt ekvation 2.1 med de mått som visas i figur 2.2 (Trafikverket, 2016).



Figur 2.2 Lastfördelande jordlager vid bankpålning (Trafikverket, 2016).

$$t > 1,5 * (c - a) \quad (2.1)$$

Där

$c$  Är centrumavståndet mellan pålarna

$a$  Är pålplattans kantmått

Dock får det lastfördelande jordlagrets tjocklek  $t$  ej underskrida 1 meter. Minsta tillåtna höjd för hela bankhöjden  $h$  är 2,5 meter (Trafikverket, 2016).

## 2.2.2 Utförande

Utförandet av installation av pålar som används vid bankpålning varierar beroende av vilken metod som används. Generellt kan installationen av pålar delas in i två kategorier massundanträngande pålar och icke massundanträngande pålar, som ofta är borrade pålar. Massundanträngande pålar inkluderar slagna pålar som under installationen tränger undan jorden runtom pålen (Knappet & Craig, 2012). Massundanträngande pålar kan i sin tur delas in i olika kategorier. En kategori kallas för mantelburna pålar. Mantelburna pålar överför laster via pålens yta (manteln) till den omgivande jorden. För pålar installerade i lera kallas pålarna för kohesionspålar på grund av de lastbärande kohesionskrafter mellan pålens mantelyta och leran. Medan för pålar installerade i sandiga eller siltiga jordar kallas påltypen för friktionspålar efter den bärande friktionskraft som uppstår mellan pålens mantelyta och jorden. En annan typ av massundanträngande påle är spetsburna pålar. Spetsburna pålar slås ner till berg eller till ett bärkraftigt jordlager och överför där laster huvudsakligen via pålens spets (Axelsson & Baker, 2007).

Vid installation av massundanträngande pålar är en vanlig metod att slå ner pålar genom att använda en hydraulhejare. Användandet av en hydraulhejare innebär att en vikt (hejare) lyfts med en hydraulkolv till en viss fallhöjd. Hydraulkolven dras sedan tillbaka snabbare än vad hejaren faller och vikten får på så sätt falla fritt ned och träffa pålen. Hejarens tidigare lägesenergi överförs på detta sätt in i pålen och trycker ner den i marken. Den fallhöjd som i Sverige normalt används är mellan 0,8 och 1,2 meter och hejarvikten brukar variera mellan 3 och 9 ton. Vid val av hejare är det oftast att föredra en så tung hejare som möjligt. Detta eftersom då en tung hejare används uppstår en stötvåg med lång varaktighet som medför att en lägre fallhöjd kan användas samtidigt som en god drivbarhet uppnås. En tung hejare leder också till att mindre tryckspänningar uppkommer i pålen och minskar då risken för utmattning. Dessutom gör en lång och varaktig stötvåg att tryckspänningar distribueras genom en större längd av pålen. Detta är fördelaktigt då risken för att icke önskade dragspänningar skall uppstå någonstans i pålen då minimeras (Axelsson & Baker, 2007).

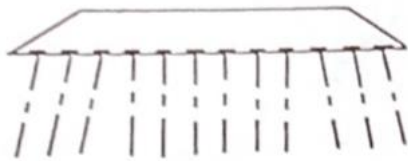
En annan metod att installera massundanträngande pålar på är att med hjälp av en vibrationshejare vibrera ner pålar i marken. En Vibrationshejare drivs av en motor som roterar en eller flera par vikter som pådriver en pulserande kraft i pålens längdriktning (Olsson & Holm, 1993). Att vibrera ner pålar har visat sig vara effektiv i vissa fall. Dock har metoden vissa nackdelar då stora dragspänningar i pålen kan uppkomma och bärformågan hos pålarna är i genomsnitt lägre än slagna pålar (Axelsson & Baker, 2007).

Den andra stora kategorin av pålar är de icke massundanträngande pålarna. Icke massundanträngande pålar tillverkas vanligen genom att jord tas bort genom borrning av ett



hål där pålen skall stå. Därefter gjuts betong på plats direkt i hålet för att på så sätt bilda en påle (Knappet och Craig, 2012). Skall pålen göras spetsburen borras hålet till berg eller till ett bärkraftigt jordlager. Är pålen tänkt att vara mantelburen borras schaktet tills erforderlig mantelbärförmåga för att bära den tänkta lasten har uppnåtts. Beroende av hur djup pålen görs och i vilka markförhållanden den installeras i behöver schaktväggarna i hålet ibland stabiliseras. Detta kan göras med skarvbara borrhör som slås, trycks eller vrids ner för att stabilisera hålet. Under själva borrhandet kan det också användas en borrhväska som ofta består av en blandning mellan bentonitlera och vatten som har till syfte att stabilisera schakten (Olsson & Holm, 1993).

Vanligtvis installeras pålar raka. Pålarna kan dock även slås lutande under bankens krön, vanligast i en lutning 4:1. Den största anledningen till att installera pålarna lutande är för att förstärka banksläntens stabilitet. Lutningen på pålarna blir vinkelrätt mot bankens längdriktning så att huvudet är placerat närmare bankens vägmitt än spetsen på pålen. Pålarna slås vertikalt under bankens centrala del enligt figur 2.3 (Stål & Wedel, 1984).



Figur 2.3 Bilden illustrerar lutning och vertikala pålar under bankens slänt och centrum (Stål & Wedel, 1984).

Efter att pålning har genomförts och pålarna kapats till rätt höjd sammankopplas pålarna med pålplattor. Pålplattor skall gjas centriskt över pålarna om de gjuts på plats. Är pålplattorna förtillvillverkade skall de anläggas centriskt över pålen med så god anslutning mot pålhuvudet som möjligt. Underlaget som pålplattorna anläggs på skall var jämnt och horisontellt. Vid användandet av platsgjuten pålplatta är det viktigt att marken inte suger vatten från betongen. För att förhindra det kan något plastfolieliknande material användas (Vägverket, 1995).

Nästa steg i utförandeprocessen är att lägga ut det lastfördelande jordlagret. Detta görs oftast med en lättare bandvagn. Har markytan en sämre hållfasthet fylls avståndet mellan pålplattorna oftast ut med en gripskopa eller grävmaskin. Fördelningen av det lastfördelande jordlagret läggs ut lagervis och kompakteras efter varje utlagt lager. Därefter genomförs utläggningen av bankfyllningen. Bankfyllningen läggs även den ut lagervis i vägens längdriktning över hela fyllningsbredden (Vägverket, 1995).

### 2.2.3 Provning

Provning av pålar är nödvändigt för att säkerställa kvalitén på pålningen som utförs. Provning kan göras på flera olika sätt och i olika syften. Oftast görs provbelastning av pålar som kan genomföras i olika skeenden av ett projekt. Det kan dels göras prover tidigt i projektet för att bestämma vilken pålningsmetod eller utrustning man vill använda eller vilken pållängd som krävs. Provpålning och provbelastning av pålar kan också göras som en del i projekteringen då resultaten från tester kan användas för att dimensionera pålarna som används i den slutgiltiga produktionen. Dessutom kan prover göras som en produktionskontroll under själva pålningsarbetet för att exempelvis säkerställa att pålarnas bärighet överensstämmer med vad som är projekterat (Olsson & Holm, 1993).

Provbekastning av pålar bör helst inte utföras direkt efter att pålen slagits ned. Detta eftersom nedslagning av pålar påverkar den omgivande jorden mycket och en minskning av jordens hållfasthet oftast inträffar direkt närmast pålen. En succesiv hållfasthetsökning brukar därefter inträffa beroende av vilken jord pålen är installerad i och hur den har installerats. För att få rättvisande resultat är det därför att föredra att vänta några veckor med att göra provbelastningar (Olsson & Holm, 1993).

Provbekastning av pålar kan göras både genom tryckbelastning och dragbelastning där tryckbelastning är den vanligaste metoden och den metod som i fortsättningen behandlas. Provbekastningen kan dessutom utföras antingen statiskt eller dynamiskt där dynamisk tryckbelastning är det som utförs mest (Olsson & Holm, 1993).

Statisk provbelastning utförs framförallt på mantelburna pålar men kan i undantagsfall utföras på spetsburna pålar. Statisk provbelastning syftar till att bedöma pålens bärförmåga och för att bestämma vilken pållängd som kan krävas. Metoden görs antingen som en del i projekteringen eller i början av byggskedet för att bedöma om tidigare beräkningar och antaganden är vettiga. Statisk provbelastning kan utföras på olika sätt. Till exempel genom stegvis pålastning, konstant nedpressningshastighet, cyklisk provbelastning eller med långtidsbelastning med konstant last. Stegvis pålastning görs oftast för att beräkna pålens brottlast och innebär att pålastning sker med jämna mellanrum där sättningen av pålhuvudet kontinuerligt mäts. Provbekastning med konstant nedpressningshastighet görs också oftast för att bestämma pålens brottlast och utförs genom att pålen kontinuerligt pressas nedåt med en låg hastighet. Cyklisk provbelastning utförs för att bestämma en påles kryplast och sker i cykler där pålen belastas med en maximilast och en last som är hälften av maximilasten i omgångar som är lika långa. Belastningen sker i cykler tills pålens rörelse nästan avstannat innan en lastomgång med högre last påförs. Detta fortsätter tills pålens kryplast har uppnåtts. Med en påles kryplast menas den lastmängd där fortsatta belastningar kan göras utan att ytterligare stora sättningar uppstår. Slutligen genomförs ibland också långtidsbelastning med konstant last. Det syftar till att studera hur krypsättningar uppstår och genomförs under lång tid (Olsson & Holm, 1993).

Dynamisk provbelastning eller stötvågsmätning som det också kallas är ett annat väl använt sätt att utföra provbelastning på. Dynamisk provbelastning utförs genom att en stötvåg alstras i pålen genom ett slag med en hejare. På pålen är en trådtöjningsgivare och accelerometrar fastsatt som mäter sjunkningen och accelerationen som slaget genererar. Vanligtvis är det pålkranen som slagit ner pålen som även slår testslaget. Det kan krävas relativt höga fallhöjder på hejaren för att pålens skall sjunka ner tillräckligt mycket i jorden för att mätaren skall ge utslag (Alheid et al., 2014).

På hur stor mängd och på vilka av pålarna i ett projekt som det rekommenderas att prover görs på är svårt att avgöra och sätta upp riktlinjer kring. Detta eftersom jordens geotekniska egenskaper både mellan och inom olika projektområden kan skilja sig så mycket åt. Generellt ska de valda pålarna representera de geotekniska förhållandena så bra som möjligt med avseende på installationssätt, verkningssätt och markförhållanden. Pålarna som väljs ska helst vara så utspridda över projektområdet som möjligt och huvudsakligen väljs pålar inom de markområdet med förväntat sämst markförhållanden (Alheid et al., 2014).

## 2.3 Kalkcementpelare

Kalkcementpelare är en jordförstärkningsmetod som syftar till att förstärka lösa jordar genom inblandning av kemiska bindemedel som sedan reagerar med jorden (Swedish Standards Institute [SIS], SS-EN 14679:2005). Jordförstärkningsmetoden går ut på att stabilisera jorden i cirkulära pelare genom användandet av ett blandningsverktyg som blandar jorden med ett bindemedel. Bindemedlet består vanligen av en blandning mellan kalk och cement. Därav namnet kalkcementpelare. Kalkcementpelare används både för att reducera sättningar och för att öka stabiliteten i exempelvis väg och järnvägsbankar, som är ett vanligt tillämpningsområde. Vanligtvis används kalkcementpelare i leror men fungerar även i andra mer grovkorniga jordar (Sveriges Geotekniska Förening [SGF], 2005).

Utvecklingen av bindemedelsstabiliserade pelare startade i Sverige och Japan under slutet av 1960-talet men började användas i praktiken i större utsträckning under mitten av 1970-talet. Från början användes i Japan ”den torra metoden” där grovkornig osläckt kalk användes som bindemedel. I Sverige vid ungefär samma tidpunkt började också ”den torra metoden” användas. Då med kalk i pulverform som bindemedel. ”Den våta metoden” utvecklades också i mitten av 1970-talet i Japan där en blandning mellan cement och vatten användes som bindemedel. Sedan dess har användandet av kalkcementpelare ökat kraftigt och spridits till många delar av världen (SIS, SS-EN 14679:2005).

### 2.3.1 Utformning

Kalkcementpelare är en mycket flexibel jordförstärkningsmetod och kan utformas på många olika sätt för att tillmötesgå de krav som konstruktionen ställer.

Kalkcementpelarförstärkningen kan göras ner till det djup som önskas, dock maximalt ner till cirka 25 meter i Sverige i dagsläget. Dimensioner på tvärsnittet på pelarna kan också varieras. Vanliga pelardiametrar som används brukar vara mellan 0,6 och 1,0m (SIS, SS-EN 14679:2005). Parametrar såsom bindemedel och installationsmönster kan också varieras mycket beroende av de platsspecifika omständigheter som råder vid varje byggplats (SGF, 2005).

#### 2.3.1.1 Bindemedel

De bindemedel som används för att stabilisera jordar varierar stort beroende av vilka egenskaper jorden har. Av den anledningen är det viktigt att förstå de olika reaktionsprocesser som olika bindemedel har då det är helt avgörande för det slutgiltiga resultatet. De bindemedel som idag normalt används är cement och osläckt kalk. Även olika varianter av masugnsslagg och flygaska förekommer (Janz & Johansson, 2002).

Cement är ett hydrauliskt bindemedel som i reaktion med vatten bildar en hård massa. Hydratationen börjar genast när cementen kommer i kontakt med vatten i jorden. Reaktionen går relativt snabbt och efter 3 dagar har över hälften av cementen reagerat. Till skillnad från cement så reagerar osläckt kalk mycket långsammare. Processen när kalk stelnar inleds med att osläckt kalk ( $\text{CaO}$ ) reagerar med vatten och bildar kalciumhydroxid ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Den reaktionen ger inget direkt bidrag till hållfastheten i pelaren men i och med att vatten åtgår i reaktionen ökas ändå stabiliteten i pelaren något. Det som istället huvudsakligen bidrar till ökad hållfasthet är processen där kalciumhydroxid reagerar med mineral i jorden som har puzzolana egenskaper (Janz & Johansson, 2002).

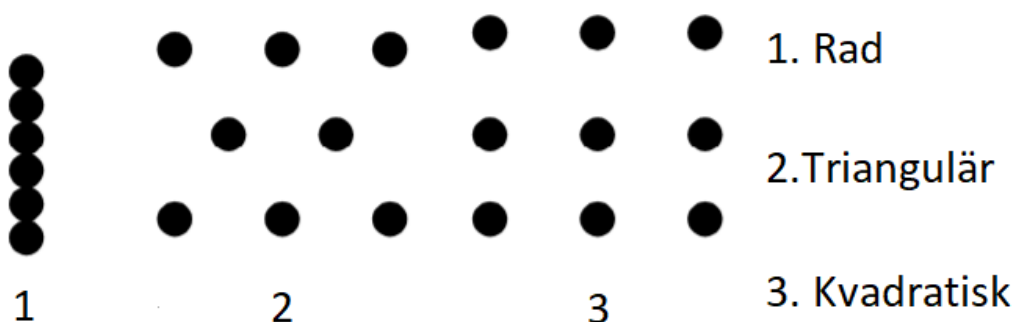
I leriga och siltiga jordar har en kombination av lika delar cement och bränt kalk visat sig ge bra resultat och det är en bindemedelsblandning som används mycket i Sverige. I jordar med mer organiskt innehåll används huvudsakligen endast cement eller en blandning av cement och något annat tillsatsämne som bindemedel (Janz & Johansson, 2002).

Hur väl olika bindemedel stabiliserar jorden är starkt kopplat till hur finkorniga de reagerande bindemedlen är. Generellt kan det sägas att ju mer finkornig ett bindemedel desto större specifik yta har det som ger bättre förutsättningar för att en reaktion ska ske (Janz & Johansson, 2002).

Vad som bestämmer hur mycket bindemedel som behöver användas för att stabilisera en viss typ av jord är framförallt markens vatteninnehåll. Generellt kräver en jord med högt vatteninnehåll mer bindemedel för att stabiliseras. För att ta reda på hur mycket bindemedel en viss typ av jord kräver för att stabiliseras går det att använda sig av det så kallade vattenbindemedelstalet, vbt. Vattenbindemedelstalet är en kvot mellan vatteninnehållet i jorden och mängden bindemedel i jorden och används under förutsättningen att det valda bindemedlet har önskvärd stabiliserande effekt i den aktuella jorden (Janz & Johansson, 2002).

### 2.3.1.2 Installationsmönster

Kalkcementpelare kan installeras i marken i olika mönster beroende av i vilket syftet förstärkningen genomförs. Syftar pelaren till att reducera sättningar är det vanligt att placera pelarna i liksidiga kvadratiske eller triangulära formationer. Syftar kalkcementpelarna istället till att minska stabilitetsproblem vid exempelvis höga banker eller i branta skärningar är det vanligt att de installeras i överlappande rader som är vinkelräta till den förväntat mest kritiska glidytan. Anledningen till att de placeras i rader är för att undvika knäckning då överlappande pelare i rader står emot momentraft bättre än enstaka pelare. Dessutom är det en säkerhetsåtgärd för att minimera risken att lokala svagheter i enstaka pelare inte orsakar att konstruktionen kollapsar (SIS, SS-EN 14679:2005). I figur 2.4 visas några vanliga installationsmönster för kalkcementpelare.



Figur 2.4 Installationsmönster för kalkcementpelare, Modifierad bild (SIS, SS-EN 14679:2005).

### 2.3.2 Utförande

Processen för att tillverka kalkcementpelare är komplex och innefattar många delmoment där många olika faktorer påverkar slutresultatet (Larsson, 2003). Kortfattat inleds utförandeprocessen med att ett blandningsverktyg roteras ner till ett förbestämt djup. Vid bottenläget ändras rotationsriktningen och blandningsverktyget dras uppåt med konstant hastighet samtidigt som bindemedlet matas ut med ett konstant flöde. Utförandet kan dock variera då bindemedlet vid vissa metoder injiceras vid penetrationsfasen och i andra fall både vid penetrationsfasen och tillbakagångsfasen (SIS, SS-EN 14679:2005). Den vanligaste tillvägagångsprocessen för installation av en kalkcementpelare är dock den förstnämnda. För att beskriva den vanligaste installationsprocessen mer i detalj kan processen delas in i följande tre faser (Larsson, 2003);

- Penetration av blandningsverktyget till önskat djup
- Utspridning av bindemedlet
- Fortsatt utblandning av bindemedlet genom molekylär diffusion

Den första fasen, penetration av blandningsverktyget till önskat djup syftar främst till att skapa förutsättningar för att bindemedlet ska blanda sig så bra som möjligt med jorden i efterföljande faser. Att fullständigt blanda upp jorden kan ha positiv påverkan för att få till den omrörning av jorden som sedan möjliggör att bindemedlet och jorden kan blanda sig med varandra (Larsson, 2003).

Blandningsverktyg som används för detta är ofta utrustade med skenor som syftar till att blanda om jorden. På vissa blandningsverktyg är skenorna monterade med en relativt liten vinkel i förhållande till horisontalplanet. Detta medför att det går åt ganska lite energi för att penetrera jorden och de skjuvkrafter som krävs för att fullständigt blanda om jorden då ej erfordras. Som en konsekvens av detta blir jorden inte omblandad i en så stor utsträckning. Istället kan ett blandningsverktyg med skenor med en större vinkel i förhållande till horisontalplanet användas. På så sätt tvingas jorden att omblandas i större utsträckning. En högre hastighet på den roterande axeln gör också att jorden blandas om mer. Detta gör dock att mycket energi kommer gå åt om samma höga lutning på skenorna skall användas (Larsson, 2003).

Den andra fasen i installationsprocessen är själva utspridningen av bindemedlet. I Skandinavien där den torra metoden används är bindemedlet i pulverform och förvaras i tankar. Bindemedlet distribueras via en slang ner till blandningsverktyget med hjälp av tryckluft där det sedan sprutas ut just ovanför blandningsverktyget. Detta sker samtidigt som blandningsverktyget dras upp ur jorden och roterar åt motsatt håll mot vad den gjorde när den fördes ner i jorden. Den enskilt viktigaste aspekten vid utspridningen av bindemedlet är att pulverblandningen sprids ut så jämnt som möjligt över hela tvärsnittet med så jämnt flöde som möjligt. Detta skall göras för att uppnå så små koncentrationsskillnader av bindemedlet i pelaren som möjligt (Larsson, 2003).

Efter att hela installationsprocessen är genomförd fortsätter blandningsprocessen i den nytillverkade kalkcementpelaren. Detta sker genom diffusion. Diffusion bygger på att variansen i koncentration i pelaren mellan de ingående komponenterna med tiden minskar. Dock sker denna utjämning av koncentrationsskillnader på olika sätt då kalk respektive cement har olika diffusionsegenskaper. Kalk reagerar med vatten och bildar kalciumhydroxid som är i upplöst tillstånd och då kan diffundera på ett sätt som bidrar till en ökad grad av

omblandning innan det stelnar. När däremot cement blandas med vatten stelnar blandningen mycket snabbare vilket gör att det kräver en högre grad av omblandning för att cement skall bli tillräckligt jämnt fördelad över pelaren (Larsson, 2003).

Den utrustning som används i norden för att installera kalkcementpelare kan tillverka pelare som är upp till 25 meter djupa och har en diameter på 0,6 till 1,0 m. Det är dessutom möjligt att installera pelarna i upp till 70° lutning i förhållande till vertikalplanet. I Japan finns utrustning som gör det möjligt att installera pelare till ett djup av ca 33 meter och de har en diameter på mellan 0,8 och 1,3 m (SIS, SS-EN 14679:2005).

### 2.3.3 Provning

För att kalkcementpelare ska fungera bra som jordförstärkningsmetod krävs att tester genomförs med de specifika markförhållanden som råder vid varje unikt projekt. Tester genomförs i regel både i laboriemiljö och i fält på byggplatsen för att förutsättningarna ska bli så lika som möjligt vid färdig byggnation. Oftast görs först tester i labb för att undersöka vilket bindemedel och vilken mängd bindemedel som ger det bästa resultatet. Dessa undersökningar görs för alla jordlager som finns i den jordlagerföljd som råder på byggplatsen. Därefter görs testundersökningar in situ för att säkerställa att det bindemedel och den doseringen som valts även är applicerbar vid byggplatsen. Ibland skiljer sig resultaten från labbtesten från resultaten som erhålls vid in situ testen, då får processen göras om tills resultaten från test pelarna in situ ligger tillräckligt nära de önskade resultaten (SIS, SS-EN 14679:2005).

Vilken typ av test som genomförs beror på i vilket syfte kalkcementpelaren är installerad. Är kalkcementpelaren installerad för att reducera sättningar är det av störst intresse att ta reda på elasticitetsmodulen. Är KC-pelaren istället installerad för att bättra på stabiliteten i konstruktionen är hållfasthetsparametrar och dess förmåga att stå emot krafter mer viktig (SIS, SS-EN 14679:2005).

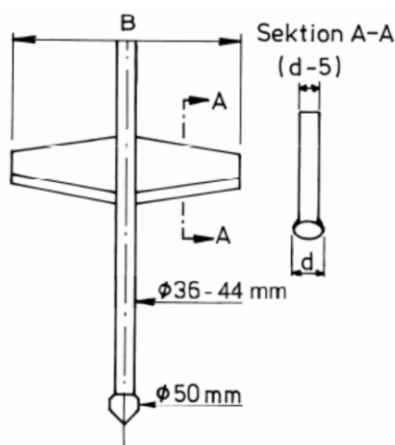
De tester som görs i laborier är dels tester där man blandar jorden med olika bindemedel eller olika mängd bindemedel. Det görs även tester med andra tillsatsmaterial som kan ha andra funktioner för att uppnå bästa möjliga resultat för det specifika syftet pelaren är installerad för. Exempel på andra tester som kan göras i laboriemiljö är utvärdering av borrhov tagna från pelare från olika djup in situ. Borrhov kan användas för att utvärdera exempelvis deformationsegenskaper och för att se hur homogen pelaren är. Det är inte ovanligt att borrhoven kan bli lite deformerade eller störda när de hanteras vilket behöver tas i beaktande när man bedömer resultaten. Det test som används för att bestämma olika hållfasthetsparametrar i jorden är oftast enaxiella kompressionsprov. Om det finns sprickor i borrhoven kan det ha stor påverkan på resultaten och då är det istället rekommenderat att triaxiala kompressionsprov utförs. För att bestämma jordens kompressionsmodul görs framförallt ödometerförsök. Den hydrauliska konduktiviteten kan också vara användbar att bestämma men det finns inga standardiserade testmetoder för att bestämma den (SIS, SS-EN 14679:2005).

Tester som görs i fält är likt i laboriemiljö tester där KC-pelarens hållfasthetsparametrar och homogenitet utvärderas. Pelarens homogenitet kan bestämmas på olika sätt. Dels kan som tidigare nämnts borrhov tas, det kan också utföras olika typer av sonderingsmetoder. Dessutom kan hela pelare lyftas upp för att vidare studeras (SIS, SS-EN 14679:2005).

Det är också viktigt att bedöma hur själva utförandet av installationen av pelaren påverkar slutresultatet. Det som kan bedömas är till exempel penetrationsfasen och tillbakagångsfasens hastighet, blandningsverktygets rotationshastighet, om bindemedlet distribueras med ett jämnt flöde genom hela pelaren och om pelarna överlappas som det är tänkt (SIS, SS-EN 14679:2005).

För att utvärdera olika hållfasthetsparametrar och kontinuitet i pelaren görs CPT-sondering i pelaren. Dock finns det nackdelar med vanlig CPT-sondering då den bara gör mätningar på en väldigt begränsad del av tvärsnittet av pelaren. Det är dessutom svårt att få spetsen på sonden att hålla en helt vertikal riktning ner genom pelaren då den tenderar att vika av där pelaren är som svagast (SIS, SS-EN 14679:2005).

Istället utförs framförallt testmetoden pelarsondering. Pelarsondering är den testmetod som huvudsakligen används för att uppskatta den odränerade skjuvhållfastheten i pelaren. Metoden utförs genom att en vingförsedd sond pressas ned i pelaren med sondens spets i mitten av pelaren. Sondens tryck successivt ned och neddrivningskraften som åtgår registreras under hela förloppet. Det tryck som uppstår på spetsen och vingarnas basytor är det som mäts och senare används för att räkna ut den odränerade skjuvhållfastheten. Olika storlekar på sonda används för olika pelare som beror på pelarens diameter. Normalt är avståndet mellan vingarna på sonden cirka 75% av pelarens diameter eller minst 100mm kortare än pelarens diameter. För pelare som är upp till 8m djupa och har en maximal skjuvhållfasthet på ca 150 kPa brukar det oftast gå att trycka ner sonden och få bra pålitliga resultat. För längre pelare däremot förborras först ett styrande centrumhål genom pelaren för att sonden ska hålla sig i centrum av pelaren och inte vika av och hamna utanför pelaren. Denna sondering med förborring kan göras för pelare som har en skjuvhållfasthet på upp till 300 – 350 kPa (Larsson, 2006). I figur 2.5 visas en bild på en pelarsond med tillhörande mått som användas för att få fram den kraft i sondspetsen som krävs för att penetrera pelaren.



Pelardiameter (mm)	Bredd, B (mm)	Tvärmått, d (mm)	Tvärsnittsarea (mm <sup>2</sup> )
500	400	20	8963
600	500	15	8713
800	600	15	10213
Massstab.	400	20	8963

Figur 2.5 Pelarsond (Trafikverket, 2016).

Vid utförandet av pelarsonderingen pressas sonden ner med en konstant hastighet av 20 mm/s som högst får variera mellan 4 mm/s åt båda håll. Pelarens odränerade skjuvhållfasthet utvärderas sedermera i enlighet med ekvation 2.2 (Trafikverket, 2014);

$$C_{u,pel} = 0,1 * \left( \frac{Q_{Spets}}{A_{sond}} \right) \quad (2.2)$$

Där

$Q_{Spets}$   
 $A_{sond}$

Är den kraft i sondspetsen som krävs för att penetrera pelaren  
Är sondens tvärsnittsarea



## 3 Markförhållanden

Kalkcementpelare och bankpålning kan användas vid en mängd olika markförhållanden. Dock är de markförhållanden där båda metoderna på ett ekonomiskt gångbart sätt skulle kunna användas inte lika många. De markförhållanden där båda metoderna skulle kunna användas är i huvudsak lösa leror, vissa varianter av siltiga leror och vissa leror som innehåller en mindre mängd organiskt material (Hartlen & Wolski, 1996).

Jordar där bankpålning skulle kunna användas men där kalkcementpelare inte bör användas är friktionsjordar som silt, sand och grus. Mark där ingen av metoderna är lämplig att använda är marker som uteslutande består av organiskt material som torv och gyttna och övriga jordar som har stort organiskt innehåll (Hartlen & Wolski, 1996), (SGF, 2005). För att i rapporten kunna göra en jämförelse metoderna emellan kommer rapporten i fortsättningen endast behandla grundläggning i mark där båda metoderna kan användas, vilka är leror, siltiga leror och leror med mindre mängd organiskt innehåll.

### 3.1 Torv, gyttna och organiska jordar

Torv bildas från sjöar och vattendrag som växer igen eller från fasta markområden som utsätts för mycket nederbörd och därav sumpas igen. Torv består av ofullständigt nedbrutet organiskt material och bildas framförallt på kärr och mossar. Gyttna består också av ofullständigt nedbrutet organiskt material men har till skillnad från torv bildats genom att organiskt material har transporterats via sjöar och vattendrag till platsen och där sedimenterats. Gyttna har av den anledningen en annan mer sedimentär struktur jämfört med torv där växtmaterial har levt och dött på samma ställe och det organiska materialet därför är mer sammanflätat (Sveriges geologiska undersökning, u.å).

Det finns dock mängder med organiska jordar som inte helt och hållet består av ofullständigt nedbrutet organiskt material. Många jordar är till viss del uppbyggda av organiskt material och till viss del av annan mineraljord. Till exempel är det vanligt med lerjordar som kan ha en varierande mängd organiskt innehåll (Hartlen & Wolski, 1996).

Byggandet av vägar och järnvägar på torvmarker är inte helt enkelt och länge har byggandet av infrastrukturprojekt på dessa markförhållanden undvikits. Den främsta anledningen till det är den låga hållfasthet som ofta råder på torvmarker som medför en risk för att stora sättningar kan uppkomma. Dock har det ändå visat sig vara möjligt att med bra genomförda markförstärkande åtgärder konstruera vägar eller järnvägar som uppfyller de krav som finns uppsatta. Stabilitetsproblematik brukar normalt inte vara ett problem vid uppförande av vägbankar. Normalt är det istället sättningar som är mest kritiskt med potentiellt både stora sättningar och sättningar som pågår under lång tid (Vesterberg, Carlsten & Lindh, 2016).

#### 3.1.1 Bankpålning på torv, gyttna och organiska jordar

På torvmarker används bankpålning mycket sällan. Pålning överlag anses ofta som ett för dyrt alternativ i jämförelse med bindemedelsstabiliserande åtgärder. I de undantagsfall där pålning ändå används är det i huvudsak pålar som är sammankopplade med påldäck som används där pålarna har slagits ned till fast berg och därmed är spetsbärande (Vesterberg, et al., 2016).

En ytterligare anledning till att pålning inte används i så stor utsträckning på organiska jordar är för att det är svårt att få utrustningen på plats. Den låga bärförmågan hos organiska jordar

gör att det ofta krävs att stockar eller liknande läggs ut för att pålkranen ska kunna få en bra grund att stå på (Hartlen & Wolski, 1996). Svårigheter med att få utrustningen på plats diskuterades även i en intervju med M. Dahlström (2 april, 2019). Enligt honom kunde det då mycket dåliga markförhållanden råder ibland krävas att ännu mer omfattande kringliggande stabiliserande åtgärder är nödvändigt att göra för att kunna genomföra pålningen. Ibland måste det till exempel byggas provisoriska vägar för att få pålkranen på plats.

### 3.1.2 Kalkcementpelare på torv, gyttja och organiska jordar

På torvmarker är kalkcementpelare inte särskilt frekvent använt. Oftast är hållfastheten så dålig att stabilisering med bindemedel hellre sker med masstabilisering. Dock är det möjligt att markförstärkning kan göras där en kombination av masstabilisering och kalkcementpelare används. Detta diskuterades till exempel vid byggandet av en delsträcka på Roslagsbanan (Vesterberg, et al., 2016).

Grundläggning med kalkcementpelare fungerar då bättre i organiska jordar som består av både lera och en viss mängd organiskt material. För dessa leror krävs oftast en större mängd bindemedel för att de ska stabiliseras. Anledningen till det är att de organiska delarna av jorden innehåller få fasta partiklar som är svåra att sammanfoga. Dessutom är vattenkvoten och porositeten i regel högre i organiska jordar vilket gör att jordar av den typen kräver mer bindemedel inblandat i sig. Det bör dessutom beaktas att bindemedlen kalk och cement reagerar olika i leror med rikt organiskt innehåll jämfört med rena leror. Vanligtvis används inte kalk som bindemedel i så stor utsträckning i organiska jordar då kalkens bidragande till hållfasthetstillväxten i jorden främst beror av puzzolanreaktioner med mineral i jorden. Dessa mineraler finns inte i någon stor utsträckning i organiska jordar varför de inte används i någon större omfattning. Dessutom kan organiska jordar innehålla humussyror som ytterligare förhindrar reaktionen mellan kalciumhydroxid och mineraler med puzzolana egenskaper (Janz & Johansson, 2002).

Installationsprocessen för kalkcementpelare på organiska jordar brukar till skillnad från bankpålning fungera relativt smidigt. På grund av de oftast mycket kortare CC-avstånden går det att vid installationen stabilisera sig framåt utan att behöva göra någon kringliggande stabilisering (M. Dahlström, personlig kommunikation, 2 april, 2019).

## 3.2 Lera och siltiga leror

Lera är en jordart som beskrivs vara väldigt finkornigt och där över 15% av viktinnehållet består av partiklar med en diameter mindre än 0,002mm (Statens geotekniska institut, 2019).

Leran kan delas in i flera kategorier där namnet beskriver fin- och grovheten av innehållet. Man börjar därför med att dela in leran i lättleror eller grovleror, där lerinnehållet är 15–25%, och finleror, med ett lerinnehåll över 25%. Vidare delas finleror i ytterligare kategorier, mellanlera, styv lera och mycket styv lera. Mellanlera innehåller 25–40% ler, styv lera innehåller 40–60% ler och mycket styv lera består av mer än 60% (SGI, 2019).

Lerpartiklarna är resultatet av den kemiska eller mekaniska omvandlings- och vittringsprodukt av flera bergarter och kan innehålla kaolinit, montmorillonit och illit som är lermineraler. Glimmer, kvarts, organiska föreningar och magnesium är andra mineraler som kan finnas i vittringsprodukten. Rika lermineral vittringsjordar bildas vid kemisk vittring. Majoriteten av alla leror, till exempel djuphavslera, glaciallera och postglacial lera har

tidigare sedimenterats. Med det menas att lerpartiklarna har avlagrats långsamt som ett sediment på botten och transporterats till platser via vattendrag till hav eller sjöar (SGI, 2019).

Ur ett grundläggningsperspektiv anses lera vara en besvärlig jordart eftersom utan grundförstärkning leder det till stora sättningar och är väldigt kompressibel (SGI, 2019).

Siltjordar har korn som är väldigt svårt för ögat att urskiljas och kan transporteras lätt med vatten och vind. Den kornfraktioner som dominerar mest är 0,002 till 0,06 mm i diameter (SGI, 2019).

Siltjorden är vanligen fast i sitt torra tillstånd, men har förmågan att hålla kvar det vatten som lätt sugs upp. Siltjorden blir flytbenägen när den blivit vattenmättad, vilket leder till att om jorden utsätts för vibrationer eller rörelser kan den bli flytande. Vid exempelvis arbete i schakt under grundvattenytan kan siltjorden få en konsistens likt välling (SGI, 2019).

Silt anses även vara en tjälfarlig jordart och har i flera vägprojekt resulterat till att tjälskador uppstått. Tjälskador innebär att det uppstår mönster likt sprickor på väg och andra anläggningar byggda på silt (SGI, 2019).

### **3.2.1 Bankpålning på lera och siltiga leror**

Enligt M. Dahlström (personlig kommunikation, 2 mars 2019), är bankpålning en grundkonstruktion som fungerar väldigt bra i lera och siltiga leror, men också andra jordtyper. Beroende på djupet är det möjligt att använda sig av spetsburna pålar eller kohesionspålar. Lerans hållfasthet ökar med djupet. Eftersom syftet med pålning är att flytta ner lasten till starkare bärlager kan sättningsproblematiken på så sätt minskas. Bankpålning används därför oftast vid byggnation över mäktiga lerlager.

### **3.2.2 Kalkcementpelare på lera och siltiga leror**

Kalkcementpelarens bidrar till att öka markens bärcapacitet så att byggnation av till exempel väg kan genomföras. Användningen av kalkcementpelare i lera minskar sannolikheten för att sättningar skall uppstå.

Fördelarna med kalkcementpelare är många, bland annat förhindring av ras i slänter. I en spontad grop kan upptryckning av lera förekomma, därför är det inte ovanligt att motverka detta med hjälp av att sätta KC-pelare i botten (Keller grundläggning AB, 2019).

## 4 Ekonomisk analys

Som en del i detta examensarbete har en ekonomisk jämförelse mellan grundläggningsmetoderna bankpålning och Kalkcementpelare genomförts. Jämförelsen bygger på två kostnadsberäkningar. En kostnadsberäkning för varje grundläggningsmetod där samma vägsträcka med samma markförutsättningar har använts som underlag. Data för jordegenskaper, priser för material och andra kostnader har tillhandahållits av geoteknikern Marcus Dahlström på konsultföretaget Inhousetech. Den vägsträcka som kostnadsberäkningen genomförts på går på lera och har valts med bakgrunden att båda grundläggningsmetoderna skulle kunna vara tänkbara att använda i de markförhållandet. I beräkningsexemplet uppgår lerans mäktighet till 27 m. Tungheten för de olika jordlagren var  $17 \text{ kN/m}^3$  för torrskorpeleran de första 2 metrarna. För djupet 2–7 meter var tungheten  $16 \text{ kN/m}^3$ . För djupet 7–20 meter var tungheten återigen  $17 \text{ kN/m}^3$  och för djupet 20–27 meter var tungheten  $18 \text{ kN/m}^3$ . Under lerlagren fanns ett 15 m mäktigt lager av friktionsjord bestående av sand/morän med en tunghet på  $20 \text{ kN/m}^3$ . Under sand/morän lagret finns den fasta berggrunden på djupet 42 m. Grundvattenytan är i jordlagerföljden 2 m under markytan och grundvattnet är i hydrostatiskt tillstånd.

Vägbanken som skulle förstärkas var fyra meter hög och vägbanan var 10 m bred. Det räknades med att förstärkningen skulle göras för en sträcka på 100m. För kostnadsberäkningen som gjordes för bankpålningen var bredden som skulle förstärkas 18m. Motsvarande siffra för den kalkcementpelarförstärkta jorden var 20m. Vägbankens slänter hade en lutning på 1:2 och lasten från vägbanken antogs orsaka full belastning ut till 2/3 av slänterna. Banken bestod av krossad sprängstensfyllning som hade en tunghet på  $19 \text{ kN/m}^3$ . Fyllnadsmaterialet från vägbanken medförde en total last från banken på  $76 \text{ kN/m}^2$ . Mer detaljerad information om underlaget för kostnadsberäkningen som har använts hittas i bilaga 1.

### 4.1 Kostnadsberäkning kalkcementpelare

Förstärkningen med kalkcementpelare som beräknades gjordes med pelare som hade en diameter på 600mm. Bindemedelsblandningen bestod av 50% kalk och 50% cement. För varje meter pelare användes 25 kg bindemedel.

För att genomföra kostnadsberäkningen bestämdes först kalkcementpelarnas CC-avstånd och stabiliseringsdjup utifrån att en tolererbar sättning för förstärkningen först beräknades. Konstruktioner där kalkcementpelare används som markförstärkningsmetod skall kontrolleras både med avseende på sättningkrav och stabilitetskrav. I detta beräkningsexempel har dock ingen stabilitetskontroll genomförts utan endast en sättningsberäkning där den maximala sättning som tolererades var 15 cm. Underlaget som användes för sättningsberäkningen var TK geo 13 kapitel 13 om djupstabilisering.

### 4.1.1 Sättningsberäkning

För sättningsberäkningen beräknades först pelarens elasticitetsmodul med hjälp av ekvation 4.1 från TR Geo 13 kapitel 13 (Trafikverket, 2016).

$$E_{pel} = 13 * c_{krit}^{1,6} \quad (4.1)$$

Där

$c_{krit}$  är pelarens odränerade eller dränerade skjuvhållfasthet i kPa.

I kostnadsberäkningen var den odränerad skjuvhållfasthet 100 kPa ner till 7 meters djup och för underliggande lerlager var den odränerade skjuvhållfastheten 150 kPa.

I nästa steg beräknades den kombinerade genomsnittliga sättningsmodulen. För att göra det beräknades först kalkcementpelarnas täckningsgrad. Med täckningsgrad menas hur stor area pelaren täcker i förhållande till omkringliggande jord. För att kunna beräkna täckningsgraden valdes ett första CC-avståndet mellan pelarna till 0,9m.

Den genomsnittliga sättningsmodulen beräknades sedan med ekvation 4.2 (Trafikverket, 2016).

$$M_{komb} = a * E_{pel} + (1 - a) * M_{jord} \quad (4.2)$$

Där

$a$  är täckningsgraden för stabiliserad jord i förhållanden till ostabiliserad jord

$E_{pel}$  är den förstärkta pelarens sättningsmodul

$M_{jord}$  är den oförstärkta jordens sättningsmodul

Efter att den kombinerade sättningsmodulen för de olika jordskikten räknats ut kunde sättningen för hela jorddjupet sedan beräknas. Sättningsberäkningen redovisas i bilaga 2. I beräkningen antogs lasten från vägbanken i den kalkpelarförstärkta jorden sprida sig med förhållandet 4:1 mot djupet. Lastspridningen under kalkpelarförstärkningen antogs ha en spridning med förhållandet 2:1 mot djupet. Anledningen till att lastspridningen i den kalkcementpelarförstärkta jorden ansattes till 4:1 mot djupet var för att det enligt en mejlkonversation med M. Dahlström (5 juni, 2019) är ett rimligt konservativt antagande som enligt erfarenhet brukar hamna i rätt storleksordning.

Resultatet från sättningsberäkningen visade att det för pelarna med CC-avståndet 0,9 m och längden 17 m erhöles en totalsättning i jorden på 15 cm. Vilket i det här fallet ansågs vara en godtagbar sättning. Det första valet av CC-avstånd visade sig därav vara ett rimligt val och ingen ändring av CC-avståndet behövde därför göras. Eftersom en pelarlängd på 17 m är en fullt rimlig längd att utföra kalkcementpelarförstärkningen på.

### 4.1.2 Kostnadskalkyl

Kostnadsberäkningen för kalkcementpelarförstärkningen baserades på de längder och kostnader redovisas i tabell 4.1 nedan. I priset per meter ingår huvudsakligen kostnaden för

bindemedel som enligt en mejlkonversation med M. Dahlström (21 maj, 2019) uppgår till cirka 2 kr/kg. Dessutom ingår i meterpriset även maskinkostnad och personalkostnader. Utöver kostnaden per meter finns det även ett styckpris för pelarna. Styckpriset finns bland annat till för att styra kostnaden beroende av hur lång pelaren är. Hade grundkonstruktionen till exempel bestått av många korta pelare hade enbart kostnaden per meter inte varit representativ för hela kostnaden. Eftersom en större kostnad då skulle genereras genom att maskinen oftare skulle behöva flyttas till nya pelare. Vilket skulle ta längre tid och bidra till ökade produktionsbortfall i jämförelse med om längre pelare hade installerats.

Tabell 4.1 Indata för kalkcementpelarförstärkningen

<b>Indata</b>	
<b>Längder</b>	
Förstärkningsytans längd	100m
Förstärkningsytans bredd	20m
CC-avstånd	0,9
Pelarlängd	17m
Pelardiameter	0,6m
<b>Kostnader</b>	
Pelare	80kr/m
Pelarmeter	70kr/m

Den kalkcementpelarförstärkta ytan beräknas till:

$$100 * 20 = 2\,000 \text{ m}^2$$

En kalkcementpelarens utnyttjade yta beräknades på följande sätt:

$$0,9^2 = 0,81 \text{ m}^2$$

Antalet pelare uppskattades till:

$$\frac{2\,000}{0,81} = 2\,470 \text{ st}$$

Total pelarlängd:

$$2\,470 * 17 = 41\,976 \text{ m}$$

Meterpriset om 70kr genererade en förstärkningskostnad på:

$$41\,976 * 70 = 2\,938\,272 \text{ kr}$$

Varje pelare kostar 80kr/st. Då det används 2 470st pelare blir den totala pelarkostnaden följande:

$$2\,470 * 80 = 197\,531 \text{ kr}$$

Den totala kostnaden för förstärkningen med kalkcementpelare visas i tabell 4.2

Tabell 4.2 Sammanställning av den totala kostnaden för kalkcementpelarförstärkningen

Typ	Kostnad (kr)
Förstärkningskostnad	2 938 272
Pelarkostnad	197 531
Total kostnad	3 135 802

## 4.2 Kostnadsberäkning bankpålning

Vid beräkning av kostnaden för förstärkningen med bankpålning användes indata enligt tabell 4.3.

Tabell 4.3 Indata för kostnadsberäkningen för bankpålning

Indata	
<b>Standardbetongpåle SP2</b>	
Bärförmåga	950 kN/m <sup>3</sup>
Tvärsnittsdimension	270x270mm
Pållängd	42m
<b>Pålplatta</b>	
Kantmått	2,2x2,2m
<b>Banken</b>	
Bankhöjd	4m
Vägbankens längd	100m
Bankmaterialets tunghet	19 kN/m <sup>3</sup>
Bankens bredd	18m
Partialkoefficient (trafiklast)	0

### 4.2.1 Dimensionering

I enlighet med TR Geo 13 kap 14 användes ekvation 4.3 för att uppskatta avståndet mellan pålarna.

$$c = \sqrt{\frac{R_d}{h * \gamma + q_t}} \quad (4.3)$$

Där

- $R_d$  är det lägsta värdet av pålens dimensionerande bärförmåga
- $h$  är bankhöjden ovanför pålplattorna
- $\gamma$  är bankmaterialets tunghet
- $q_t$  är trafiklast

Avståndet räknades ut att vara 3,5m. Vidare finns ett krav som beskrivs i TR Geo 13, kap 14.1.3.4, att platttäkningsgraden skall uppgå till minst 40% då det ej ingår någon typ av geosyntetisk armering. Vid den beräkningen användes ekvation 4.4.

$$\left(\frac{a}{c}\right)^2 > 40\% \quad (4.4)$$

Där

$a$  är pålplattans kantmått  
 $c$  är avståndet mellan pålarna

Resultatet från beräkningen med ekvation 4.4 resulterade i en täckningsgrad som underskrider 40% täckningsgrad. Detta innebar att det finns två alternativ för att få en godkänd bärförmåga. Antingen kan geosyntetisk armering användas eller så kan avståndet mellan pålarna minskas. En minskning av avstånd mellan pålarna gjordes. Det nya avståndet mellan pålarna skiljer sig i längdriktning och tvärled. I tvärled valdes CC-avståndet till 3m medan avståndet i längdriktningen ansattes till 3,4m. Detta ledde till att täckningsgraden hamnade på ca 47,5%, vilket överskrider kravet.

#### 4.2.2 Kostnadskalkyl

Kostnadskalkylen beräknades med utgångspunkt från priserna som visas i tabell 4.4. I priset per pålmeter ingår bland annat kostnaden för inköp av pålen, maskinkostnad och personalkostnader.

Tabell 4.4 Priser för bankpålningen

Typ	Priser
Pålmeter	400 kr/m
Pålplatta	3 500 kr/st
Bergsko	1 000 kr/st

Den av bankpålning förstärkta ytan beräknas till:

$$100 * 18 = 1\,800 \text{ m}^2$$

En påle bidrar till att förstärka en area av  $10,2\text{m}^2$  vilket resulterar i att följande mängd pålar behövs för att förstärka hela ytan:

$$\frac{1800}{10,2} = 176,47 \approx 177\text{st}$$

Varje påle pålas ner till berg vilket innebär att varje påle kommer att vara 42m.

$$177 * 42 = 7\,434 \text{ pålmeter}$$

Eftersom priset för en pålmeter är 400kr blir kostnaden för 7 434 pålmeter:

$$7\,434 * 400 = 2\,973\,600\text{kr}$$



En pålplatta sätts över varje påle. Priset för en pålplatta är 3 500kr. Kostnaden för totalt antal pålplattor beräknas till:

$$177 * 3\,500 = 619\,500 \text{ kr}$$

Varje påle som pålas ner till berg skall ha en monterad bergsko. En bergsko kostar 1000kr. Kostnaden för totalt antalet bergskor uppskattas till:

$$177 * 1\,000 = 177\,000 \text{ kr}$$

Den totala kostnaden för förstärkningen med bankpålning visas i tabell 4.5

*Tabell 4.5 Sammanställning av den totala kostnaden för bankpålningen*

Typ	Kostnad
Pålar	2 973 600
Plattor	619 500
Bergskor	177 000
Total kostnad	3 770 100

## 5 Miljö och klimatpåverkan

Genom användandet av bankpålning eller kalkcementpelare som grundläggningsmetod kommer olika typer av miljö- och klimatpåverkan oundvikligen att uppstå. Den miljö och klimatpåverkan som uppstår skiljer sig i många fall åt mellan de olika metoderna då olika material och olika processer krävs för respektive metod.

### 5.1 Gemensamma miljö och klimatpåverkansmoment

För båda grundläggningsmetoderna bankpålning och kalkcementpelare finns ingående moment och material som på samma sätt bidrar till miljö och klimatpåverkan. Ett delmoment som i stor omfattning bidrar till miljö- och klimatpåverkan är tillverkningen av bindemedlet cement.

#### 5.1.1 Cementtillverkning

Vid användning av bankpålning som grundläggningsmetoderna används cement som bindemedel i den betong som ingår i betongpålar och pålplattor. Cement används även i kalkcementpelare där det tillsammans med osläckt kalk fungerar som bindemedel.

Miljöpåverkan från cementtillverkning uppkommer framförallt i form av utsläpp av koldioxid. De största koldioxidutsläppen från cementtillverkning är de så kallade processrelaterade utsläppen. Dessa utsläpp motsvarar cirka två tredjedelar av de totala koldioxidutsläppen från cementtillverkning. Utsläpp uppstår under bildandet av cementklinker när mald kalksten, som till stor del består av kalciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) upphettas och cementklinker ( $\text{CaO}$ ) och koldioxid ( $\text{CO}_2$ ) bildas (Cementa, u.å.). Dessa utsläpp utgör cirka 5% av koldioxidutsläppen globalt (Andrew, 2018). Utöver de processrelaterade koldioxidutsläppen tillkommer dessutom de förbränningsrelaterade utsläppen som uppkommer genom uppvärmningen av cementugnen som möjliggör den exoterma reaktionen då cementklinker bildas. I ugnen når materialet en temperatur på cirka 1450 grader Celsius. Koldioxidutsläppen som åtgår för att åstadkomma den uppvärmningen står för cirka en tredjedel av de totala koldioxidutsläppen från cementtillverkningen (Cementa, u.å.). Totalt sett så är uppskattningar gjorda att de totala koldioxidutsläppen från hela cementindustrin står för 8% av koldioxidutsläppen globalt (Andrew, 2018).

För att minska utsläppen av koldioxid från cementtillverkning görs idag ansträngningar i både de processrelaterade och de förbränningsrelaterade utsläppen. När det gäller de processrelaterade utsläppen är ambitionen från cementtillverkarnas sida att i högre utsträckning blanda in alternativa bindemedel utöver den kalciumbaserade cementklinkern (Cementa, u.å.). Dessa alternativa bindemedel kan exempelvis vara industriella restmaterial som masugnsslagg och flygaska som har liknande egenskaper som kalciumbaserad cementklinker. Masugnsslagg är en biprodukt från tillverkningen av råjärn i masugn medan flygaska är en restprodukt från kolkraftindustrin (Svensk Betong, 2017). År 2017 ersatte den största svenska cementtillverkaren Cementa sin kalciumbaserade cementklinker med 14% alternativa bindemedel. Ambitionen är som sagt att öka andelen alternativa bindemedel i cement men för det krävs en god tillgång till ersättningsmaterial vilket kan variera stort. Kraven på kvalitet och funktion som finns på cementen varierar också vilket gör att stora ansträngningar i form av forsknings och utvecklingsarbete är nödvändigt (Cementa, u.å.).

När det kommer till koldioxidutsläpp orsakade av förbränning görs ansträngningar för att övergå från kol till mindre miljöbelastande bränslen i form av avfalls- och biobaserade bränslen. Det har redan gjorts framsteg i utfasandet av kol som bränslekälla då Cementa år 2017 använde 50% avfallsbaserade bränslen och 20% biobaserade bränslen. För att fortsätta denna utveckling att använda mer hållbara bränslen är det viktigt att det till exempel ställs högre krav på avfallshantering och att avfall från byggsektorn används mer effektivt. För att öka användandet av biobaserade bränslen är en ambition att använda mer råvara från skogen. Dock kräver cementugnen att framförallt biobaserade bränslen förbehandlas innan de kan användas för att värma upp ugnen vilket kan leda till att det kan bli svårt att få användningen av dessa bränslen att bli ekonomiskt gångbar. Att ersätta termiska processer med elektrifierade processer är också ett mål som Cementa har. För att elektrifiera processer inom tillverkningen är det dock en förutsättning att elen framställs på ett hållbart sätt och att elmarknaden är någorlunda stabil (Cementa, u.å).

## 5.2 Kalkcementpelare

Den miljöpåverkan som uppstår vid användandet kalkcementpelare som grundförstärkningsmetod kan bedömas utifrån genomförandet av en livscykelanalys. Baserat på en livscykelanalys gjord på förstärkningen som användes vid byggandet av motorvägen E6 vid Håby och Rabbalshede år 2000, kan alla olika delmoment i byggskedet och förvaltningsskedet ur ett miljöpåverkansperspektiv värderas och jämföras. Detta kan göras för att få fram vilka delar i processen som har den största miljöpåverkan. Vägen som livscykelanalysen är gjord på är en sträcka på 1 km. Bredden på vägen är 11,25 m och kalkcementpelarna som användes hade diametern 600 mm. Bindemedelsblandningen som användes bestod till 50% utav osläckt kalk och till 50% av cement. Mängden bindemedel som användes var 25 kg per meter pelare och totalt användes 29 500 m pelare (Rydberg och Andersson, 2003).

Av resultatet från livscykelanalysen kan det utläsas att den process som mest bidrar till den ökande växthuseffekten är delmomentet stabilisering. Stabiliseringen står för ungefär 2/3 av bidraget till klimatförändringar där övriga delmoment; Överbyggnad, asfaltlager och underhåll står för relativt lika delar av den övriga tredjedelen (Rydberg och Andersson, 2003).

På grund av den stora klimatpåverkan som uppkommer vid stabiliseringsprocessen är det lämpligt att i första hand lägga resurser på att försöka minska utsläppen från det delmomentet. En åtgärd som på senare tid börjat användas mer för att minska just klimatpåverkan från stabiliseringsprocessen är användandet av bindemedelsprodukten Multicem. Multicem består av en blandning mellan cement kiln dust, CKD och standard cement (Cementa, u.å). CKD är en biprodukt från cementtillverkning och är av den anledningen på många sätt lik cement både i avseende av egenskaper och av vad det innehåller (Kunal, Siddique och Rajor, 2012). Vid tillverkning av cementklinker genereras cirka 15–20% CKD. Det vill säga 15–20% av det som bildas i ugnen består är CKD resterande del är Cementklinker (Huntzinger och Eatmon, 2009). Det som huvudsakligen skiljer CKD från cement är att CKD är en mer heterogen produkt både i hänseende av den kemiska uppbyggnaden och partikelstorleken. Vad CKD innehåller varierar stort på grund av variationer i råmaterialet, vilket bränsle som används för att hetta upp ugnen och vilken ugn som används. Dock är huvudsakliga beståndsdelar av CKD vanligen kalciumoxid (CaO), kiseldioxid (SiO<sub>2</sub>) och mindre delar aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) och järn(III)oxid (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Kunal, Siddique och Rajor, 2012).

CKD har visat sig ha bra hållfasthetsegenskaper. Vid inblandning av CKD i Portland cement har hållfastheten visat sig vara minst lika god som då endast Portland cement har testats. I vissa fall har även en viss tryckhållfasthetsökning kunnat påvisats vid inblandning av en mindre mängd CKD i Portland cement (Kunal, Siddique och Rajor, 2012).

Nackdelar med CKD är att det potentiellt kan vara farligt att hantera då det likt vanlig cement har frätande egenskaper och kan vara särskilt irriterande för hud, ögon och andningsfunktionen. Föroreningar från råmaterialet har även en tendens att samlas upp i ugnsdammet vilket ytterligare är en orsak till att CKD skulle kunna anses som ett farligt avfall (Huntzinger och Eatmon, 2009).

Multicem som alltså är blandningen mellan CKD och cement har visat sig ha många liknande egenskaper som kalkcement. Multicem kan därför i stor utsträckning användas som ersättning för kalkcement och liknande inblandningsmängd kan användas. Den stora fördelen med användandet av Multicem jämfört med kalkcement är att koldioxidutsläppen vid produktionen minskas. Eftersom osläckt kalk då ersätts med CKD vilket medför att en mindre mängd jungfruligt material används.

### 5.3 Bankpålning

Den miljö och klimatpåverkan som uppstår vid användandet av bankpålning som grundläggningsslag uppstår från flera olika delmoment i tillverkningsprocessen. Miljö och klimatpåverkan uppstår huvudsakligen från tillverkningen av de ingående material som behövs för att tillverka betong som betongpålarna och pålplattorna består utav. Dessutom blir det en bidragande påverkan från tillverkningen stålprodukter. Framförallt från tillverkningen av armering som ingår i betongpålarna men även från tillverkningen av bergskor som sätts på spetsbärande pålar samt från pålskarvar som också ofta är tillverkade av stål. Den största andelen av miljö- och klimatpåverkan uppstår dock från tillverkningen av cement som inte beskrivs under denna rubrik då det redan behandlats i inledningen av detta kapitel.

En komponent i betong som bidrar med en betydande miljö och klimatpåverkan är produktionen av ballast. Enligt Hercules grundläggning byggvarudeklaration för standardbetongpålar består viktandelen av en betongpåle till cirka 70% av ballastmaterial. Hälften av ballasten består av bergkross och den andra hälften av naturgrus (Hercules, 2015). Ur miljösynpunkt är användandet av naturgrus i betong problematiskt. Detta eftersom det är viktigt att bevara naturgrusavlagringar för att säkerställa en långsiktigt hållbar dricksvattenförsörjning. Då naturgrusavlagringar fungerar som en naturlig infiltration i grundvattentäcker. En annan anledning till att det är viktigt att bevara naturgrusavlagringar är för att det bedöms vara en del av natur- och kulturlandskapet. På grund av detta är det enligt (SGU, 2015) viktigt att användandet av naturgrus i betong minskas till förmån för helkrossad ballast eller alternativa material.

En övergång till att använda mer bergkrossmaterial i betong skulle dock innebära att det uppstår andra typer av miljö- och klimatpåverkan. Det går till exempel åt mer energi att ta ut krossmaterial från bergtäcker jämfört med att ta ut material från naturgrustäcker. Vilket skulle göra att utsläppen av växthusgaser ökar. Dock till förmån för att viktiga naturgrusavlagringar bevaras (SGU, 2015).

Även transporter förväntas öka i takt med att större andel krossmaterial från bergtäcker används i betong. Vilket isåfall också skulle bidra till ökade utsläpp av växthusgaser. Den

största anledningen till att transporter av ballast förväntas öka kan härledas till att det kraftigt ökade behovet av krossmaterial från bergtäkter gör att bergtäkterna förväntas ta slut fortare. Detta är särskilt kritiskt i storstadsregionerna där behovet av ballast till olika projekt är som störst. Det är dessutom svårt att få tillgång till att använda markområden för täktverksamhet då det är stor konkurrens med annan markanvändning och kvaliteten på berggrunden inte alltid ger en produkt som är lämplig att använda. Detta sammantaget gör att ballasttransporter i stor utsträckning förväntas öka vilket bidrar till negativ miljö och klimatpåverkan (SGU, 2015).

Tillverkningen av stålprodukter som armering, bergskor och pålskarvar är en annan process som bidrar till miljö- och klimatpåverkan. Miljö- och klimatpåverkan från stålindustrin uppstår huvudsakligen i form av utsläpp av koldioxid men även från utsläpp av kväveoxider och svaveloxider samt stoft. Utsläppen av koldioxid uppstår framförallt från reduktionen av järnmalm som sker i masugnar när syret tas bort från den oxidiska järnmalmen med hjälp utav koks. Dessutom uppstår koldioxidutsläpp även från användningen av fossila bränslen för uppvärmningen av ugnar. För att minska koldioxidutsläppen från ståltillverkningen har ansträngningar gjorts för att minimera kolanvändningen i masugnsprocessen. De gjorda effektiviseringarna är idag nära vad som är teoretiskt möjligt för att framställa stål. I övrigt görs i branschen ansträngningar för att minska användningen av olja för att istället använda sig mer av gas och el då det är ett möjligt. Utvinningen av råvaror såsom järnmalm och koks bidrar även det med miljö- och klimatpåverkan men är inte lika omfattande som den som uppstår under masugnsprocessen (Jernkontoret, 2019).

För att få en ungefärlig bild om storleksordningen av miljö- och klimatpåverkan från de olika delmomenten i produktionen av betongpålar redovisas här resultaten från en rapport om standardbetongpålars miljöpåverkan. Rapporten som valts ut för att illustrera denna jämförelse är ett examensarbete gjort på Lunds Tekniska Högskola av Johansson och Wallet (2014). Rapporten bygger på en jämförelse av de olika delmomentens klimatpåverkan och är begränsad till klimatpåverkan orsakade av utsläpp av växthusgaser. De olika utsläppen är sedan omräknade till koldioxidekvivalenter för att möjliggöra att utsläppen av de olika växthusgaserna ska kunna jämföras. Resultaten visar på ett ungefär att 71% av klimatpåverkan uppkommer från cementtillverkningen, 10% från tillverkningen av stålprodukterna armering, pålskarv och bergsko, 0,7% från brytning och krossning av ballast, 7% från alla transporter till betongfabriken och resterande del från produktionen av själva betongelementen och distributionen av betongelementen till bygge (Johansson och Wallet, 2014). Som sagt redovisas enbart resultat från utsläppen av växthusgaser vilket innebär att olika typer av miljöpåverkan som också är av betydelse för en hållbar framtid inte alls beaktas.

## 6 Diskussion

I detta kapitel diskuteras för- och nackdelar med respektive metod baserat på de olika faktorer som tidigare tagits upp i rapporten.

### 6.1 Teknisk analys och jämförelse

Den tekniska analysen diskuteras i detta kapitel genom att båda grundläggningsmetoderna jämförs utifrån hur installationsprocessen och provningsmetoder går till som beskrivits tidigare i rapporten. Dessutom diskuteras och jämförs även andra aspekter som anses ha betydelse vid val av grundläggningsmetod.

#### 6.1.1 Projektering och förbearbetning

Vid förbearbetning kan det krävas mer arbete vid användning av bankpålning än vad kalkcementpelare skulle kräva. I de fall där förbearbetning krävs kan bankpålning därför bli mer tidskrävande. Förutom detta kommer annan utrustning behöva anskaffas till arbetsplatsen. I jämförelse till kalkcementpelare resulterar sådana fall i större kostnader och mer logistik.

#### 6.1.2 Tillverkning

På grund av metodernas tillverkningsätt ser olika ut innebär det att logistikbehovet skiljer sig åt. Vid tillverkning och användning av kalkcementpelare krävs endast att bindemedel samt tanken bindemedlet förvaras i transporterats till arbetsplatsen. För en bankpålning är tillverkningsprocessen oftast mer komplicerad. Pålen som används på arbetsplatsen måste först tillverkas på en fabrik och därefter transporterats till arbetsplatsen. Lossning och leveranskontroll utförs senare när pålen transporterats till arbetsplatsen där upplagningsplatser också säkras. Genom detta kan man konstatera att om arbetsplatsen är en längre sträcka skulle det kräva fler antal lastbilar som transporterar pålar än om man istället förstärkte den identiska sträckan med kalkcementpelare. På grund av detta kan kostnaderna för logistik, som innefattar godsmottagning och transport, bli högre.

#### 6.1.3 Installation

Installationsprocessen för bankpålning och kalkcementpelare skiljer stort i hur det går till. Installation av kalkcementpelare är mycket beroende på syftet och dess ändamål. Installationsprocessen som beskrivs ovan visar hur mönstren skiljer sig åt. Är syftet att reducera sättningen väljs vanligtvis triangulära eller kvadratiska formationer. Å andra sidan, är syftet att förbättra stabiliteten vid höga banker eller slänter installeras KC-pelare så att de överlappar varandra och att de är vinkelräta mot den mest kritiska glidyten. För bankpålning ser installationen annorlunda ut. Vad som avgör hur installationen ser ut beror på hur djupt det är ner till berg men även också vad man har för markförhållande. Är det väldigt djupt ner till berg kan det vara en ekonomisk faktor som avgör användningen av mantelburen påle och inte en spetsburen påle. Eftersom det inte direkt finns en gräns på hur långt ner man kan påla, brukar det ofta vara materialkostnaden som sätter gränsen.

Eftersom dessa metoderna kan tillämpas på likadana markförhållanden delar de även samma problem när det kommer till utrustning för installation. På grund av att utrustningen som

används är mycket tung resulterar det till stora tryck på marken. Är jordens bärförmåga låg måste maskinerna förstärka jorden, dvs. vägen till installationsområdet.

Stora block, äldre byggnationers kvarlämningar eller stenar är något som både bankpålning och kalkcementpelare är känsliga för när det gäller neddrivning under installationen. Har dessa faktorer inte varit medräknade vid projektering kan det generera oförutsedda kostnader.

När det kommer till installationsdjup skiljer sig metoderna åt. Det finns ingen direkt regel eller maxgräns för hur djupt en påle kan slås ner. Däremot har installationen av kalkcementpelare i Sverige i dagsläget en maxgräns på ca 25 meter. Detta gör att bankpålning därför är mer allsidig i det avseendet.

### **6.1.4 Dimensioner**

Dimensionerna på pelarna är en faktor som skiljer sig åt. Utseendemässigt skiljer de sig åt då betongpålen tvärsnitt är kvadratisk medan kalkcementpelaren tillverkas i tvärsnitt som är cirkulärt. Standardbetongpålar har ofta ett tvärsnittsmått på 235-270mm medan kalkcementpelare ofta har en diameter på mellan 600-1000mm. Fastän kalkcementpelaren har en dimensioneringsmått som är mer än dubbelt så stor klarar den inte av lika stora laster. Den mest använda bankpålen tillverkas av armerad betong, vilket denna rapport behandlar, vars syfte är att föra ned laster vidare till jord som har en högre bärförmåga. Kalkcementpelaren tillverkas genom en blandning av bindemedel vars installationsmönster varierar beroende på syftet. Är syftet att överföra lasten till starkare bärlager kan pelarna placeras i en kvadratisk formation då man vill omgivande jorden uppnår blockverkan. Detta leder till att man använder sig av fler kalkcementpelare även fast den tål en mindre last. Eftersom lastöverföringen skiljer sig kommer även det samma gälla för tvärsnittet mellan de två metoderna då dimensionen i en jämförelse spelar en stor roll.

### **6.1.5 Provning**

Hur dessa två grundläggningsmetoder provas skiljer sig åt en del men har även några fåtal liknelser. Innan man arbetar med grundkonstruktionen påbörjas måste marken alltid kontrolleras. Kontrollerna görs på olika sätt för de grundkonstruktioner denna rapport behandlar.

För att få till en bra kalkcementpelare brukar det utföras tester i laboratorier där markförhållandet återskapas och bindemedel kan blandas ned jorden. Det finns alltid en risk då bindemedelsblandningen som gjorts i laboratoriemiljö skall användas in situ. Då pelaren in situ kanske inte alltid uppvisar sammareultat som erhållits i det lyckade labbförsöket. Detta då KC-pelaren i grund och botten är baserad på en kemisk reaktion. På grund av att det är maskiner som utför blandningen i marken kan det ske att själva blandningen inte är identisk med pelaren från labbförsöket. Det kan även finnas andra faktorer i marken som på något sätt kan störa reaktionen.

Provningsmetoder för bankpålning sker efter att pålen slagits. Genom de olika testerna som utförs kan dess egenskaper utvärderas. Eftersom det tar några veckor för jordens egenskaper att återhämta sig är det ofta bra om det är möjligt att vänta någon månad innan en slagen påle provas.

### 6.1.6 Långtidseffekter

En annan viktig aspekt att beakta vid val av grundläggningsmetod är hur konstruktionen påverkas över lång tid. För pålarna som används vid bankpålning finns en kritisk effekt på konstruktionen i form av så kallade påhängslaster. Påhängslaster orsakas av negativ mantelkohesion på pålarna vilket inträffar när jorden mellan pålarna rör sig nedåt och sätter sig medan själva pålarna inte rör sig nedåt i samma utsträckning. Är pålarna spetsbärande som i räkneexemplet i kapitel 4 är detta särskilt viktigt att beakta då själva pålarna inte beräknas sätta sig någonting. Differenssättningen mellan pålarna och omgivande jord riskerar då att bli stora vilket kan leda till betydande påhängslaster. Effekter som kan uppstå av påhängslaster brukar enligt svensk praxis beaktas på de delar av pålen där sättningsskillnaden mellan påle och omgivande jord är mer än 5 mm. Dock är det mycket svårt att förutse olika jordars och pålars rörelser. Detta eftersom det är svårt och mycket tidskrävande att utvärdera jordens egenskaper. Hur grundvattennivån ändras är också av stor vikt för att bedöma belastningen på pålarna. Detta är också mycket svårt att avgöra. För att kunna göra en bra bedömning av risken för påhängslaster är det också viktigt att göra en bedömning av hur stor risken är för att långtidssättningar (krypning) kan inträffa. Sammantaget kan sägas att det är mycket svårt att få en bild över hur jorden kommer bete sig och därmed hur omfattande påhängslasterna kan tänkas bli. Detta medför att risken för påhängslaster givetvis måste beaktas vid dimensionering och beräkning av bärförmågan och att den stora osäkerheten av bedömningen av jordegenskaper måste vägas in i valet om bankpålning kan anses vara en lämplig grundläggningsmetod (Eriksson, Jendeby, Olsson och Svensson, 2004).

Effekter och problem som kan uppstå efter lång tid då kalkcementpelare använts som grundläggningsmetod skiljer sig från då bankpålning används. Någon form av påhängslaster kommer inte inträffa på samma sätt eftersom de förstärkta pelarna oftast är betydligt kortare än pålarna som används vid bankpålning. Dessutom är kalkcementpelarna inte helt styva såsom förtillverkade betongpålar. Detta gör att kalkcementpelarna själva också sätter sig likt den omgivande jorden. Dessutom är den stabiliserade arean så mycket större jämfört med bankpålning vilket möjliggör att kalkcementpelarna kan sätta sig mer homogent.

Långtidseffekter som har studerats då kalkcementpelare används är istället ofta hur hållfastheten påverkas med tiden och om det finns någon risk att material som används vid stabiliseringen lakas ut till den omgivande jorden. I en rapport om långtidsegenskaper för kalkcementpelare skriver Löfroth (2005) om hur 10 år gamla kalkcementpelare installerade i lera och gytjig lera påverkats med tiden. Resultaten från studien visade att oftast sker en hållfasthetsökning med tiden i pelarna. I vissa pelare hade skjuvhållfastheten fördubblats under 10-årsperioden medan andra prover visade ingen eller en marginell ökning av skjuvhållfastheten. Vad beträffar urlakning av material från kalkcementpelarna undersöktes ifall kalciumoxid (CaO) urlakats med tiden. Av resultaten kunde det fastställas att kalciumoxid i viss mån lakas ur kalkcementpelaren men att processen verkar vara mycket långsam. Från resultaten av de studerade kalkcementpelarna hade kalciumoxiden i medeltal på 9,5 år enbart spridit sig cirka 50 mm ut från ytan på kalkcementpelaren (Löfroth, 2005). Detta indikerar att urlakning av material från kalkcementpelare knappast kan anses vara ett stort miljöpåverkansbekymmer och att det därför inte bör behandlas som en avgörande miljömässigt negativ aspekt vid val av grundläggningsmetod.



## 6.2 Ekonomisk analys och jämförelse

Utifrån den i rapporten tidigare gjorda kostnadsundersökning kunde det konstateras att totalkostnaden för grundläggningen med bankpålningen var dyrare än den för kalkcementpelare. Totalkostnaden för bankpålningen av den 100m långa vägbanken uppgick till 3 770 100 kr medan totalkostnaden för kalkcementpelarförstärkningen kostade 3 135 800 kr. Skillnaden i kostnad i procent visar att bankpålningen är cirka 20% dyrare än kalkcementpelarförstärkningen. Bankpålningen blev alltså dyrare trots att den totala längden installerade kalkcementpelare på 41 976m klart översteg den pålade längden på 7 343 m. Detta förklaras till stor del av det betydligt lägre priset per meter för kalkcementpelarförstärkningen. Då kalkcementpelarförstärkningen kostade 70 kr/m medan pålarna kostade 400 kr/m.

Beräkningsexemplet bygger på att en specifik jordlagerföljd använts och jämför därför enbart skillnaden i kostnad för metoderna förutsatt att just de markförhållandena råder. För att mer generellt kunna besvara frågan om vilken grundläggningsmetod som är mest fördelaktig ur ett ekonomiskt perspektiv skulle fler kostnadsberäkningar med olika markförhållanden behöva göras. Dock kan det översiktligt sägas att kostnaden för bankpålning borde öka mer om det var ett större jorddjup jämfört med om kalkcementpelare hade använts. Eftersom pålarna då hade behövt göras längre för att fortfarande vara spetsbärande. Till skillnad från kalkcementpelarförstärkningen som förmodligen inte hade behövt ändras särskilt mycket. Då studerande av våra beräkningar visar på att sättningar framförallt uppstår nära markytan och inte i så stor omfattning i jordskikten längre ner. Om jorddjupet istället hade varit mindre än de 42 meter som det räknas med i beräkningsexemplen hade prisskillnaden troligtvis också ändrats. Vid detta fall hade prisskillnaden förmodligen blivit mindre då pålarna inte hade behövt göras lika långa för att bli spetsbärande. Medan kalkcementpelarförstärkningen ungefär hade behövt utföras på samma sätt då inga stora sättningar förväntas uppstå i jorden längre ner.

Ekonomi i projekt där metoderna används styrs dock inte enbart av materialkostnaden för pålar och bindemedel och så vidare. Många andra parametrar såsom risker, tidsåtgång och tillgång till resurser har också stor påverkan på den slutliga kostnaden för ett projekt.

Exempelvis finns en risk med kalkcementpelarförstärkningen då en sättning på 15 cm förväntas på den kalkcementpelarförstärkta vägen. Medan det för pålarna, som pålas ner till fast berggrund inte förväntas någon sättning alls. Detta medför en större risk för kalkcementpelarförstärkningen då inte lika stora felmarginaler tillåts. Varken i projekteringskedet eller i byggskedet. Konsekvenser av detta kan vara att det är större sannolikhet att vägbanken sätter sig mer än vad som har dimensionerats för. Vilket till exempel kan leda till att underhållsarbeten kanske måste göras tidigare än beräknat. Vilket i så fall leder till fördyringar. Dessutom kan det vid kalkcementpelarförstärkning finnas en större osäkerhet i hur hållfastheten blir i pelaren då bindemedlet blandas ner i jorden.

Tidsåtgången för installationen av pålar respektive kalkcementpelare är en annan viktig ekonomisk parameter att ta hänsyn till vid val av grundläggningsmetod. Eftersom personalkostnader ofta står för en betydande del av totalkostnaden för ett projekt. I en mejlkonversation med M. Dahlström (21 Maj, 2019) svarar han på frågan om hur stor tidsåtgången för respektive metod kan uppskattas vara. Installationstiden skiljer sig givetvis åt beroende av vilken utrustning som används och vilka markförhållanden som råder. Generellt för installerandet av kalkcementpelare uppskattades dock en ungefärlig kapacitet på 1000

meter kalkcementpelare per arbetsdag då en maskin används. Medan samma siffra för bankpålning uppskattades till cirka 400 pålmeter per arbetsdag då en pålkran används. En ytterligare aspekt som påverkar tidsåtgången vid bankpålning är sammankopplingen av pålarna med pålplattor. Ofta är det sammankopplingen och gjutningen av dessa pålplattor som är begränsande i tidsåtgången för hela installationsprocessen för bankpålning. Då endast cirka 5 pålplattor kan gjutas under en arbetsdag. Pålplattorna kan heller inte gjutas samtidigt som pålarna installeras. Vilket ytterligare bidrar till att installationstiden för bankpålning är betydligt längre än den för kalkcementpelare.

En annan ekonomisk faktor som kan påverka kostnaden och därmed valet av grundläggningsmetod är tillgången på material och utrustning. Olika företag kan vara specialiserade på olika grundläggningsmetoder vilket gör att valet av en grundläggningsmetod blir mer eller mindre attraktiv beroende av företagets specialkompetens. Valet av metod kan också styras geografiskt då tillgången till material och utrustning varierar beroende på var projektet genomförs någonstans.

### 6.3 Miljömässig analys och jämförelse

En viktig miljömässig faktor att ta hänsyn till vid val av grundläggningsmetod är valet av bindemedel och mängden ingående bindemedel i respektive metod. Detta på grund av att de vanliga bindemedlen osläckt kalk och cement bidrar till stora koldioxidutsläpp under dess produktionen. I en intervju med M. Dahlström (2 april, 2019) diskuterades mängden ingående bindemedel vid användandet av de båda metoderna. Vid användandet av kalkcementpelarförstärkning kan det konstateras att det oftast ingår betydligt mer bindemedel jämfört med då bankpålning används. Även om själva betongelementen som används vid bankpålning till stor del består av cement så är dess upptagna volym så pass liten i jämförelse med den volym som behöver förstärkas då kalkcementpelare används. Vilket gör att det i regel åtgår mycket mer bindemedel vid kalkcementpelarförstärkning. Därmed skulle utsläppen av framförallt koldioxid kopplad till produktionen av bindemedel kunna ses som en mer betydelsefull faktor vid beslut om att använda kalkcementpelare som grundläggningsmetod. Det behöver dock tilläggas att den klimatpåverkan som uppstår till följd av den cementtillverkningen som används till pålarna vid bankpålning även den är av betydande omfattning och en viktig faktor vid beslut om val av grundläggningsmetod.

Även fast det i regel åtgår mer bindemedel för kalkcementpelare och som därav generar större utsläpp av koldioxid i det avseendet skulle skillnaden i klimatpåverkan i framtiden potentiellt kunna bli mindre. Till exempel skulle den ökande implementeringen av alternativa bindemedel såsom masugnsslagg och flygaska och att bättre utnyttja restprodukter som CKD istället för osläckt kalk göra att det totalt sett blir mindre utsläpp från bindemedelsproduktionen. Detta skulle göra att skillnaden i klimatpåverkan mellan grundläggningsmetoderna potentiellt skulle kunna minskas. Vilket isåfall kan göra så att klimatpåverkan orsakade av bindemedelsproduktionen skulle kunna ses som en mindre avgörande faktor vid val av grundläggningsmetod ur miljösynpunkt.

Miljöpåverkan från andra ingående material i de två grundläggningsmetoderna är till exempel produktionen av ballast i betongprodukter och armering i betongpålar. Den miljö- och klimatpåverkan från de delmomenten skiljer sig i många avseenden från exempelvis bidragen från tillverkningen av bindemedel. Skillnaderna i miljö- och klimatpåverkan skiljer sig åt i framförallt omfattning men också i potential för vad som kan göras för att begränsa påverkan. Dessutom blir det också en annan typ av miljö- och klimatpåverkan. För att göra en

jämförelse för de olika miljöpåverkanskategorierna emellan utifrån skillnaden i de olika typerna av miljö- och klimatpåverkan krävs därför att en värdering av den olika påverkan måste göras. Vilket inte är lätt att göra då de olika typerna av miljö- och klimatpåverkan utgör en risk för miljön och klimatet av olika anledningar. Det är till exempel en stor skillnad i påverkan för uttag av naturgrus från naturgrustäkter som används i betong jämfört med koldioxidutsläpp orsakade vid produktion av till exempel cement eller armeringsjärn. Påverkan som uppstår genom uttag av naturgrus från naturgrustäkter har en huvudsaklig negativ miljöpåverkan på dricksvattenförsörjning och natur och kulturmiljön. Medan cementtillverkning huvudsakligen har en negativ klimatpåverkan i form av utsläpp av koldioxid som bidrar till den ökande växthuseffekten. En bedömning av omfattningen av så olika typer av miljö- och klimatpåverkan är som tidigare skrivits mycket svår och osäker att göra och genomförs därför inte i denna rapport.

Istället kan det vara av betydelse att jämföra de olika ingående materialens potential i hänseendet av åtgärder som skulle kunna göras för att minska miljö- och klimatpåverkan. Till exempel har litteraturstudien visat att det finns stor potential i att minska de processrelaterade utsläppen vid produktionen av bindemedel. Medan det inom andra miljö- och klimatpåverkansområden som stål eller ballastproduktion av olika anledningar är svårare att minska påverkan. Miljö- och klimatpåverkan kan till exempel redan ha minskats så mycket att det är nära vad som är teoretiskt möjligt för att producera produkten. Dock är det viktigt att beakta att klimatpåverkan från produktionen av ballast och stålprodukter till standardbetongpålar är av betydligt mindre omfattning jämfört med produktionen av bindemedel. Vilket gör att även fast det finns färre förbättringsmöjligheter i att minska miljö- och klimatpåverkan från produktionen av de materialen borde inte förbättringsmöjlighetsfaktorn ses som helt avgörande ändå. Då stål och ballastproduktion till betongpålar från början utgör en relativt liten del av den totala miljö- och klimatpåverkan.

En annan miljömässig faktor som är viktig att ta hänsyn till är transporter förknippade med projekt där grundläggningsmetoderna används. Utsläppen från transporter uppkommer vid transport av material och utrustning med fordon som drivs av fossila bränslen. Skillnaden mellan transporters miljöpåverkan då bankpålning respektive kalkcementpelare används är svår att dra några slutsatser utifrån. Eftersom varje projekt är unikt och närheten till olika material och utrustning hela tiden skiljer sig åt oberoende av vilken metod som används. Dock skulle användandet av bankpålning potentiellt kunna förknippas med att fler transporter skulle krävas. Då ett större antal olika material används för att producera betongpålar och andra material som ingår i bankpålningen. Vilket gör att det potentiellt skulle kunna krävas fler transporter för att tillverka de produkter som ingår i bankpålningen.

Maskinerna som används för själva grundläggningen genererar även de utsläpp av växthusgaser. Idag består många entreprenörers maskinpark av gamla fordon som genererar stora utsläpp av växthusgaser. Många entreprenörer har dock ambitioner att uppgradera sin maskinpark eller byta ut motorerna i maskinerna till mer bränslesnålare motorer (Hercules, u.å).

## 7 Slutsats

Rapportens syfte att ge förenklad bild av vilken grundläggningsmetod som är att föredra utifrån utvärderande av tekniska, ekonomiska och miljö- och klimatpåverkansperspektiv har i varierande grad uppnåtts. Även fast metoderna som använts i rapporten för att besvara frågeställningen haft begränsningar och ett entydigt svar knappast kan förväntats på grund av grundläggningsmetodernas olikheter, har en uppfattning om vilka faktorer som är avgörande vid val av grundläggningsmetod ändå i viss utsträckning identifierats.

Utifrån ett tekniskt perspektiv har grundläggningsmetoderna analyserats utifrån hur de utformas, hur installationsprocessen går till och hur de provas. Därefter har en diskussion förts om hur grundläggningsmetoderna i de och även andra avseenden skiljer sig åt. Vad som kan konstateras är att dessa metoderna kan användas till samma ändamål, vid reducering av sättningar eller stabilitet. Vidare kan man påpeka att önskas ingen sättning är bankpålning ner till berg att föredra. Det blir dock en kostnadsfråga då mer material åtgår.

Ur en ekonomisk synvinkel kunde det konstateras efter genomförande av kostnadsberäkning för en vägbank förstärkt med bankpålning och en vägbank förstärkt med kalkcementpelare att vägbanken förstärkt med kalkcementpelare kostade mindre. Resultaten visade att vägbanken förstärkt med bankpålningen var cirka 20% dyrare än kalkcementpelarförstärkningen. Det är viktigt att komma ihåg att kostnaderna som erhöles från kostnadsberäkningen endast gäller för de specifika förutsättningarna som ansattes. Dock kan det resoneras fram genom studerande av beräkningarna att kalkcementpelarförstärkningen potentiellt skulle kunna vara ett mindre kostsamt alternativ även vid andra jordtyper och jorddjup.

Utöver resultaten från kostnadsberäkningen som i princip endast räknar med materialkostnader för metoderna är det viktigt att ta hänsyn till andra ekonomiska aspekter. Andra aspekter kan till exempel vara risker, tidsåtgång och tillgången till resurser. Vad beträffar risker som användandet av de olika grundläggningsmetoderna för med sig kunde det konstateras att det i många avseenden kan vara en större risk att utföra kalkcementpelarförstärkningen. Den främsta förklaringen till det är att det med kalkcementpelare är mer osäkert hur hållfastheten blir i pelaren då bindemedlet blandas ner i jorden. Dessutom medräknas i dimensioneringen att en viss sättning får inträffa vilket kan vara en riskfaktor om den beräknade sättningen skulle överskridas. Tidsåtgången för installationen är ytterligare en avgörande aspekt för valet av grundläggningsmetod då en lång installationsprocess bland annat genererar höga personalkostnader. Det kunde konstateras att installationsprocessen för bankpålning i regel tar längre tid än den för kalkcementpelare då bland annat gjutningen av pålplattor till bankpålningen är väldigt begränsande i hur fort installationen kan genomföras. I avseendet av hur tillgången till resurser påverkar valet av grundläggningsmetod är det svårt att dra någon enkel slutsats. Detta eftersom tillgången till resurser alltid är olika för olika projekt.

De båda grundläggningsmetoderna har också utvärderats utifrån ett miljö- och klimatpåverkansperspektiv. Detta gjordes efter genomförande av en litteraturstudie där bland annat livscykelanalyser och miljöeffektbedömningar för de båda grundläggningsmetoderna studerades. Av resultaten från litteraturstudien kunde de processer som mest bidrog till miljö- och klimatpåverkan identifieras. Det kunde konstateras för båda grundläggningsmetoderna att produktionen av bindemedel står för en stor del av den totala klimatpåverkan. Skulle bindemedelsproduktionens klimatpåverkan kunna minskas så skulle det därför ge stor effekt.

Det kan också konstateras att utsläppen av växthusgaser från bindemedelsproduktionen utgör en större del av den totala klimatpåverkan för kalkcementpelare jämfört med vad den gör för bankpålning. Eftersom den mängd bindemedel som används för kalkcementpelarförstärkningen är betydligt större än den som används vid bankpålning. Dock kan andra typer av miljöpåverkan härledas till användandet av bankpålning som grundläggningsmetod då flera olika material ingår i grundläggningen. Dessa värderingar av olika typer av miljö- och klimatpåverkan gör att det är svårt att dra några slutsatser om vilken grundläggningsmetod som är bäst ur miljö- och klimatpåverkansperspektiv.

## 7.1 Metodkritik och förslag till vidare arbete

För att få bättre och mer utvecklade svar på den uppställda frågeställningen hade tillvägagångssättet för arbetet kunnat utformas på ett annat sätt. Till exempel hade det varit fördelaktigt om fler än bara ett jordförhållande och markdjup undersökts. Detta för att mer allmänt kunna besvara frågan om vilken grundläggningsmetod som är mest kostnadseffektiv vid olika markförhållanden. På så sätt skulle till exempel en brytpunkt kunna fås fram för när den ena metoden blir billigare än den andra.

Vidare för kapitlet med miljö- och klimatpåverkansanalysen skulle den delen kunna utformas som en fortsättning på kapitlet med kostnadsberäkningarna. En idé skulle då kunna vara att göra en miljö- och klimatpåverkansbeskrivning för de båda grundläggningsmetoderna med utgångspunkt från de material som ingår i respektive grundläggning. Ett tydligare resultat av vilken grundläggningsmetod som orsakar störst miljö- och klimatpåverkan hade då förmodligen kunnat erhållas.

## 8 Referenser

- Alheid, P., Axelsson, G., Berggren, B., Berglars, B., Hermansson, I., & Sarvell, F. (2014). *Verifiering av geoteknisk bärförmåga för pålar enligt Eurokod: Praktiska råd och rekommendationer vid projektering och kontroll*. Hämtad från [www.palkommissionen.org/getfile.ashx?cid=481683&cc=3&refid=1](http://www.palkommissionen.org/getfile.ashx?cid=481683&cc=3&refid=1)
- Andrew, R. M. (2018). *Global CO<sub>2</sub> Emissions from Cement Production*. Earth System Science Data Discussions, 1–61. <https://doi.org/10.5194/essd-2018-90>
- Axelsson, G., & Baker, S. (2007). *Slagna friktionspålar, rapport 103*, Pålkommissionen. Hämtad från [www.palkommissionen.org](http://www.palkommissionen.org)
- Baker, S. (2007). *Deformation Behaviour of Lime/Cement Column Stabilized Clay*, Hämtad från [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)
- Cementa AB. (u.å.). *Cementproduktion steg-för-steg*. Hämtad från <https://www.cementa.se/sv/cementproduktion-steg-f%C3%B6r-steg>
- Cementa AB. (u.å.). *Färdplan cement: För ett klimatneutralt betongbyggande*. Hämtad från [www.fossilfritt-sverige.se](http://www.fossilfritt-sverige.se)
- Cementa. (2015). *Multicem: Markstabilisering med lägre koldioxidutsläpp*. Hämtad från <https://www.cementa.se/sv/Multicem-nyhet>
- Christina, E. (2007). *BYGGVARUDEKLARATION BVD 3 enligt Kretsloppsrådets riktlinjer maj 2007*. Hämtad från [www.hercules.se](http://www.hercules.se)
- Hartlen, J., Wolski, W. (1996). *Embankments on organic soils*, Hämtad från <https://www.elsevier.com/books/embankments-on-organic-soils/hartlen/978-0-444-88273-8>
- Hercules grundläggning. (2018). *Betongpåleboken: Anvisningar för projektering, design och kontroll*. Hämtad från [www.hercules.se](http://www.hercules.se)
- Hercules grundläggning. (u.å.). *Dags att minska spridningen av ämnen som stör vår miljö*. Hämtad från <https://hercules.se/hallbarhet/miljo/minska-spridningen-av-amnen-som-stor-var-miljo/>
- Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D. (2009). *A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies*, Journal of Cleaner Production, 17(7), 668–675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007>
- Janz, M., Johansson, S.-E. (2002). *Olika bindemedels funktion vid djupstabilisering*. Hämtad från [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)
- Jernkontoret. (2019). *Processernas miljöpåverkan*. Hämtad från <https://www.jernkontoret.se/sv/stalindustrin/tillverkning-anvandning-atervinning/processernas-miljopaverkan/>

Johansson, J., & Wallett, M. (u.å.). *Betongpålars miljöpåverkan*, LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg, Institutionen för teknik och samhälle/Miljö och energiavdelningen  
Examensarbete

Keller grundläggning AB. (u.å.). *Kalkcementpelare*. Hämtad från  
<http://www.kellergrundlaggning.se/sv/tjanster/4-kalkcementpelare>

Knappet, J. A., Craig, R. F. (2012) *Craig`s soil mechanics: Eight edition*. Oxford: Spon Press

Kunal, Siddique, R., & Rajor, A. (2012). Use of cement kiln dust in cement concrete and its leachate characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 61, s. 59–68.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.006>

Larsson, R. (2008). *Djupstabilisering med bindemedelsstabiliserade pelare och masstabilisering: En vägledning*, Statens geotekniska institut (SGI), Hämtad från  
[www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)

Larsson, S. (u.å.). *Mixing Processes for Ground Improvement by Deep Mixing*, Svensk Djupstabilisering. Hämtad från [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)

Löfroth, H. (2005). *Långtidsegenskaper hos kalkcementpelare: En studie av 10 år gamla kalkcementpelarförstärkningar*. Hämtad från  
<http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/svensk-djupstabilisering/sd-ar34.pdf>

Olsson, C., Holm, G. (1993) *Pålgrundläggning*. Solna: Svensk byggtjänst.

Per Eriksson, K., Jendeby, L., Olsson, T., & Svensson, T. (2004). *Kohesionspålar, rapport 100*, Pålkommissionen. Hämtad från [www.byggforum.com/pk](http://www.byggforum.com/pk)

Pålkommissionen. (2019). *Pålstatistik för Sverige 2018*. Hämtad från  
[www.palkommissionen.org](http://www.palkommissionen.org)

Rydberg, T., & Andersson, R. *Rapport 11 Miljöeffektbedömning (LCA) för markstabilisering*, Hämtad från [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)

Statens geotekniska institut. (2019). *Grundläggningsmetoder*. Hämtad från  
<http://www.swedgeo.se/sv/vagledning-i-arbetet/grundlaggning-och-forstarkning/grundlaggning-metoder/>

Statens geotekniska institut. (2019). *Jordförstärkning*. Hämtad från  
<http://www.swedgeo.se/sv/vagledning-i-arbetet/grundlaggning-och-forstarkning/jordforstarkning/>

Stål, T. & Wedel, P.O. (red.) (1984). *Handboken Bygg G Geoteknik*. Stockholm: LiberFörlag.

Svensk betong. (2017). *Betong och klimat: En rapport om arbetet för klimatneutral betong*. Hämtad från  
[http://thomasbetong.se/images/docs/Environment/Rapport%20Betong\\_och\\_klimat\\_Thomas%20Betong.pdf](http://thomasbetong.se/images/docs/Environment/Rapport%20Betong_och_klimat_Thomas%20Betong.pdf)

Sveriges geologiska undersökning (2016). *Grus, sand och krossberg 2015*, Hämtad från [www.sgu.se](http://www.sgu.se)

Sveriges geotekniska förening. (2015). *Metodblad jordförstärkningsmetoder*. Hämtad från [www.sgf.net](http://www.sgf.net)

Sveriges geologiska undersökning. (u.å.). *Torv: från sjö till torvmark*. Hämtad från <https://www.sgu.se/om-geologi/jord/fran-istid-till-nutid/erosion-och-igenvaxning/torv-fran-sjo-till-torvmark/>

Sällfors, G. (2013). *Geoteknik*. Göteborg: Cremona förlag

Trafikverket (2016): *Trafikverkets tekniska råd för geokonstruktioner – TR Geo 13*, Hämtad från [www.Trafikverket.se](http://www.Trafikverket.se)

Trafikverket (2016): *Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner-TK Geo 13*, Hämtad från [www.Trafikverket.se](http://www.Trafikverket.se)

Vesterberg, B., Carlsten, P., & Lindh, P. (2016). *Erfarenheter av byggmetoder på torvmark*, SGI Publikation 26, Linköping 2016. Hämtad från [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)

Vägverket. (1995). *Allmän teknisk beskrivning: Bankpålning*. Hämtad från: [www.trafikverket.se](http://www.trafikverket.se)



## 9 Bilagor

### 9.1 Bilaga 1 - Underlag för kostnadsundersökning

Exempel på vägbank för jämförelse mellan KC-pelare och pålning

Kostnadsbedömning för jämförelse mellan metoderna KC-pelare och bankpålning för en vägbank på 4m med undergrund bestående av lera med stor mäktighet. Exemplet finns i bilagan. Nedan sammanställs förutsättningar för kostnadsanalysen.

#### Geotekniska förutsättningar

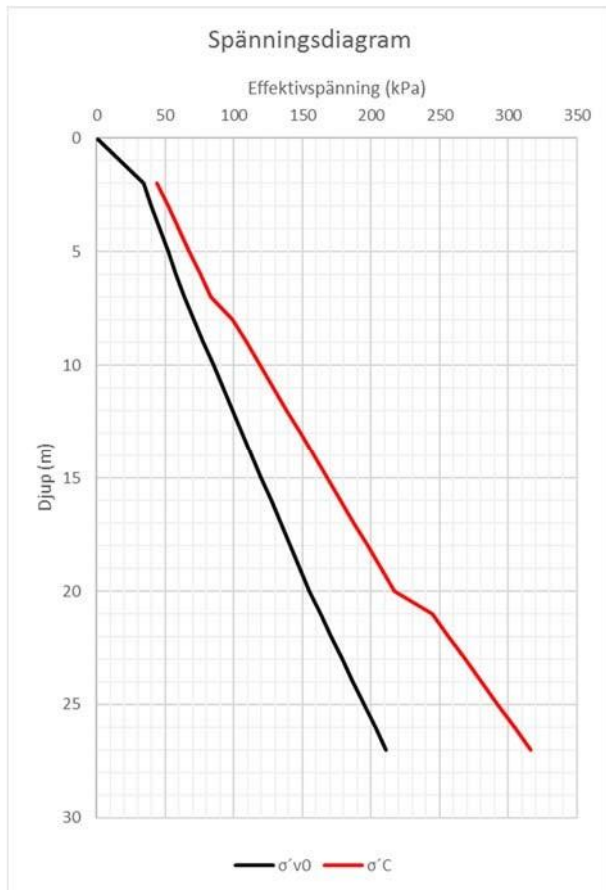
Geologin utgörs av lera med 27m mäktighet ovan ett lager med friktionsjord, typ sandig morän, med stor mäktighet ovan berg.

Jordlagerföljd och materialegenskaper indelas enligt tabell 1.

JORDART	TUNGHET	HÅLLFASTHET	MODUL M0/ E	MODUL ML	DJUP
TORRSKORPELERA	17kN/m <sup>3</sup>	C <sub>uk</sub> =30kPa	M <sub>0</sub> =5MPa	-	0-2m
LERÄ 1	16kN/m <sup>3</sup>	C <sub>uk</sub> =12kPa	M <sub>0</sub> =3MPa	0,5MPa	2-7m
LERÄ 2 <sup>A</sup>	17kN/m <sup>3</sup>	C <sub>uk</sub> =12+1,5kPa/m	M <sub>0</sub> =3MPa M <sub>0</sub> =7,8MPa	0,5MPa 1,0MPa	7-20m
LERÄ 3	18kN/m <sup>3</sup>	C <sub>uk</sub> =40kPa	M <sub>0</sub> =10MPa	1,5MPa	20-27m
SAND/MORÄN	20kN/m <sup>3</sup>	Φ <sub>k</sub> =33 °	E=20MPa	-	27-42m

<sup>A)</sup> Odränerad hållfasthet ökar med 1,5kPa/m från 7m djup. Modulen M<sub>0</sub> och ML ökar därmed också mot djupet linjärt.

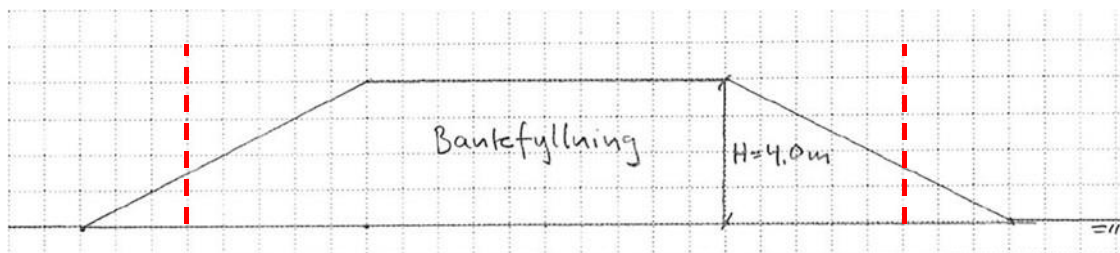
För beräkning kan grafen nedan användas, se även spänningsdiagram i bilaga 2



För sättningsberäkningar antas att leran är normal- till svagt överkonsoliderad med ökat OCR mot djupet (överkonsolideringsgrad)

### Vägbank och last på KC-pelare/ pålar

Vägbanken i exemplet är 4m hög och 10m bred med slänter i lutning 1:2, se figur nedan. Banken består av krossad sprängstensfyllning med tunghet  $19\text{kN/m}^3$  och karaktäristisk friktionsvinkel  $45^\circ$ . Banken förutsätts packas enligt gällande normer, vilket innebär att sättningar i bankfyllningen kan försummas.



För exemplet kan förutsättas att full last från banken ansätts ut till  $2/3$  av slänten, se figuren. Ingen trafiklast medräknas.

Lasten från banken räknas som  $4 \cdot 19 = 76\text{kN/m}^2$

## KC-pelare

KC-pelare är en jordförstärkning och dimensioneringsmetodiken kan hämtas från TK Geo 13, kapitel 13-Djupstabilisering. För att underlätta beräkningarna kan följande egenskaper i pelarna användas:

Pelardiameter 600mm, ger area  $0,28\text{m}^2$   
Bindemedel KC50/50 och 25kg/m

Skjuvhållfasthet:      2-7m djup  $c_{u,KC}=100\text{kPa}$   
                              7-27m djup  $c_{u,KC}=150\text{kPa}$ .

Sättningsmodul  $M_{KC}=13*c_{u,KC}^{1,6}$ , ger:  
 $E_{pel}=26,6\text{MPa}$  (2-7m)  
 $E_{pel}=39,4\text{MPa}$  (2-7m)

Beräkning av den genomsnittliga skjuvhållfastheten och sättningsmodulen i KC-förstärkningen utförs genom bestämning av täckningsgrad som anger andel pelare/ andel jord och beräknas som:

$$M_{komb} = a * E_{pel} + (1-a) * M_{jord}$$

$a = \text{Area pelare} / \text{cc-pelare}$ , t.ex cc 0,9m ger  
 $0,28/0,9^2 = 0,35$  i täckningsgrad

$M_{jord}$  ansätts till ML i tabell 1.

Exempel med c/c 0,9m mellan pelarna i lera 1 ger detta en genomsnittlig sättningsmodul  
 $M_{komb}=0,35*26,6+(1-0,35)*0,5=9,6\text{MPa}$ .

Därefter beräknas genomsnittlig sättningsmodulen i de olika lerlagren så att sättningar kan beräknas för KC-förstärkningen.

## Pålar

Pålgrundläggning med bankpålar förutsätts att man använder 270\*270 pålar som tidigare kallades SP-2 pålar och är den vanligast förekommande påltypen i Sverige. För beräkning av pålar och avstånd/ kapacitet finns det beskrivet i TK Geo 13, kapitel 14-Bankpålning.

Pålarna förutsätts ha följande egenskaper:

- $R_d = 950\text{kN}$  (max last från fyllningen)
- Pålarna förses med bergsko och installeras till berg eller minst 40m djup.
- Pålplattorna har måtten 1,5\*1,5 till 2,2\*2,2m, större pålplattor ger problem på arbetsplatsen.
- Platttäckningsgraden skall vara minst 40% enligt TK Geo 13.

Vid kontroll av lastkapaciteten i pålar ska trafiklast medräknas som kan sättas till  $10\text{kN/m}^2$  vid pålavskärningsplanet.

### **Teknisk analys**

Den tekniska delen i analys är att bestämma mängden pålar och omfattningen KC-pelare för att därefter kunna bedöma den ekonomiska aspekten.

#### Pålar

För pålar beräknas ett c-avstånd mellan pålarna utifrån pålens kapacitet, se TK Geo kap. 14.1.3.3.

Därefter kontrolleras beräknat avstånd med plattäckningsgraden så att den pålplatta som väljs inte har mindre täckningsgrad än 40%. Är täckningsgraden mindre än 40% måste avståndet mellan pålarna minskas, då kan inte pålen utnyttja till sin fulla kapacitet.

Kontroll av sättningar behöver inte göras vid pålning men stabiliteten i ytterslänter måste kontrolleras.

Stabiliteten förutsätts vara ok för både pålningen och KC-pelarna.

#### KC-pelare

KC pelarförstärkning måste kontrolleras både avseende sättningskrav och stabilitet. I exemplet tittar vi bara på sättningar.

KC-pelare har ingen restriktion avseende hur tätt de kan sättas, de kan sättas i varandra som ett block, men man bör ej sätta pelarna glesare än  $3 \cdot \text{Diametern}$ .

Sättningsberäkningar utförs som traditionella beräkningar utifrån den genomsnittliga sättningsmodulen som räknats fram i leran.

Lastspridning inom KC-blocket kan ansättas till 4:1 och under KC-förstärkningen kan den ansättas till 2:1.

Sättningskravet för vägen är i exemplet **15cm** totalsättning. Teknisk variation i analysen är att ett litet c/c-avstånd ger en hög modul så att sättningen i KC-förstärkningen blir liten och då ska leran under pelarna ta mer last. Medan lite glesare med pelare ger mer sättningar i KC-förstärkningen men i gengäld kan man sätta längre pelare så att leran under förstärkningen blir mindre belastad.

### **Ekonomisk analys**

Ekonomi i de olika metoderna styrs inte enbart av kostnaden för pålar vs KC-pelare utan kan styras av mycket annat såsom tidplan, tillgång på resurser, miljömedvetenhet, risker etc. etc.

För enkelhet så jämförs bara kostnaden för de olika delarna enligt följande prislista:

Påle SP-2	400kr/m
Pålplatta 1,5*1,5m	3000kr/st
Pålplatta 2,2*2,2m	3500kr/st
Bergsko	1000kr/st
KC Ø600mm	70kr/m
Styckpris	80kr/st

Området som ska förstärkas/ jämföra är följande:

- Banken längd är 100m
- Bredd som pålas 18m
- Bredd som KC-förstärkt 20m

$$\text{Area pålning } 100 * 18 = 1800\text{m}^2$$

$$\text{Area KC-förstärkning } 100 * 20 = 2000\text{m}^2$$

### **Konklusion**

Vad är mest lönsamt och varför?

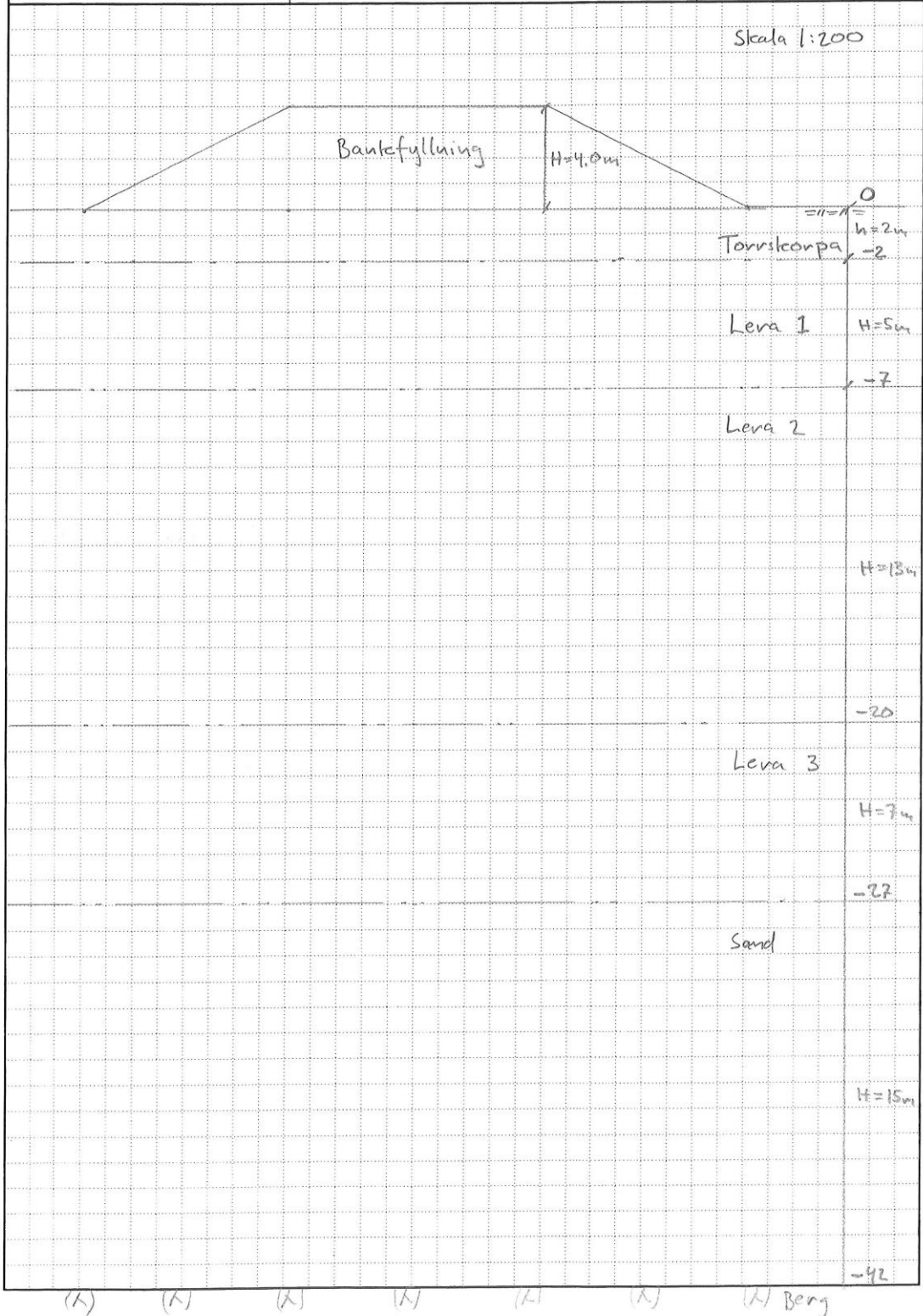
Presentera följande:

- Sättningsberäkningar
- Mängdning pålar; antal pålar, pålplattor och bergskor
- Mängdning KC-pelare; antal, djup, totalt installerade meter pelare.
- Kostnad för respektive lösning
- Varför ni valde en viss lösning

Ni får gärna återkomma om ni har frågor eller om det är oklarheter i underlag för analysen.

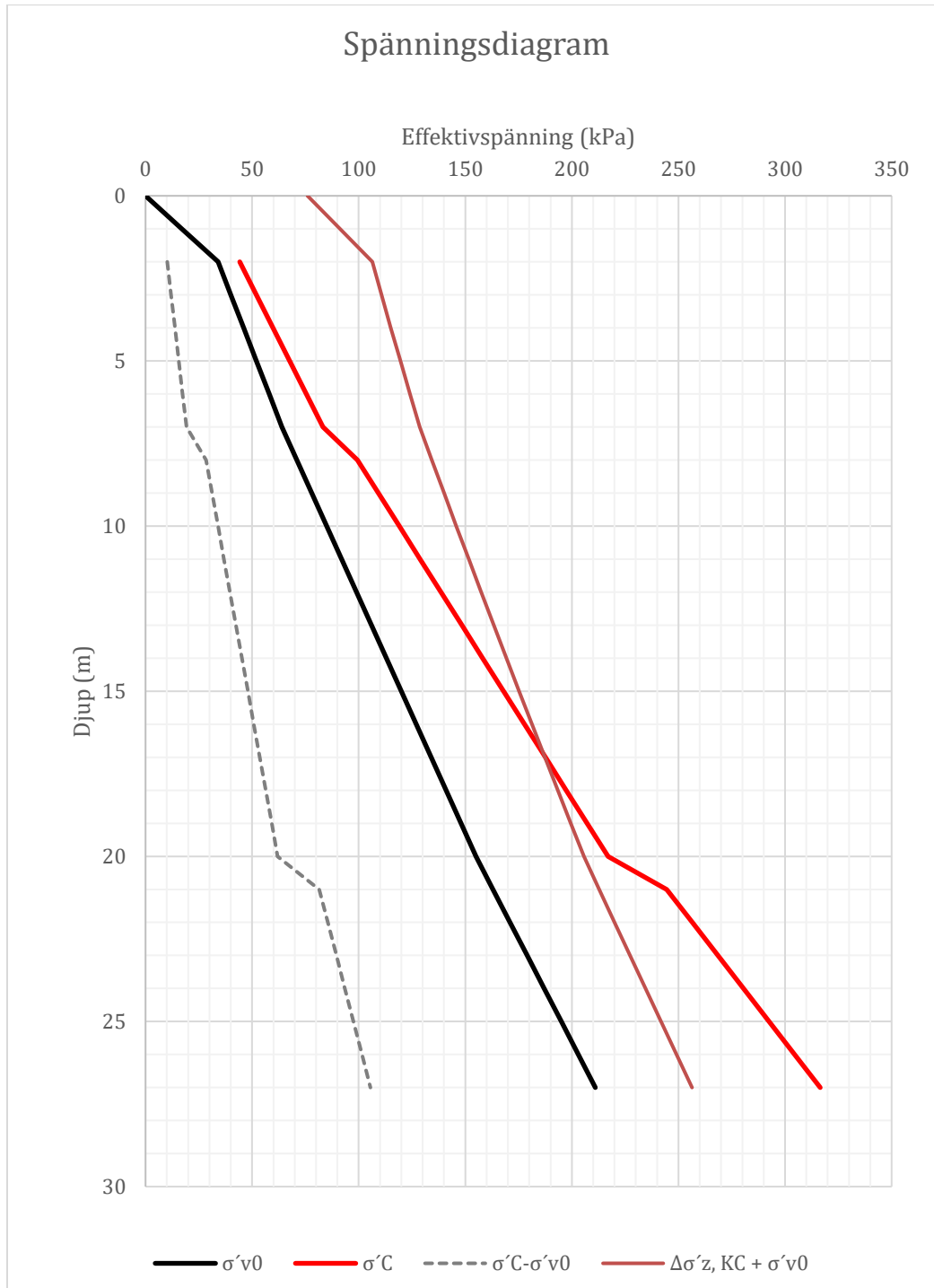
Göteborg 2019-04-18

Marcus Dahlström



## 9.2 Bilaga 2 - Beräkningsgång sättningsberäkning

I bilden nedan visas spänningsdiagrammet som sättningsberäkningen baserades på. Där  $\sigma'_{v0}$  är jordens effektivspänning,  $\sigma'_c$  är förkonsolideringstrycket och  $\Delta\sigma'_{z,KC} + \sigma'_{v0}$  är det sammanlagda jordtrycket. Både från lasten från vägbanken och jordens effektivspänning.



En skiktindelning i jordlagerföljden gjordes baserat på ifall förkonsolideringstrycket underskreds eller överskreds. Följande ekvationer (Sällfors, 2013) användes således för sättningsberäkningen.

Fall 1: används då  $\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_z < \sigma'_c$

$$S = \sum h \frac{\Delta\sigma'_z}{M_0}$$

Fall 2: används då  $\sigma'_c < \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_z$

$$S = \sum h \left( \frac{\sigma'_c - \sigma'_{v0}}{M_0} + \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_z - \sigma'_c}{M_L} \right)$$

Beroende av om jordskiktet som beräknas ligger i eller under den förstärkta jorden beräknas lasten med olika lastspridning. Givetvis ändras även deformationsmodulen beroende av om jordskiktet ligger i eller under den förstärkta jorden.

Sättningsberäkningen för de 17 m långa kalkcementpelarna gjordes därefter enligt följande:

lagerindelning	konsolieringsgrad	$\sigma'_c$	$\sigma'_{v0}$	$\Delta\sigma'_z$ , KC	sättning (m)
2-7 m	normalkonsoliderad	63,7	49	68,32	0,0441
7-14 m	normalkonsoliderad	123,9	88,5	60,20	0,0270
14-17 m	normalkonsoliderad	172,9	123,5	54,78	0,0099
17-20 m	överkonsoliderad	202,3	144,5	39,49	0,0242
20-27 m	överkonsoliderad	274,5	183	34,95	0,0245
27-42 m	överkonsoliderad			27,85	0,0209
totalsättning					0,1506