



## BIG – Branschsamverkan i grunden

Forskningsprogram för effektiv och säker grundläggning av vägar och järnvägar

**Projekt A2019:07**

**Ny provbank på lös lera**

Skapa förutsättningar för att bygga en provbank







**BIG – Branschsamverkan i grunden**  
Forskningsprogram för effektiv och säker grundläggning av vägar och järnvägar

Rapport BIG projekt A2019:07

## **Ny provbank på lös lera**

Skapa förutsättningar för att bygga en provbank



**CHALMERS**

Framtagen inom ramen för BIG av Chalmers tekniska högskola

Stockholm 2021

Rapport publicerad av BIG, Branschsamverkan i grunden  
Beställning Web: [www.big-geo.se](http://www.big-geo.se)

ISBN 978-91-986927-1-6  
Upplaga Digital

Framtagen av Chalmers tekniska högskola

Författare Mats Karlsson



## BIG – Branschsamverkan i grunden

Forskningsprogram för effektiv och säker grundläggning av vägar och järnvägar



## Förord

Under åren 2019–2022 har aktuellt projekt utförts vid Chalmers tekniska högskola där syftet har varit att skapa förutsättningar för att kunna bygga ny provbank på lös lera för att studera långtidsbeteendet samt effekter av klimatförändringar. Projektet har finansierats av Trafikverket via forskningsprogrammet BIG (Branschsamverkan i Grunden) och FORMAS projekt 2016-01070 med titeln ”Catching the slowly changing dynamic response of soft soils”.

Synpunkter har lämnats av Carina Hultén, Trafikverket, samt Jonas Axelsson, Trafikverket, där kontinuerliga diskussioner förts under projektet.

Mats Karlsson

Uppdragsledare

## Sammanfattning

Att prognostisera sättningar tillförlitligt för bankar på lös lera har varit och är fortfarande en stor utmaning för branschen. För att kunna utföra tillförlitliga sättningsanalyser behövs referensobjekt att verifiera emot, så som en provbank där uppbyggnad och mätningar sker under kontrollerade former. Detta projekt har gett inledande förutsättningar för att kunna bygga en provbank på lös lera för att kunna studera långtidsbeteendet och inverkan av klimatförändringar över tid.

Projektet har tillsammans med Fastighetskontoret i Göteborg skapat möjlighet att använda en lokal, norr om Göteborg, som har rätt förutsättningar, dvs ett mäktigt lerlager på över 30 meter. Projektet har utfört inledande fält och laboratorieanalyser på leran samt ett grovt förslag på provbank med tillhörande sättningsanalys. Resultaten av sättningsanalysen, i detta tidiga skede, visar att en provbank bör belastas med minst 40 kPa över en yta som kan representera en verklig bank. För att minimera 3D effekter i mitt delen av provbanken har i analysen använts en längd på provbanken motsvarande tre gånger djupet på leran, dvs 150 m. Bredden på provbanken i aktuell analys är 28 m, släntfot. Sättningen för simulerad provbank gav en sättning på ca 0,85 m efter 40 år och sker mestadels i de översta 10–15 metrarna. Geometrin bör optimeras i ett senare skede.

En grov kostnads kalkyl utfördes inom ramen för projektet för att få en överblick på kostnaderna. I kostnads kalkylen tas kostnader upp för mätutrustning som kallas klassiska, dvs den mätutrustning som används av branschen idag, samt kostnad av framräknad teoretisk volym av analyserad provbank. Kostnaderna uppgår för mätutrustningen till ca 1,35 mnkr och för materialet för banken, inkl. leverans, till ca 4 mnkr.

Slutsatsen av detta projekt är att förvärvat tomt på knappt 29 000 kvm, lämpare sig utmärkt för en forskningsyta där man bland annat kan studera långtidsbeteendet för en provbank samt effekten av klimatförändringar.



# Innehåll

FÖRORD.....	I
SAMMANFATTNING .....	II
INNEHÅLL.....	III
<b>1 INLEDNING.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Syfte och mål.....</b>	<b>1</b>
1.1.1 <i>Begränsningar och förändringar längs vägen.....</i>	<i>1</i>
<b>2 PROVBANKSOMRÅDET .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Geotekniska förutsättningar.....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Utförda fältförsök .....</b>	<b>3</b>
<b>2.3 Utförda laboratorieförsök .....</b>	<b>3</b>
2.3.1 <i>Försök som utförts i närområdet.....</i>	<i>3</i>
<b>3 RESULTAT FRÅN UTFÖRDA FÖRSÖK .....</b>	<b>5</b>
<b>4 NUMERISK MODELLERING .....</b>	<b>8</b>
<b>4.1 Förslag på provbank .....</b>	<b>8</b>
<b>4.2 Indata numerisk analys.....</b>	<b>8</b>
4.2.1 <i>Kalibrering av materialmodellen Creep-SClay1S.....</i>	<i>8</i>
4.2.2 <i>Parametrar till Creep-SClay1S, torrskorpan och provbanken .....</i>	<i>11</i>
<b>4.3 Numerisk modell och resultat .....</b>	<b>11</b>
4.3.1 <i>Resultat.....</i>	<i>12</i>
4.3.2 <i>Diskussion .....</i>	<i>15</i>
<b>5 KOSTNADSKALKYL .....</b>	<b>16</b>
<b>5.1 Grov kalkyl för installation och mätning av mätutrustning.....</b>	<b>16</b>
<b>5.2 Grov kalkyl – bygga provbanken .....</b>	<b>16</b>
<b>5.3 Övriga kostnader.....</b>	<b>17</b>
<b>5.4 Totalkostnad.....</b>	<b>17</b>
<b>6 SLUTSATS OCH REKOMMENDATIONER .....</b>	<b>17</b>
<b>6.1 Rekommendationer.....</b>	<b>18</b>
<b>7 REFERENSER .....</b>	<b>19</b>



# 1 Inledning

## 1.1 Syfte och mål.

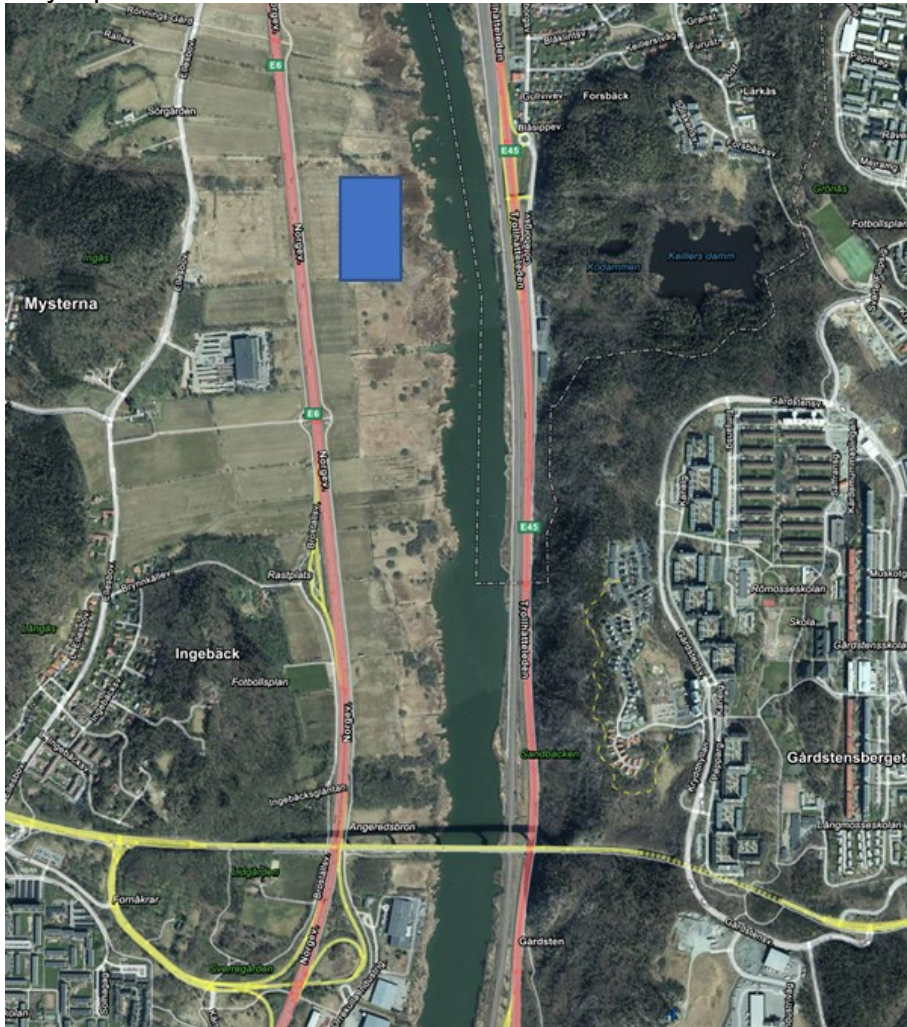
Syftet med detta projekt har varit att skapa förutsättningar för att bygga en provbank. Fokus har varit på långtidsbeteendet av provbanken samt att ta hänsyn till effekterna av klimatförändringar. Projektet har fokuserat på att hitta en lämplig lokal, dvs ett område med mark som kan fungera som en provyta under långtid framöver, samt att karakterisera jordprofilen. Projektet har också haft som mål att skapa en kostnads kalkyl för att bygga och mäta provbanken över en lång tid.

### ***1.1.1 Begränsningar och förändringar längs vägen.***

Att hitta en lämplig lokal samt att få till ett avtal gällande området tog betydligt längre tid än förväntat och har försenat projektet. Även om lokalen i sig hittades relativt fort så tog det mycket tid och resurser att få till ett avtal. Detta fick konsekvensen att första riktiga fältprovtagning av prover utfördes först i början av 2021. Detta innebär att laboratorieförsök påbörjades först efter första fältprovtagningen och var färdiga i början av maj 2021.

## 2 Provbanksområdet

Provområdet är beläget norr om Göteborg och ligger beläget i dalgången väster om Göta älv ca 1,5 km norr om Angeredsbron, se Figur 1. För aktuellt område har avdelning Geologi och Geoteknik på Chalmers, via Chalmers Fastigheter, ingått ett arrendeavtal med Fastighetskontoret på Göteborgs Stad som löper med 10-års intervaller. Aktuellt område har en yta på ca 28 800 kvm.



Figur 1. Geografisk placering av potentiella provbanksområdet. Kartbild från [www.eniro.se](http://www.eniro.se).

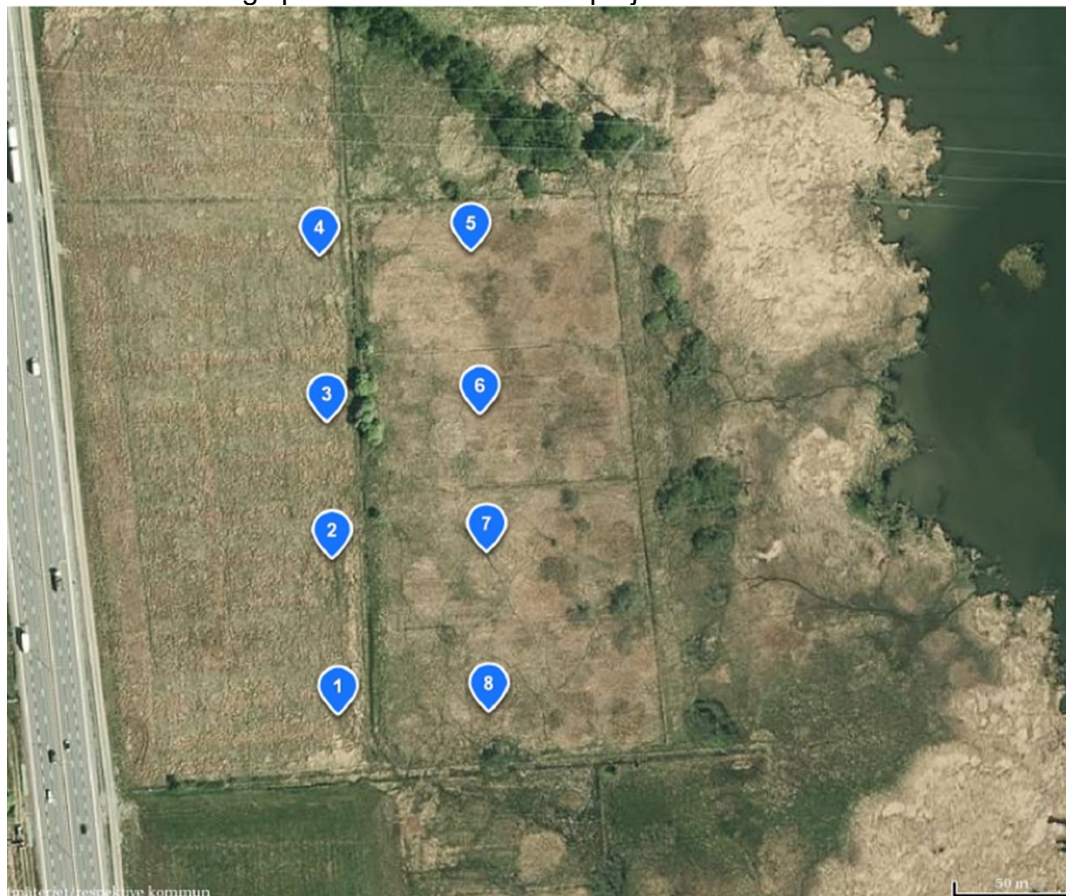
### 2.1 Geotekniska förutsättningar

Området är beläget i Göta älvs dalgång mellan Göta älv och Norgevägen (E6) ca 1,5 km norr om Angeredsbron. Markytan är plan med vildvuxet gräs och några små diken. Jordprofilen består av ett mäktigt lager av lös lera till ett djup av ca 50 m, som baseras på initiala CPT<sup>1</sup> sonderingar för att bestämma områdets lämplighet för att bygga eventuell provbank i området.

<sup>1</sup> CPT - Cone Penetration Test

## 2.2 Utförda fältförsök

I fält har det, inom ramen för detta projekt, utförts 8 st. CPT sonderingar till ett djup på ca 40–50 m och ostörd provtagning i en sonderingspunkt (pkt 8) ner till ca 10 m djup, se Figur 2 för placering av sonderingspunkter. I samband med provtagning för detta projekt möjliggjordes det att det även togs prover till ett annat BIG projekt.



Figur 2. Utförda CPT sonderingar och dess placering. I punkt 8 har ostörd provtagning också utförts. [www.eniro.se](http://www.eniro.se)

## 2.3 Utförda laborieförsök

I laboriet har första fasen av att karakterisera jordprofilen i området påbörjats. Prover ner till 10 m djup har tagits upp och följande försök har utförts inom ramen för detta projekt t.o.m. maj 2021, se

Tabell 1. Utöver detta så utfördes också glödningsförsök på prover för att uppskatta organiska halten. Det ska noteras att felkällorna för denna metod på en lerjord som har organisk halt <20% är stora, se [1].

### 2.3.1 Försök som utförts i närområdet

Utöver försök som utfört inom ramen för detta projekt återfinns det en betydande mängd data från när E45/Norge-Vänerbanan byggdes. Provområdet ligger på västra sidan av Göta älv och E45/Norge-Vänerbanan ligger på östra sidan, ca 350 m ifrån varandra. En del av den data från laborieförsöken har tagits med i denna rapport för att jämföra jordegenskaper.

**Tabell 1. Utförda försök i laboratoriet.**

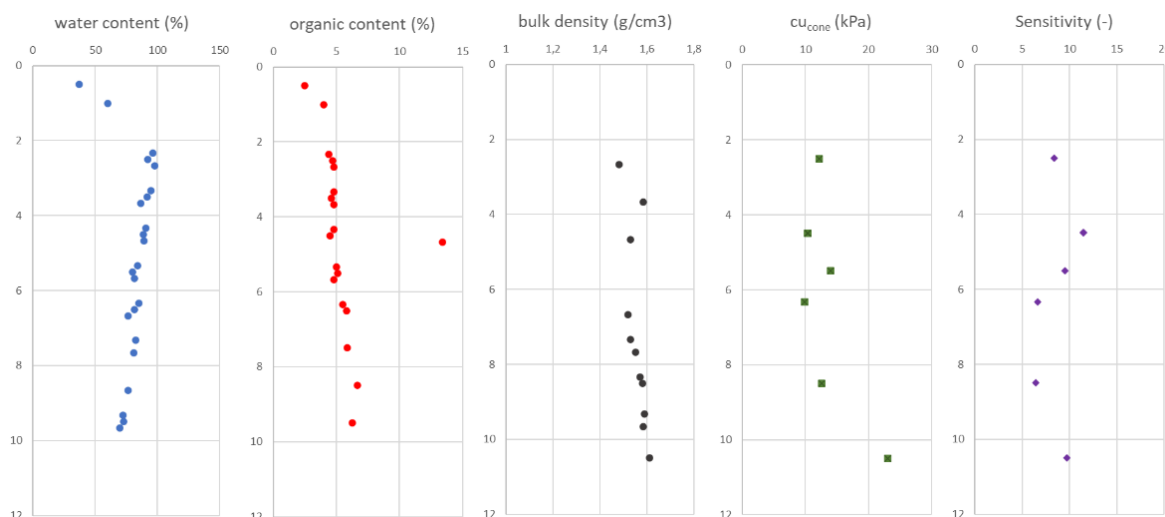
Djup	Rutinförsök	CRS	IL	TX
0-1	$w_N$ ,			
1-2	$w_N, \rho, c_u^{\text{kon}}$		1	
2-3	$w_N, \rho, c_u^{\text{kon}}, S_t$		1	
3-4	$w_N, w_L, w_P, \rho, c_u^{\text{kon}}$	1	1	
4-5	$w_N, \rho, c_u^{\text{kon}}, S_t$	1	1	
5-6	$w_N, \rho, c_u^{\text{kon}}, S_t$	1	1	
6-7	$w_N, \rho, c_u^{\text{kon}}, S_t$	1	1	1+1
7-8	$w_N, \rho, c_u^{\text{kon}}$	1		1
8-9	$w_N, \rho, c_u^{\text{kon}}$	1		1+1
9-10	$\rho, c_u^{\text{kon}}, S_t$			

CRS – Constant Rate of Strain, IL – Stegvisa ödometerförsök, TX – Triaxialförsök

### 3 Resultat från utförda försök

Nedan kommer försöksresultaten redovisas för att visa jordegenskaperna för provområdet, en mer utförlig rapport gällande fält- och laboratorieförsök kommer att skapas i en separat rapport som kommer uppdateras kontinuerligt med mer fält- och laboratorieförsök. Denna rapport kommer att färdigställas inom ramen för ett annat projekt.

I Figur 3 kan ses resultat från densitet, vattenkvot, organisk halt, sensitiviteten samt odränerad skjuvhållfasthet från konförsök ner till ca 10 m djup. Översta 2 metrarna indikerar på en torrskorpa som övergår till lera med en vattenkvot på ca 100% på 2 meters djup. Sedan avtar vattenkvoten linjärt mot djupet till ca 70% vid 10 m. Organiska halten verkar ligga runt 5%, men metoden som använts är osäker då halten understiger 20% enligt [1]. Densiteten i området ligger mellan 1,5 – 1,6 t/m<sup>3</sup> ner till 10 m djup. Sensitiviteten varierar runt 5–12 och odränerad skjuvhållfasthet enligt konförsök ligger runt 10–12 kPa ner till 8–9 m för att sedan öka. I Figur 4 redovisas resultat från CPT sonderingar från området som visar att det är en relativt homogen jordlagerprofil bestående av lera och verkar sluta vid ett djup på ca 50 m. I Figur 4 (a) redovisas spetstrycket och i (b) redovisas utvärderad odränerad skjuvhållfasthet ( $c_u$ ), förenklat enligt  $c_u = (q_T - \sigma_{v0}) / 17$ .

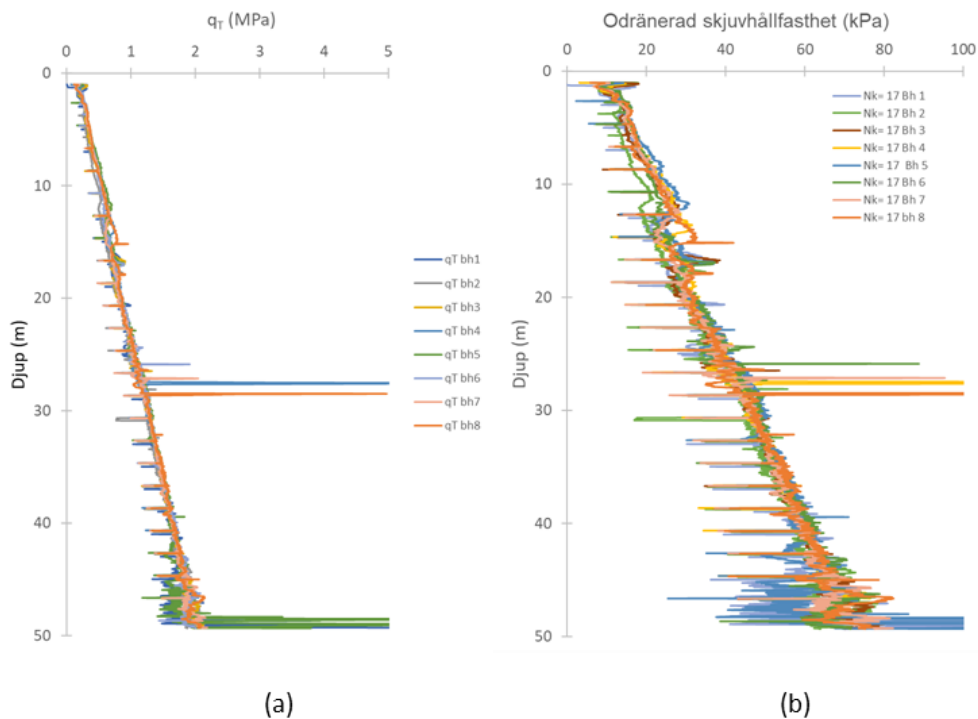


**Figur 3. Index parametrar för de översta 10 m i provområdet.**

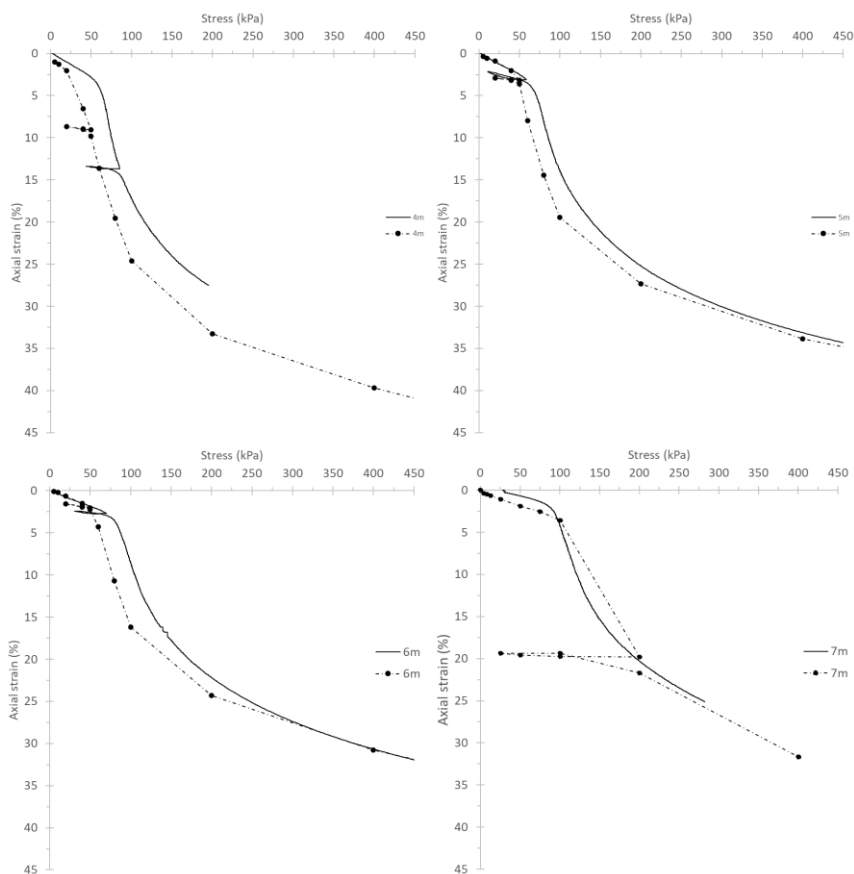
I Figur 5 redovisas CRS försök och stegvisa odometer (IL)-försök för 4, 5, 6 och 7 m djup. Varje djup redovisas för sig, dvs CRS och IL försöken för respektive djup är plottade i samma graf. För djupen 4, 5 och 6 m ger CRS försöken en högre utvärderad förkonsolideringstryck än vad IL försöket ger, vilket är att förvänta m.h.t. deras olika tid för att nå detta värde. För IL försöket vid 7 m påvisas ett betydligt högre förkonsolideringstryck än vad som förväntas utifrån CRS försöken på både 6 och 7 m och IL försöket från 6 m.

I Figur 6 redovisas utvärderade kryppparametrarna tidsmotståndstalet,  $r$ , och kryptalet,  $\mu^*$ , mot vertikala effektivspänningen. Det kan ses i Figur 6 att kryptalet,  $\mu^*$ , startar från ett mycket lågt värde vid låga effektivspänningar, lägre än in-situ, för att sedan öka till ett maxvärde runt förkonsolideringstrycket. När effektivspänningarna passerar förkonsolideringstrycket kan ses att kryptalet minskar väldigt fort med ökande effektivspänning och verkar gå mot ett asymptotiskt värde vid högre effektivspänningar.

Inom projektet har det utförts två triaxialförsök som redovisas i Figur 7 tillsammans med fyra triaxialförsök (två aktiva och två passiva försök) från en stabilitetsutredning för E45 som är belägen på andra sidan Göta älv, dvs öster från aktuellt område.

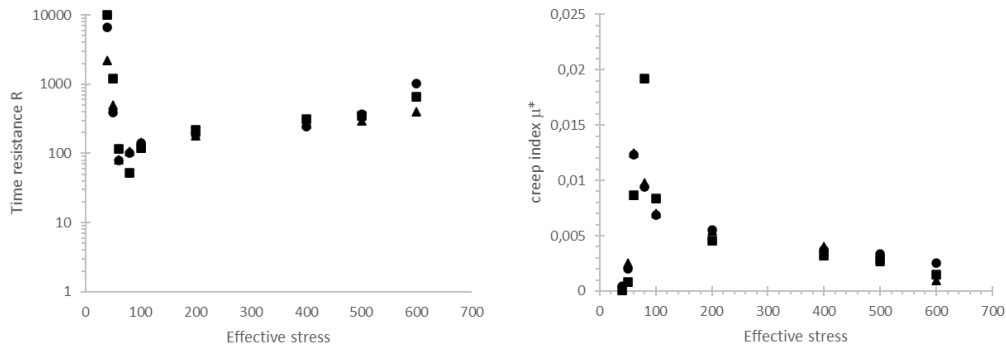


**Figur 4.** Resultat från CPT sonderingar i (a) visas  $q_T$  och i (b) enkel utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet.

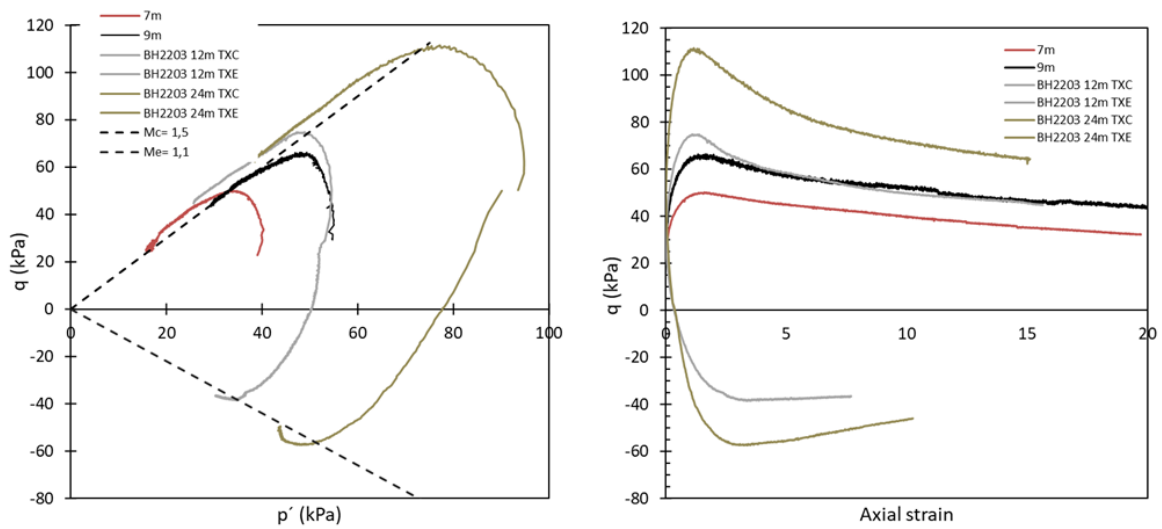


**Figur 5.** CRS (solid linje) och IL (punkt med streckad linje) försök plottad för fyra olika 4m, 5m, 6m & 7m djup.





**Figur 6.** Utvärderad kryppparameter,  $r$  (vänster) och  $\mu^*$  (höger), från stegvisa ödometer (IL) försök mot vertikal spänning.



**Figur 7.** Utförda triaxialförsök (2 st aktiva) plottade i  $p'$ - $q$  (vänster) och  $q$ - $\epsilon_a$  (höger) diagram tillsammans med 2 st aktiva och 2 st passiva triaxialförsök från BH2203 E45/Norge-Vänerbanan.

## 4 Numerisk modellering

För att kunna bedöma hur stora de vertikala och horisontella rörelserna kommer att bli för en provbank har numerisk modellering utförts i COMSOL v5.6 med material modellen Creep-SClay1S för att försök fånga det relevanta lastfallet. Creep-SClay1S modellen finns beskriven i [2, 3]. Utifrån från fält- och laboratorieförsök har materialmodellen kalibrerats för att återspegla lerans beteende mot djupet.

### 4.1 Förslag på provbank

Ett förslag på provbank visas i Figur 8 där provbanken har en längd på 150 m och en bredd på 20 m relaterat till slänkrön på banken. Slänterna för provbanken är satt till 1:2 i detta skede. Längden på provbanken är satt tre gånger det ungefärliga djupet till fastare jord/berg för att få en del av provbanken att representera en verklig vägbank som är långsträckt. Geometrin på provbanken kommer att optimeras i ett senare skede då mer fält- och laboratorieförsök har utförts i området och jordegenskaper har bestämts mer i detalj.

### 4.2 Indata numerisk analys

Antagen spänningssituation i området redovisas i Figur 11 med en last på 40 kPa från provbanken, vilket motsvarar ca 2 m fyllningsmaterial. I denna studie har "plane strain" villkor antagits i den numeriska modellen och en provbankshöjd på 2 m använts och resultat kommer redovisas nedan.

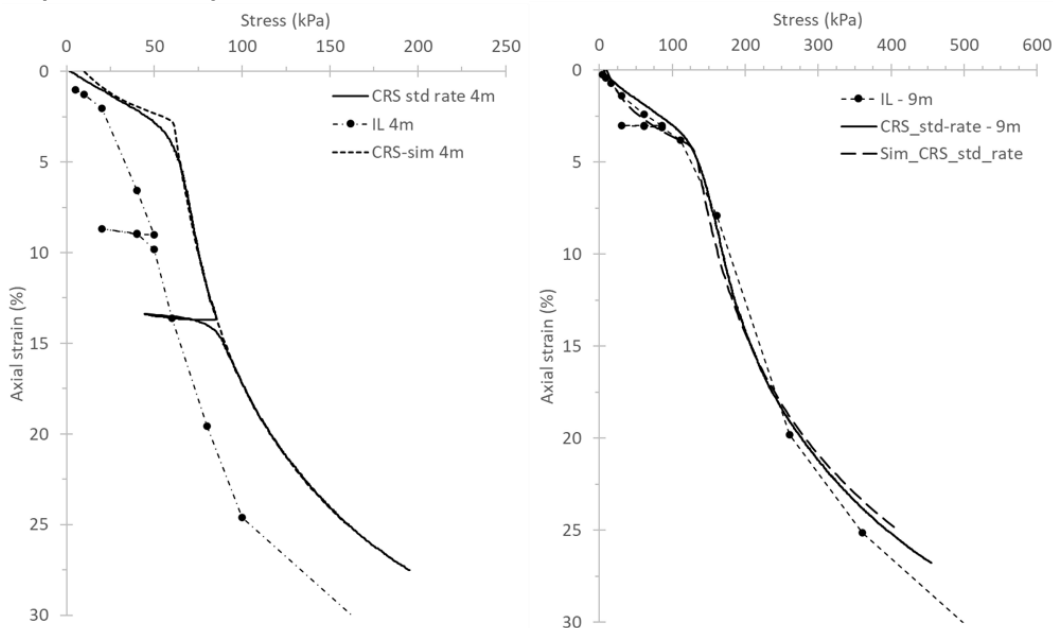
#### 4.2.1 Kalibrering av materialmodellen Creep-SClay1S

Utifrån utförda försök har materialmodellen Creep-SClay1S kalibrerats. Då i denna studie endast laboratorieförsök ner till ca 10 m djup har utförts har djupare lerlager anpassat efter äldre laboratorieresultat från E45 på andra sidan Göta Älv samt utförda CPT sonderingar i aktuellt område. I Figur 9 ses jämförelse mellan CRS försök utförda i laboratoriet och simulerade för 4m och 9m djup. Simulerade CRS försök har använt samma deformationshastighet som utförts i laboratoriet, dvs 17% på ett dygn. I figuren ses också resultatet från stegvisa ödometerförsök (IL) för respektive djup. I figuren ses att Creep-SClay1S fångar beteendet bra i sin helhet men vid låga effektivspänningar så tenderar modellen att överskatta töjningarna. I Figur 10 redovisas jämförelse mellan utförda triaxialförsök från laboratoriet och simulerade med Creep-SClay1S modellen för 7 m och 9m djup. Jämförelsen redovisas i  $p'$ - $q$  spänningsdiagram där  $p'$  är medel effektivspänning ( $p' = (\sigma'_v + 2\sigma'_h)/3$ ) och  $q$  är deviatorspänningen ( $q = \sigma'_v - \sigma'_h$ ). I aktuellt projekt har bara aktiva triaxialförsök utförts ner till ett djup av 9 m och därav jämförs simuleringarna också mot äldre utförda försök från E45 BH2203 från 12 m djup, vilket ses i figuren.

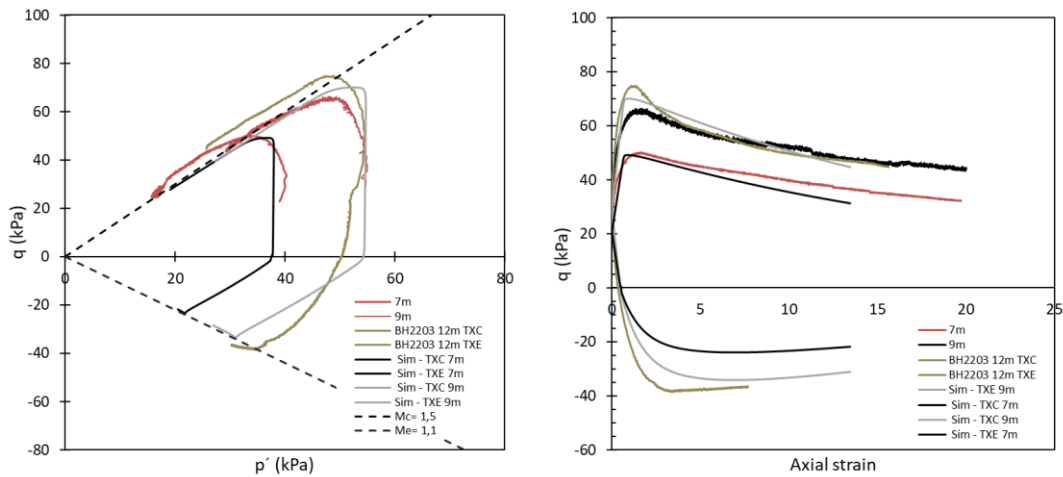


**Figur 8. Ett förslag på utformning av provbank i plan. Bakgrundskarta från [www.eniro.se](http://www.eniro.se).**

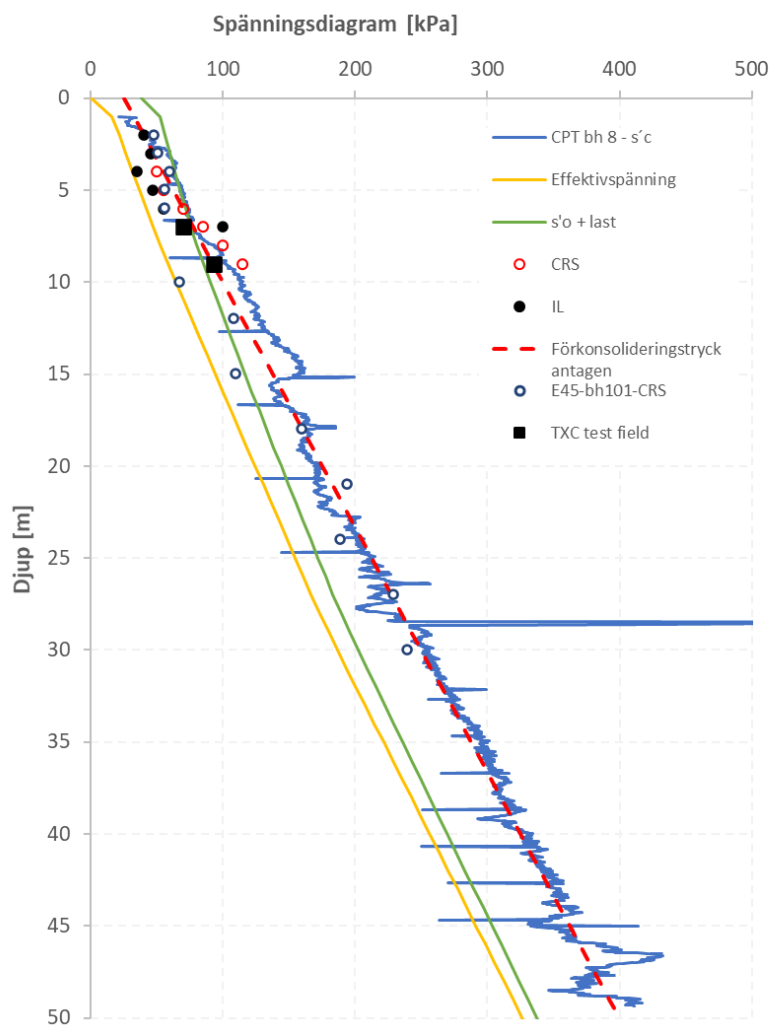
I Figur 10 ses att modellen fångar aktivsidan bra, men överskattar hållfastheten för 9 m försöket en aning ca 5%. Då inga passivförsök har utförts i aktuellt område så är det med viss osäkerhet av hur bra modellen fångar just detta. Men jämförelsen mellan simulerat försök på 9 m och BH2203 på 12 m så fångas beteendet bra, men det ska noteras att det skiljer ca 3 m i djup för dessa försök och BH2203 som kommer från andra sidan Göta älv.



**Figur 9. Jämförelse mellan CRS försök (4m och 9m djup) utförda i laboratoriet och simulerade med Creep-SClay1S.**



**Figur 10. Jämförelse mellan triaxialförsök från laboratoriet och simuleringar för 7m och 9m djup samt äldre triaxialförsök från E45 BH2203 från 12m djup. Vänstra figuren visar p'-q spänningsdiagram och högra figuren visar q-axial töjning.**



**Figur 11. Antagen spänningssituation i mitten under provbanken.**

## 4.2.2 Parametrar till Creep-SClay1S, torrskorpan och provbanken

Utifrån kalibrering har följande parametrar till Creep-SClay1S modellen tagits fram, se Tabell 2 och Tabell 3. För torrskorpan så finns väldigt lite information just nu och en linjär elastisk modell har använts där, se Tabell 4. Förkonsolideringstrycket i jordprofilen har antagits enligt Figur 11 där det ökar från 25 kPa vid markytan till 400 kPa vid 50m djup, vilket motsvarar ungefär OCR 1.25-1.4 från 15m djup och djupare och ökar mot markytan, se Figur 18 (a). Densiteten i leran under torrskorpan ökar från 1,5 t/m<sup>3</sup> till 1,75 t/m<sup>3</sup> vid 50 m djup. För provbanken har en linjär elastisk modellen använts och egenskaperna återfinns i Tabell 5. Här har ett relativt lågt värde på E-modulen antagits då materialegenskaperna på provbanken inte har bestämts ännu.

**Tabell 2. Utvärderade parametrar för Creep-SClay1S modellen.**

Depth (m)	$\kappa^*$ (-)	$\nu_{ur}$ (-)	$\lambda_i$ (-)	$\mu_i^*$ (-)	$\omega_v$ (-)	$\omega_d$ (-)	$\tau_{ref}$ (day)
1 - 5	0,02	0,2	0,095	2,5E-3	20	0,8	1
5 - 50	0,02	0,2	0,09	2,5E-3	20	0,8	1

**Tabell 3. Utvärderade parametrar för Creep-SClay1S modellen.**

Depth (m)	$\chi_0$ (-)	$\xi_v$ (-)	$\xi_d$ (-)	$M_c$ (-)	$M_c$ (-)	$K_{nc}^0$ (-)
1 - 5	9	9	0.6	1,5	0,9	0,55
5 - 50	8	8	0.65	1.5	0,9	0,55

**Tabell 4. Antagna parametrar för torrskorpan.**

Depth (m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	$\nu_{ur}$ (-)	E (MPa)
0 - 1	1.6	0,33	2

**Tabell 5. Antagna parametrar för torrskorpan.**

Depth (m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	$\nu_{ur}$ (-)	E (MPa)
0 - 1	2,0	0,30	5

## 4.3 Numerisk modell och resultat

Provbanken är modellerad i 2-D plane strain och en symmetrilinje i mitten av bankens bredd är ansatt för att minska storleken på modellen. Meshen består av triangulär mesh med varierande storlek, se

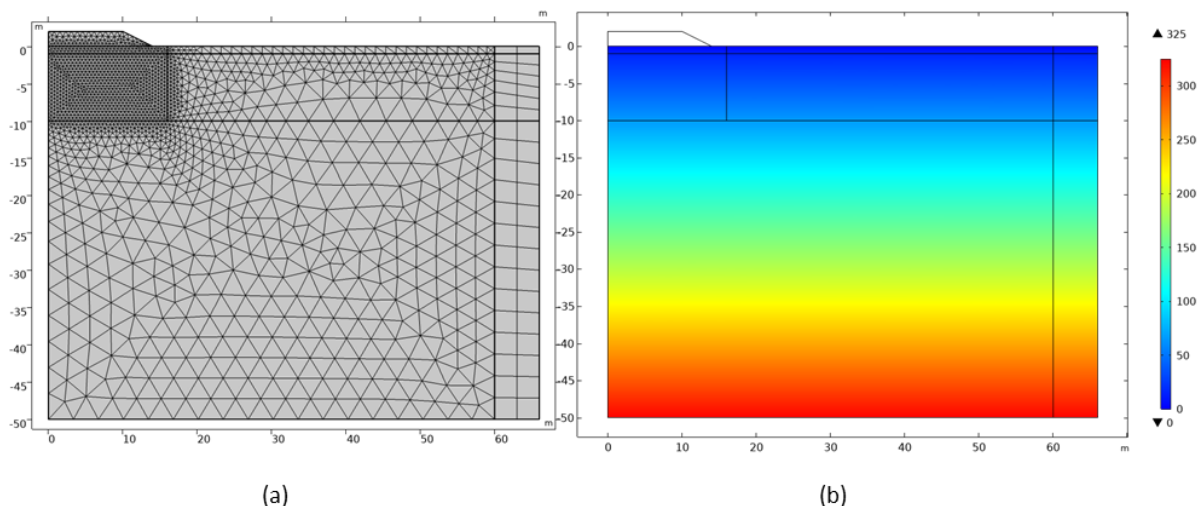
Figur 12. Närmast under banken har en maxstorlek på 0.5m i mesh storlek ansatts. Meshen består av 3337 triangulära (2<sup>nd</sup> order) element. Den del av meshen som befinner sig 60-65m från centrumlinjen, dvs längst från provbanken, består av "inifinte elements" vilket skalar upp geometrin horisontellt, virtuellt, vilket innebär att randvillkoret hamnar på ett betydande avstånd. Provbanken är 10 m i bredd, släntkrön, och 2 m i höjd samt en släntlutning 1:2 vilket ger en totalbredd på 14 m i modellen, se Figur 12, detta motsvarar halva den verkliga bredden.

Modellen är uppbyggd på följande sätt:

Skapa in-situ spänningar innan provbanken, se

Figur 12.

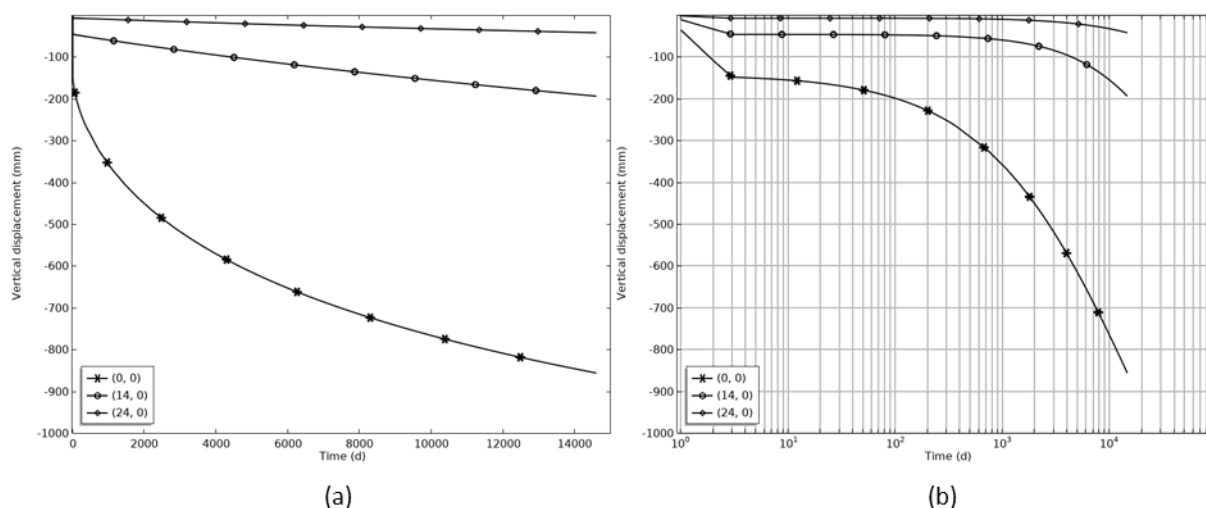
Provbanken byggs under 3 dagar, dvs i modellen så ökar densiteten från 0 till 2 t/m<sup>3</sup> på 3 dagar. Konsolidering av belastningen från provbanken under 40 år (14 600 dagar).



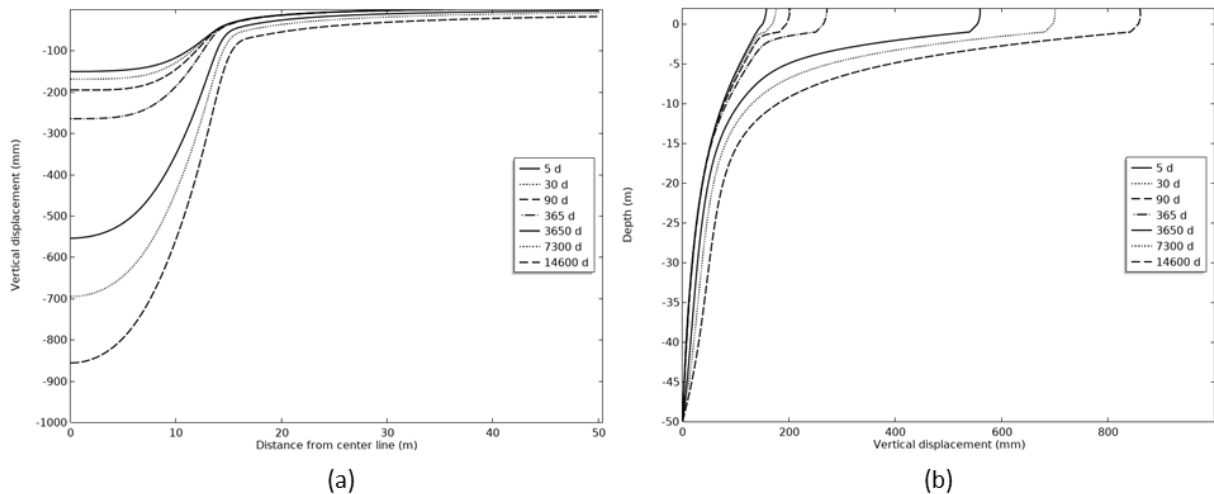
**Figur 12.** I (a) ses geometrin samt använd meshen i modellen och (b) ses vertikala effektivspänning in-situ.

### 4.3.1 Resultat

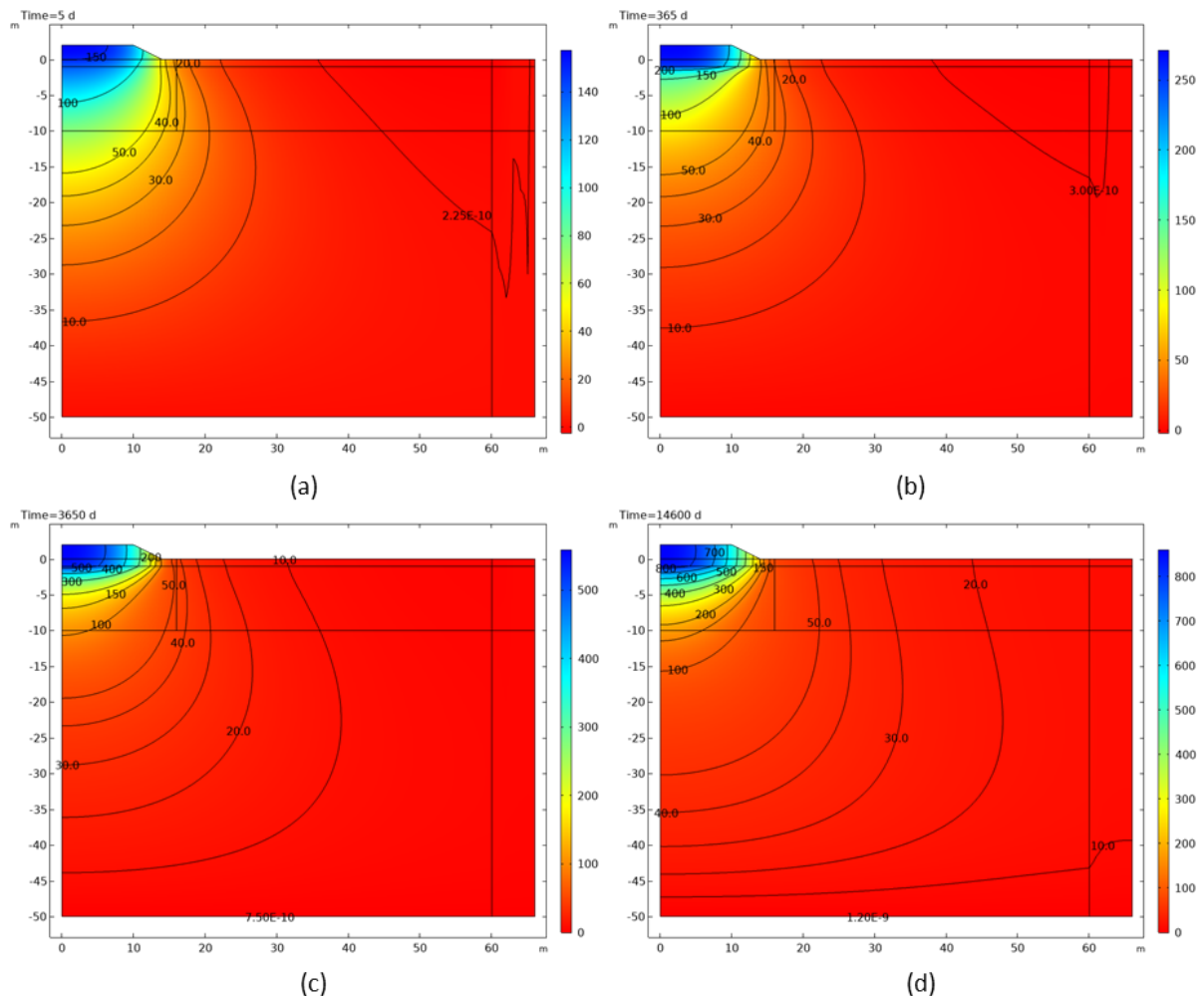
Nedan redovisas resultat för provbank med en totalbredd i modellen på 14 m i släntfoten. I Figur 13 redovisas sättning mot tid och det kan ses att sättningen kommer enligt beräkningen bli ca 0,85 m i mitten av provbanken efter 40 år från att provbanken byggts. Det kan också ses att sättningen vid släntfoten och 10 m utanför släntfoten är sättningarna betydligt mindre, dvs efter 40 år så är det ca 0,65 m differenssättning från mitten av banken ut till släntfoten. I Figur 14 (a) ses vertikal sättning längs med markytan för olika tider och provbanken sätter sig relativt jämt till att börja med och ju längre tiden går desto större differenssättningar fås. I Figur 14 (b) ses vertikal sättning mot djupet i mitten av banken och här ses att de största sättningar är i de översta 10–15 metrarna av jordprofilen, vilket överensstämmer med var förkonsolideringstrycket överskrides. I Figur 15 redovisas vertikal sättning för fyra olika tider. De visar hur sättningen förändras över tid för hela geometrin mht. Provbanken.



**Figur 13.** Sättning mot tid för tre olika placeringar längs med markytan, i mitten av banken (0,0), vid släntfot (0,14) och 10 m utanför släntfot (0,24). I (a) ses tid i linjär skala och i (b) ses tid i logaritmisk skala.



**Figur 14.** I (a) vertikal sättning längs med markytan och i (b) vertikal sättning i centrumlinjen mot djupet.



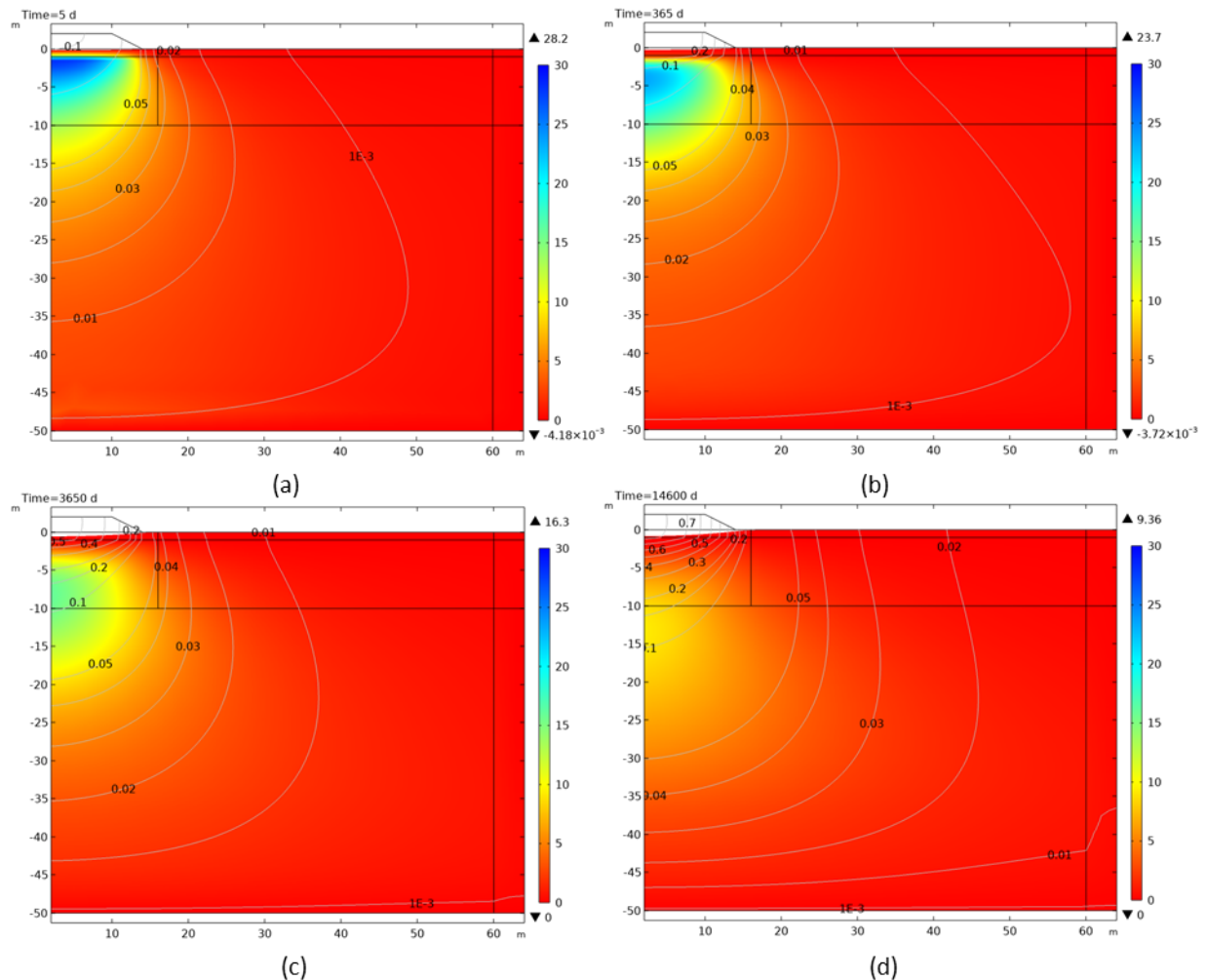
**Figur 15.** Vertikal sättning för fyra olika tider i (a) 5 dagar, i (b) 365 dagar, i (c) 3650 dagar samt i (d) 14 600 dagar.

I Figur 16 redovisas porövertrycket för fyra olika tider tillsammans med vertikal sättning mha. konturlinjer. Porövertrycket är, som förväntat, störst efter pålastningen och minskar med tiden vilket återspeglar sättningsutvecklingen för provbanken. Efter 40 år återstår det ett

porövertryck på ca 10 kPa enligt Figur 16 (d) vilket indikerar att det fortfarande finns betydande sättningar att förvänta över tid. Detta överensstämmer med sättning mot tid i Figur 13 där trend är avtagande men inte stannat av.

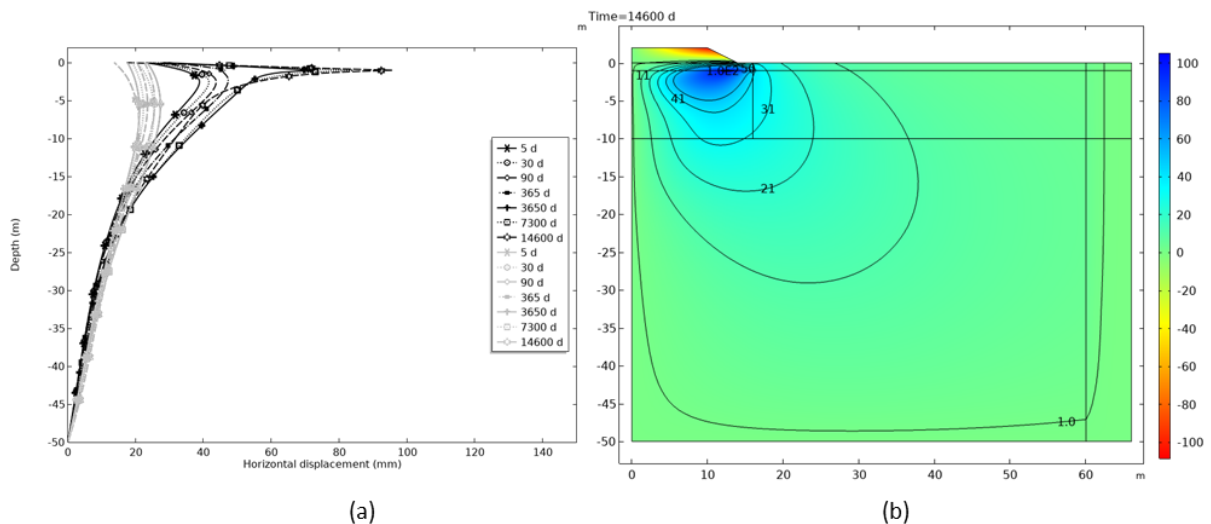
I Figur 17 (a) redovisas horisontella rörelser mot djupet vid släntfot och 10 m utanför släntfoten. I Figur 17 (b) ses en surface plot tillsammans med en kontur plot för tiden 14 600 dagar. Man kan se i Figur 17 (a) att de horisontella rörelserna är störst de översta fem metrarna och sedan avtar de mot djupet.

I Figur 18 redovisas överkonsolideringsgraden ( $OCR = \sigma' / \sigma'_v$ ) före byggnation, in-situ, och efter 14 600 dagar. Vertikala förkonsolideringstrycket efter 14 600 dagar är baserat på värdet på  $K_0^{nc}$ ,  $M_c$ , rådande  $\alpha$  samt ekvivalenta förkonsolideringstrycket  $p_c$ . I Figur 18 kan man se att OCR har kraftigt minskat under provbanken pga. pålastningen och efter 40 år ligger OCR på ca 1–1,3 under mitten av provbanken för hela jordprofilen och lägst närmast markytan.

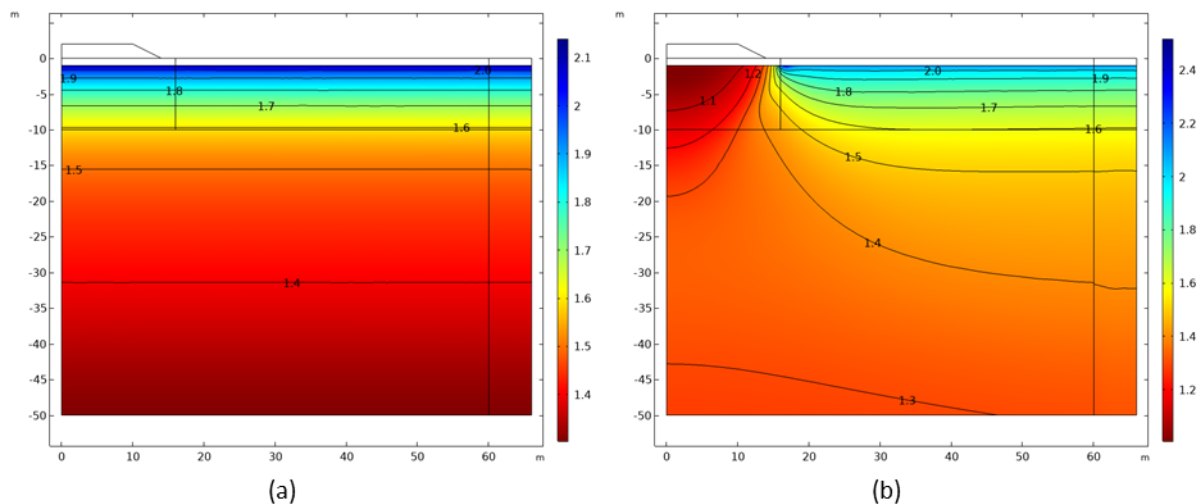


**Figur 16.** Porövertryck (kPa) och vertikal sättning (m) för fyra olika tider i (a) 5 dagar, i (b) 365 dagar, i (c) 3650 dagar samt i (d) 14 600 dagar. Gråa linjer anger vertikal sättning och färgskalan anger porövertrycket.





**Figur 17** Horisontella rörelser i (a) vid släntfot (svarta linjer) och 10 meter utanför banken (gråa linjer) och i (b) ses konturplot tillsammans med surface plot.



**Figur 18.** Överkonsolideringsgraden ( $OCR = \sigma'_c / \sigma'_v$ ) i (a) in-situ och (b) efter 14 600 dagar.

### 4.3.2 Diskussion

Utifrån utvärderade parametrar som kalibrerats mot Creep-SClay1S fås som mest en vertikal sättning på ca 0,85–0,9 m i mitten av provbanken efter 40 år med en last på 40 kPa och aktuell geometri på provbanken. Den horisontella rörelsen är som mest runt släntfoten av provbanken och uppgår till ca 0,1 m efter 40 år. Porövertrycket efter 40 år är ca 10 kPa som störst, se Figur 16, vilket indikerar att sättningen kommer fortgå under en långtid framöver. Man kan också se att under de första 10 åren så utvecklas mer än 50% av sättningen jämfört med sättningen efter 40 åren. Därav är det extra viktigt att få bra och kontinuerliga mätserier under denna period. Den vertikala sättningen, i mitten av provbanken, är som störst de översta 10 metrarna, vilket är att förvänta, och avtar mot djupet. Detta hänger ihop med var lasttillskottet inklusive in-situ effektiv spänningen ( $\sigma'_0 + \text{last}$ ) överskrider eller befinner sig nära lerans förkonsolideringstryck, se Figur 11.

Överkonsolideringsgraden (OCR) som är utvärderad är högre än vad normalt ses i Göteborgslera, men den är utvärderad från plats specifika laborieförsök och CPT försök. Anledning till en högre OCR i detta område är inte fastställt ännu och mer laborieförsök krävs för att verifiera antagen OCR och tillhörande parametrar, speciellt mot djupet då endast de överst 10 metrarna är utvärderade i laboriet i begränsad omfattning.

## 5 Kostnads kalkyl

Kostnads kalkylen nedan är en grov uppskattning av olika moment som krävs för att bygga provbanken och mer exakta siffror kommer tas fram i ett senare skede då det är aktuellt.

### 5.1 Grov kalkyl för installation och mätning av mätutrustning

Kostnads kalkylen som redovisas här en grov uppskattning på kostnader för installation av klassisk mätutrustning så som inklinometrar, sättningsmätare typ bälgslang, pegrar och slangläggning och porttrycksmätare. Kalkylen innefattar också en uppskattning på kostnader för hyra av utrustning för automatisk mätning av inklinometrar och porttryck.

I denna kalkyl är det antaget att det blir 3 sektioner som kommer instrumenteras för att följa markrörelserna och porttrycket.

I varje sektion kommer det sitta följande utrustning:

- 4 st inklinometrar ca 20–30 m djup
- 5 st bälgslangar till ca 45 m djup
- 1 st slangläggningssättningsmätare
- 20 st porttrycksmätare

Kalkylen för installationskostnaden för varje sektion blir ca 300 000–350 000 kr. Utöver detta tillkommer mätningen av denna utrustning och första året kommer denna kostnad vara högre då mätning kommer ske oftare och med mer automatisk uppföljning. Under byggnation och efterföljande månader måste det vara ett aktivt beslut om hur mätningen ska fortgå. Första tiden är den kritiska och automatiskmätning av inklinometrar och porttryck är viktigt för att följa utvecklingen över tid på ett optimalt sätt. Bäckslangsmätning finns tyvärr inte idag med automatiskmätning utan sker manuellt.

En uppskattning av kostnaden för första året inklusive installation av utrustning av klassiska metoder, klassiska menas här med metoder som använts i många tidigare projekt, blir ungefär:

- Installation ca 350 000 kr/sektion
- Mätning första året ca 100 000 kr/sektion

Total kostnad blir ca 1 350 000 kr för 3 sektioner för första året för installation och mätning av klassiska mätmetoder. Därefter kommer sannolikt kostnaden för mätning minska per år.

I denna kalkyl tas inte nyare metoder gällande mätutrustning med då dessa metoder inte har bestämts och således inte heller de relaterade kostnaderna. Detta kommer att utredas vidare i ett senare skede.

### 5.2 Grov kalkyl – bygga provbanken

Provbanken är i detta skede antagen till en utbredning på längd på 150 m och en bredd på 20 m i släntrörelsen och en höjd på 2 m med en släntrörelse på ca 1:2. Detta ger en ungefärlig volym på ca 7400 m<sup>3</sup> material och med en densitet på 1,8 t/m<sup>3</sup> så blir det 13 320 ton vilket motsvarar ca 1000 lastbilar utan släp och 450–500 lastbilar med släp. Kostnaden för varje lastbil, utan släp, antas till 4000 kr per leverans av material, inklusive materialet. Detta ger en kostnad på ca 4 000 000 kr för att leverera materialet till området. Utöver detta behövs

grävmaskinister för att förbereda området och fördela ut materialet som används. Denna kostnad tas inte upp i detta skede.

### 5.3 Övriga kostnader

Övriga kostnader som uppkommer och inte kommer tas upp här är följande:

- Arbetsväg fram till provbanken ca 150 m lång och 4 m bred.
- Återställa grusväg fram till provbanksområdet
- Tid för att ta fram bygghandlingar inklusive alla tillstånd
- Grävmaskiner för byggnation av provbank
- Övriga oförutsedda kostnader

Ovanstående kostnader är några kostnader som kommer uppstå men inte tagits hänsyn till i denna rapport, men kommer att arbetas fram för den slutliga ansökan för att bygga provbanken. Eventuellt kommer olika moment att delas upp för att fördela kostnader över flera år.

### 5.4 Totalkostnad

Totalkostnaden för installation av klassisk mätutrustning med tillhörande mätning under första året samt leverans av material för provbanken bedöms vara 5 350 000 kr. Observera att övriga kostnader inte är med här som beskrivits ovan. Fortsatt mätning bedöms ligga på runt 100 000 - 200 000 kr per år beroende på hur mycket automatisering som ska finnas kvar och hur ofta man mäter manuellt.

## 6 Slutsats och rekommendationer

Aktuellt område som studerats med syfte att användas till ett testområde för att bygga bland annat en provbank som är tänkt att monitoreras under en lång tid (>40 år). Området är ca 30 000 kvm stort och Geologi och Geoteknik avdelning på Chalmers genom Chalmers fastigheter har ingått ett arrendeavtal med Fastighetskontoret i Göteborg för att bedriva forskning i området.

Området har ett bra läge och en unik möjlighet att studera hur ostörd jord, så som lös lera, beter sig vid pålastning av en bank. Då lermäktigheten är större än 15 m så ger det en unik inblick i hur sättningar utvecklas vid olika belastningar. Dvs då man både ordentligt passerar förkonsolideringstrycket i de övre lerlagren och succesivt går under förkonsolideringstrycket mot djupet på grund av lasttillskottet.

Resultaten från simuleringarna av provbanken visar att en vertikal sättning på ca 0,85 m och en horisontell rörelse på ca 0,1 m som mest efter 40 år är att förvänta. Denna rörelse ligger inom ett bra spann för att tydligt kunna mäta och följa upp rörelserna över tid.

Slutsatsen blir:

- Aktuellt område lämpare sig utmärkt för en forskningsyta där man kan bl.a. bygga en provbank.
- Området kan ge unika insikter på hur leran beter sig vid olika belastningssituationer.
- Området är plant och ostört, dvs marken är jungfrulig och har aldrig tidigare belastas.
- Aktuell lokal har ett bra läge då inga konflikter med närliggande byggnader eller infrastruktur finns, samtidigt som området ligger tillräckligt nära befintliga vägar så att tillgängligheten inte blir ett problem

## 6.1 Rekommendationer

För att kunna använda aktuellt området för forskning och utveckling måste jordlagerföljden och dess egenskaper bestämmas i bättre omfattning och följande rekommendationer ges:

- Mer utförlig karakterisering av leran med hjälp av olika laboratorieförsök
- Mer in-situ försök för att bestämma bland annat naturligt portryck, in-situ mätningar av hydraulisk konduktivitet, in-situ  $K_0$  m.fl.
- Mer detaljerad numeriskanalys när mer laboratorieförsök utförts för att mer noggrant bestämma mätutrustningens placeringar och omfattning
- Mer utförlig kalkyl av kostnader

## 7 Referenser

1. Larsson, R., *Jords egenskaper*, in *Information 1*. 2008, Statens geotekniska institut: Linköping.
2. Gras, J.-P., Sivasithamparam, N., Karstunen, M., and Dijkstra, J., *Permissible range of model parameters for natural fine-grained materials*. *Acta Geotechnica*, 2018. **13**(2): p. 387-398.
3. Sivasithamparam, N., Karstunen, M., and Bonnier, P., *Modelling creep behaviour of anisotropic soft soils*. *Computers and Geotechnics*, 2015. **69**: p. 46-57.



## BIG – Branschsamverkan i grunden

Forskningsprogram för effektiv och säker grundläggning av vägar och järnvägar

### BIG

BIG – Branschsamverkan i grunden - är ett forskningsprogram för effektiv och säker grundläggning av transportsystemets infrastruktur. Programmet etablerades under senhösten 2013, och påbörjade sin verksamhet den 1 januari, 2014.

Målsättningen är att sänka kostnader för byggande och underhåll av transportsystemets infrastruktur genom ett långsiktigt och systematiskt utvecklingsarbete inom geoteknikområdet.

I BIG samverkar Trafikverket, Chalmers tekniska högskola, Luleå tekniska universitet, Kungliga tekniska högskolan och Statens geotekniska institut.

Resultat från BIG projekt publiceras i vetenskapliga artiklar och parternas egna rapportserier. Alternativt så publiceras rapporterna i denna gemensamma BIG rapportserie.

### Publicerade rapporter

- A2014:03 Deformationer i undergrund – Litteratursammanställning och analys
- A2014:07 Grundvattensänkning i morän
- A2014:13 Höghastighetsspår i Sverige – på bank
- A2014:14 On the fundamental relation between soil creep and cyclic pile-soil response
- A2016:05 Modelling deformations below high-speed rail
- A2017:07 Dynamic response of transition zone on soft clay
- A2017:10 Effects of climate change on slopes in sensitive clay
- A2017:14 Changes in undrained shear strength as a function of time under embankments
- A2018:03 Three-dimensional effects in slope stability calculations
- A2018:18 Osäkerhetsmodeller – för optimal geoteknisk resus användning.
- A2018:22 Towards high quality deep soft soil samples
- A2019:02 Degradation of a natural sensitive clay under cyclic loading
- A2019:07 Ny provbank på lös lera
- A2020:08 Towards contemporary erosion solutions