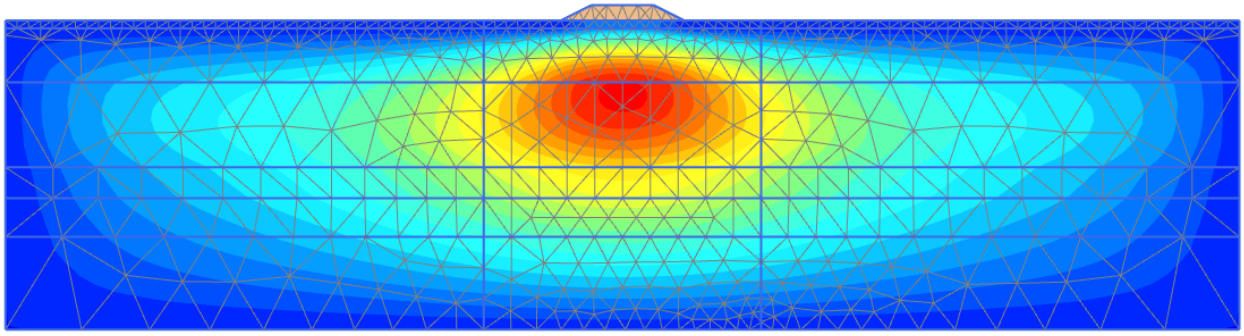
CHALMERS



Sättningsprognos för framtida testbank i norra Göteborg

En klass-A prediktion

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

HJALMAR FRISELL

OSKAR KARLSSON

KLARA KLIPPINGER

OMRAN SHATOU

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se

Abstract

Being able to predict ground settlements is crucial to ensure the longevity and functionality of structures in areas with deep soft soil layers. This study aimed to forecast settlements resulting from the construction of a planned test embankment in northern Gothenburg. By analyzing soil behavior under load, the study provided insight into the expected long-term deformation of deep clay deposits.

Calculations were performed using both traditional Swedish hand calculation methods and numerical analyses in PLAXIS, employing the Soft Soil (SS) and Soft Soil Creep (SSC) material models.

After 40 years, the consolidation settlement was estimated at approximately 60 cm using hand calculations, whereas the PLAXIS SS model predicted about 20 cm after 55 years. Including creep settlement, the total settlement after 100 years reached approximately 108 cm in the hand calculations, compared to 60 cm with the PLAXIS SSC model.

PLAXIS was assessed to yield more realistic and less conservative results due to its advanced material models and improved handling of stress distribution and time-dependent effects. Hand calculations, on the other hand, were simpler and provided a conservative preliminary estimate.

The potential impact of climate change on settlement behavior, particularly through variations in groundwater levels, was highlighted as a future uncertainty. Further studies are recommended to better understand the effects of climate change and the potential need for adjustments in design and construction in soft soil areas.

Sammanfattning

Att kunna förutsäga markens sättningar är avgörande för att säkerställa livslängd och funktion på konstruktioner i områden med tjocka lerlager. Arbetet syftar till att utföra en prognos för sättningar till följd av anläggandet av en framtida testbank i norra Göteborg. Genom att analysera jordens beteende vid belastning gav studien en bild av markens förväntade långsiktiga deformation i djupa leravlagringar.

Beräkningar genomfördes både genom handberäkningar enligt svensk metod och numeriska analyser i PLAXIS med materialmodellerna Soft Soil (SS) och Soft Soil Creep (SSC).

Efter 40 år beräknades konsolideringssättningarna till cirka 60 cm med handberäkningar, medan PLAXIS SS-modellen gav en sättning på cirka 20 cm efter 55 år. Med krypsättning uppgick den totala sättningen efter 100 år till cirka 108 cm i handberäkningarna, jämfört med 60 cm i PLAXIS SSC-modellen.

PLAXIS bedömdes ge mer realistiska och mindre konservativa resultat, tack vare mer avancerade materialmodeller och bättre hantering av spänningsfördelning och tidseffekter. Handberäkningarna är däremot enklare och ger ett konservativt överslagsvärde.

Klimatförändringars påverkan på sättningsproblematiken, särskilt genom variationer i grundvattennivåer, lyfts som en framtida osäkerhetsfaktor. Vidare studier rekommenderas för att bättre förstå klimatets inverkan och vilka åtgärder som kan krävas vid projektering och anläggning i områden med mjuka jordar.

Innehållsförteckning

ABSTRACT ..... **I**

SAMMANFATTNING ..... **II**

TECKENFÖRKLARING **1**

1. INLEDNING **5**

1.1. BAKGRUND 5

1.2. PROBLEMBESKRIVNING 6

1.3. SYFTE 6

1.3.1. Frågeställningar *6*

1.4. AVGRÄNSNINGAR 7

1.5. METOD 7

2. LITTERATURSTUDIE **9**

2.1. JORDENS EGENSKAPER 9

2.1.1. Spänningstillstånd *9*

2.1.2. Effektivspänning *10*

2.1.3. Lerans förkonsolideringstryck *10*

2.1.4. Deformationsegenskaper *11*

2.1.5. Kompressionsegenskaper *11*

2.2. SÄTTNINGSTEORI 12

2.2.1. Klassisk konsolideringsteori *12*

2.2.2. Primär konsolidering i leror *13*

2.2.3. Sekundär konsolidering i leror *14*

2.3. KRYPTEORI 14

2.3.1. Šukljes modell *15*

2.3.2. Bjerrums modell *15*

2.3.3. Alèns modell *16*

2.3.4. Krypparametrar ... *16*

2.3.5. Förenklad analytisk beräkningsmodell krypsättning ... *17*

2.4. FÄLTUNDERSÖKNINGAR ... 18

2.4.1. CPT-sondering ... *18*

2.4.2. Fältvingförsök ... *19*

2.4.3. Dilatometerförsök ... *20*

2.5. LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR ... 20

2.5.1. Ödometerförsök ... *21*

2.5.2. Triaxialförsök ... *23*

2.6. SVENSK METOD ... 24

2.6.1. 2:1-metoden ... *24*

2.6.2. Sättningsberäkningar vid olika fall ... *24*

2.7. PLAXIS ... 25

2.7.1. Soft Soil ... *26*

2.7.2. Soft Soil Creep ... *27*

2.8. KLIMATPÅVERKAN ... 27

2.8.1. Klimatförändringarna påverkan på grundvatten ... *28*

3. TESTOMRÅDET ... 29

3.1. GEOLOGISKA FÖRHÅLLANDEN ... 29

3.2. LOKAL GEOLOGI ... 30

3.2.1. Lokala variationer ... *30*

3.2.2. Geologisk åldring ... *31*

3.2.3. Jordlagerförhållanden ... *31*

3.2.4. Jordlagerföljden i testområdet ... *32*

3.2.5. Grundvattennivå ... *33*

4. INDATA OCH ANTAGANDEN ... 34

4.1. BESTÄMNING AV JORDLAGERFÖLJD ... 34

4.2. TESTBANKEN 35
4.3. INDATA VID HANDBERÄKNING 35
4.4. INDATA PLAXIS 36
5. BERÄKNINGAR 39
5.1. HANDBERÄKNINGAR MED SVENSKA MODELLEN 39
5.1.1. Konsolideringssättningar 39
5.1.2. Krypsättningar 40
5.2. PLAXIS 40
6. RESULTAT 42
6.1. HANDBERÄKNINGAR 42
6.2. PLAXIS 44
6.2.1. Soft Soil 44
6.2.2. Soft Soil Creep 44
6.3. JÄMFÖRELSE MELLAN HANDBERÄKNING OCH PLAXIS 45
7. DISKUSSION 47
7.1. DISKUSSION AV RESULTAT 47
7.2. SKILLNADER I BERÄKNINGSMETODIK 48
7.3. OSÄKERHETER OCH BEGRÄNSNINGAR 48
7.4. KLIMATFÖRÄNDRINGARS PÅVERKAN PÅ SÄTTNINGAR 49
8. SLUTSATS 50
8.1. FRAMTIDA ARBETE 50
REFERENSER 52
BILAGA 1 56
BILAGA 2 57
BILAGA 3 58
BILAGA 4 62
BILAGA 5 63

BILAGA 6 ..... **64**

BILAGA 7 ..... **66**

BILAGA 8 ..... **69**

Teckenförklaring

Versaler

C_{α}	Kompressionsindex [-]
C_c	Kompressionsindex [-]
C_s	Rekompressionsindex [-]
M	Kompressionsmodul [kPa]
M_0	Kompressionsmodul för $\sigma' < \sigma'_c$ [kPa]
M_L	Kompressionsmodul för $\sigma' > \sigma'_c$ [kPa]
M'	Modultal för $\sigma'_0 > \sigma'_L$ [kPa/m]
R	Tidsmotstånd [s]
S_{tv}	Sensitivitet [-]
T_v	Tidsfaktor [-]

Gemener

b	Bredd [m]
c'	Effektiv skjuvhållfasthet [kPa]
c_v	Konsolideringskoefficient [m^2/s]
e	Portal [-]
e_0	Initialt portal [-]
f_t	Mantelfriktion [kPa]
h	Tjocklek jordlager [m]
k	Permeabilitet [m/s]

q	Lastintensitet [kPa]
q_t	Spetstryck [kPa]
r_s	Tidsmotståndstal [-]
t	Tid [s, d, år]
$t^{'}$	Effektiv kryptid [år]
t_r	Referenstid [s, d, år]
u	Portryck [kPa]
v_{ur}	Poissons tal för avlastning/pålastning [-]
w_L	Konflytgräns [%]
w_N	Vattenkvot [%]
z	Djup [m]

Grekiska alfabetet

γ	Tunghet [kPa/m^3]
δ	Sättning [m]
ε	Töjning [%]
ε_c^e	Elastisk töjning under primärkonsolidering [%]
ε_c^{cr}	Kryptöjning under primärkonsolidering [%]
ε_{ac}^{cr}	Kryptöjning efter primärkonsolidering [%]
ε_{cr}	Kryptöjning [%]
κ^*	Modifierat svällningsindex [-]
λ^*	Modifierat kompressionsindex [-]
μ^*	Krypindex [-]

ρ	Skrymdensitet [t/m^3]
σ_0	Totalspänning [kPa]
σ'_0	Effektivspänning in situ [kPa]
σ'_c	Förkonsolideringstryck [kPa]
σ'_f	Spänning efter belastning [kPa]
σ'_L	Gränstryck [kPa]
σ'_v	Vertikal effektivspänning [kPa]
σ'_h	Horisontell effektivspänning [kPa]
σ_{p0}	Förkonsolideringstryck före belastning [kPa]
σ_{pc}	Förkonsolideringstryck vid slutet av konsolideringstillståndet [kPa]
τ_c	Tid vid 95% konsolidering [år]
τ_{Rv}	Skjuvhållfasthet efter omrörning [kPa]
τ_v	Odränerad skjuvhållfasthet [kPa]
φ	Friktionsvinkel [°]
ψ	Diltansvinkel [°]

Förkortningar

CPT	Cone Penetration Test
CRS	Constant Rate of Strain
EOP	End Of Primary consolidation
FEM	Finita Elementmetoden
IL	Incremental Loading
OCR	Over Consolidation Ratio

POP	Pre-Overburden Pressure
SGF	Svenska Geotekniska Föreningen
SGI	Statens Geotekniska Institut
SGU	Sveriges Geologiska Undersökning
SS	Soft Soil model
SSC	Soft Soil Creep model

1. Inledning

Geotekniska studier är en grundläggande del i planering och byggnation av byggnader och ny infrastruktur, något som kräver noggranna analyser av jordens egenskaper. Inom geotekniken är prognostisering av framtida sättningar en central och komplex del som innefattar fältbesök, laborationsundersökningar, konceptualisering av området samt beräkning genom olika modeller (Sällfors, 2013). Utförda beräkningar och analyser är avgörande för att säkerställa konstruktionens säkerhet och livslängd (Larsson, Bengtsson, & Eriksson, 1994).

För att förbättra förståelsen av sättningsproblematik och bidra till utvecklingen av mer tillförlitliga prognosmodeller planeras en testbank att anläggas av geotekniska forskargruppen vid Chalmers tekniska högskola i samarbete med Trafikverket. Syftet med testområdet är att provbelasta jorden med en vägbank i standardmått för att studera markens sättningar, rörelser och förändringar i portryck. Förhoppningen är att testbanken inte bara ska bidra till en bättre förståelse av markrespons, utan även möjliggöra mer tillförlitliga prognoser för vägunderhåll samt stärka den befintliga empiriska kunskapen om markens egenskaper. Ett särskilt fokus ligger på att samla in data från djupare lerlager än vad som tidigare studerats. Dagens information om testbanker har nämligen vissa begräsningar, främst att data endast finns för de översta jordlagren.

1.1. Bakgrund

Att förutspå sättningar på ett bra sätt ställer krav på en god kunskap om jordprofilen, där jordlagerföljd, kompressionsegenskaper, portrycks- och spänningsförhållanden kartläggs noggrant (Larsson, Bengtsson, & Eriksson, 1994).

Att använda sig av testområden för att ta lärdom av markens beteenden är en väl använd metod inom geotekniken. Det finns två kända testområden i Sverige, administrerade av Statens geotekniska institut, (SGI) (Larsson, 2007). Provfälten anlades i samband med projekteringen av en ny flygplats i Sverige. När det sedan beslutades att den nya flygplatsen, det som idag kallas Arlanda, skulle byggas norr om Stockholm, stod provfälten tomma. Istället tog Statens Geotekniska Institut (SGI) över finansieringen och använde dem för forskningsändamål. Områdena, belägna i Stockholmsområdet,

heter Skå-Edeby och Lilla Mellösa och har bidragit med mycket data och lärdomar kring hur marken beter sig.

En ytterligare aspekt som gör prediktion av sättningar viktig är att det ofta blir dyrt att bygga i områden med lera då byggkostnader måste balanseras mot underhållskostnader (Olsson, 2010). Därför är det viktigt att kunna beräkna sättningarna innan bygget startar för att så få oväntade kostnader som möjligt ska uppstå under konstruktionens livslängd.

Samtidigt är klimatförändringar viktiga att ta hänsyn till vid analyser av sättningar, då förändringar i temperatur, nederbörd och grundvattennivåer påverkar markens egenskaper och stabilitet (Lundström, Dehlbom, Löfroth, & Vesterberg, 2018). Dessa faktorer har en stark påverkan på sättningar och kan därmed påverka olika konstruktioner, såsom byggnader, vägar och järnvägar.

1.2. Problembeskrivning

Sättningsprognoser är en central del inom geoteknik särskilt för konstruktioner som väg- och järnvägsbankar. I områden där jordprofilen domineras av djup lera blir markrörelser en betydande utmaning då lera kännetecknas av låg permeabilitet och hög vattenhalt vilket leder till en långsam konsolidering och omfattande sättningar.

Framtida klimatförändringar kan sannolikt förväntas påverka hur sättningarna utvecklas, bland annat på grund av förändrade grundvattennivåer.

1.3. Syfte

Syftet med arbetet är att utföra en prognos för sättningar och markrörelser till följd av anläggandet av en framtida testbank i norra Göteborg. Genom att prognostisera jordens beteende vid belastning syftar studien till att ge en bild av markens förväntade långsiktiga beteende i djupa leravlagringar.

Rapporten behandlar även hur klimatförändringar så som höjda vattenflöden, varierande grundvattennivåer och extremregn kan påverka sättningsprognoserna.

1.3.1. Frågeställningar

Rapporten syftar till att besvara följande frågeställningar:

- Hur stora prognostiseras konsolidering- och krypsättningarna bli för testbanken?

- Vad kan följderna av klimatförändringarna bli på sättningsprognosen?
- Hur ser skillnaden i resultat ut mellan handberäkningar med svensk metod och PLAXIS och vad beror det på?

1.4. Avgränsningar

Att bestämma långtidssättningar i lera är ett komplext problem och det är svårt att beakta samtliga aspekter i beräkningarna. Därför har ett antal avgränsningar gjorts för arbetet. Fokus kommer endast vara på vertikala sättningar.

Vidare behandlar rapporten främst de förhållanden som finns i Göteborg då testområdet är beläget utanför Göteborg. Problematiken och beräkningarna är däremot också applicerbara på områden med liknande markförhållanden som exempelvis Kanada, Nederländerna och Australien.

Testbanken kommer inte heller att anläggas som en del av projekt då det har en Iängre tidshorisont samt kräver tillstånd. Projektet utförs därför endast som en prognos över hur sättningarna kan förväntas bli med anledning av anläggandet av en testbank på området.

Eftersom geotekniska data endast finns till ett djup av 40 meter, begränsas sättningsberäkningarna till detta djup, trots förekomsten av djupare lerlager i området. Krypsättningarna som beräknas för hand tas fram med en förenklad metod, vilket innebär att resultaten bör tolkas med viss försiktighet.

1.5. Metod

Arbetet inleddes med en litteraturstudie för att ge en bakgrund till ämnet geoteknik och olika typer av sättningar. Litteraturstudien utfördes genom insamling och granskning av källor via internet och Chalmers bibliotek som sedan sammanställdes i ett teorikapitel. Syftet med litteraturstudien var även att få en uppfattning om teorin inom geoteknik för att få en djupare förståelse för sättningsberäkning. I litteraturstudien studerades även hur geotekniska undersökningar genomförts och vilka parametrar som varje enskild undersökning ger.

Information och data för det aktuella området tillhandahölls från handledare och baserades på olika geotekniska undersökningar som analyserades med hjälp av Excel.

Detta gjordes för att få fram de olika materialparametrarna som behövdes för att genomföra sättningsberäkningar för testbanken.

Beräkningen av sättningar för testområdet genomfördes både med handberäkningar och med hjälp av dataprogrammet PLAXIS. Handberäkningar för konsolidering utfördes med svensk metod och krypberäkningar genomfördes med en förenklad metod som beskrivs i rapporten. I dataprogrammet PLAXIS gjordes beräkningar både med Soft Soil och Soft Soil Creep modellerna. När beräkningarna var genomförda kunde resultaten jämföras och diskuteras.

2. Litteraturstudie

Nedanstående kapitel presenterar en litteraturstudie genomförd för arbetet. Syftet med litteraturstudien är att ge en grundförståelse för ämnet. Kapitlet inleds med en beskrivning av jordens egenskaper och följs av sättningsteorier och metoder för att bestämma jordens egenskaper. Avslutningsvis beskrivs använda beräkningsmetoder och beräkningsprogram samt lite kort om klimatförändringar.

2.1. Jordens egenskaper

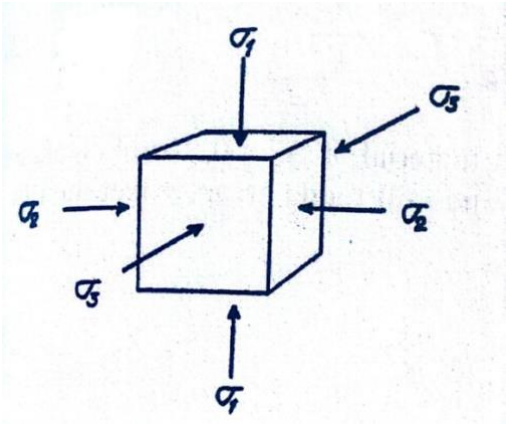
Jord är ett material bestående av tre faser, fast, flytande och gasfas, där den fasta fasen utgör jordens lastbärande del bestående av mineral eller lerpartiklar (Larsson, 2008). Hålrummen kallas porer och är fyllda med antingen gas, vatten eller båda.

Jordarter klassificeras utifrån kornstorlek i exempelvis lera, silt, sand och grus (SGI, 2023a). Kornstorleken har stor betydelse för jordens förmåga att släppa igenom eller absorbera vatten, det vill säga dess permeabilitet. Lera består av mycket små tätt packade partiklar och innehåller ofta en stor mängd vatten. Detta beror på att lera har en god förmåga att binda vatten, samtidigt som vatten rör sig mycket långsamt genom materialet. Jordens egenskaper bestäms vanligtvis genom laboratorie- och fältundersökningar, vilket beskrivs i senare kapitel.

2.1.1. Spänningstillstånd

Jordens in situ-spänningar orsakas av de ovanliggande jordlagren (Sällfors, 2013). Spänningarna ökar mot djupet och är viktiga för jordens egenskaper. Vid jorden där markytan är horisontell finns det två horisontella spänningar och en vertikal, se Figur 1. Den vertikala spänningen, σ_1, är den dominerande och de två horisontella spänningarna, σ_2 och σ_3, är lika stora. Huvudspänningar betecknas σ_0 och beräknas med hjälp av ekvation 1,

$$\sigma_0 = \gamma * z \tag{1}$$



Figur 1 Huvudspänningsriktningar på ett belastat jordelement i marken.

2.1.2. Effektivspänning

Den kraft som överförs genom jordskelettet från partikel till partikel formulerades av Terzaghi, som introducerade principen om effektiv spänning (Knappett & Craig, 2012). Effektivspänning definieras enligt ekvation 2,

$$\sigma_0' = \sigma_0 - u \tag{2}$$

Porvattentrycket, u, representerar den del av totalspänningen som överförs via porvätskan medan den effektiva normalspänningen, σ_o', är den del av totalspänningen som bärs av jordskelettet.

2.1.3. Lerans förkonsolideringstryck

Förkonsolideringstrycket, σ_c', är en viktig parameter vid beräkningar av sättningar. Det bestäms genom ödometerförsök eller CRS (Constant Rate of Strain) där jordens deformation mäts vid ökande belastning (Sällfors, 2013). Förkonsolideringstrycket definierar det spänningsläge när jorden övergår från ett elastiskt beteende till ett plastiskt beteende, vilket innebär att töjningarna ökar kraftigt.

För att avgöra om en jord är normalkonsoliderad eller överkonsoliderad jämförs in situ-spänningen, σ_0', med förkonsolideringstrycket, σ_c', med hjälp av överkonsolideringskvoten OCR som enligt Sällfors (2013) beskrivs med hjälp av ekvation 3. Normalkonsoliderad jord har ett OCR på mindre än eller lika med 1 och överkonsoliderade jordar ett värde över 1.

$$OCR = \frac{\sigma_C'}{\sigma_0'} \tag{3}$$

Överkonsolidering kan vidare delas in i svagt och starkt överkonsoliderad jord, beroende på hur mycket σ_c' överstiger σ_0' (Sällfors, 2013). Vid normalkonsolidering sker stora sättningar medan en överkonsoliderad jord uppvisar ett mer elastiskt beteende, vilket resulterar i mindre sättningar.

2.1.4. Deformationsegenskaper

Beräkningar i jord utgår från att jorden behandlas som ett kontinuerligt linjärelastiskt material, men i verkligheten är jord betydligt mer komplext (Larsson, 2008). Deformationsegenskaper hos jord är icke-linjära, tidsberoende och påverkas bland annat av krypdeformationer samt huruvida porerna är vattenfyllda.

Orsakerna till deformationer i jord är förändringar i effektivspänningarna mellan korn och partikel (Larsson, 2008). Förhållandet mellan skjuvspänning och effektiv normalspänning påverkas av portrycket, där en minskning av portryck fördröjer deformation medan porövertryck kan påskynda processen. Jordens deformationer kan vara både elastiska och plastiska samt delas in i momentana och tidsberoende sådana.

Jordens spänningshistoria har dessutom stor betydelse för dess deformationsegenskaper då egenskaperna är beroende av den rådande spänningsnivån (Sällfors, 2013). Den långvariga sedimentationsprocessen, där smältvatten från inlandsisen transporterade och avsatte finkornigt material i havsområden, har resulterat i mäktiga lerlager i lågt liggande områden. Processen har haft stor inverkan på jordens egenskaper, framför allt genom att effektivspänningarna ökar i takt med sedimentens tjocklek.

2.1.5. Kompressionsegenskaper

Ödometerförsök är ett laboratorietest där ett jordprov belastas vertikalt för att bestämma sambandet mellan effektivspänning och töjning samt markens sättnings- och deformationsegenskaper (Sällfors, 2013). Kompressionsmodulen, även kallad ödometermodulen, används vid sättningsberäkningar och definieras som den första derivatan av σ' med avseende på töjning enligt ekvation 4,

$$M = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon} \tag{4}$$

Kompressionsmodulen bestäms genom att ett prov belastas vertikalt med randvillkor där horisontella töjningar förhindras (Sällfors, 2013). Vid beräkningar antas kompressionsmodulen, M, vara konstant om spänningen understiger förkonsolideringstrycket och betecknas då M_0. För spänningar som överstiger förkonsolideringstrycket används M_L och M'.

2.2. Sättningsteori

Sättningar är deformationer i marken som vanligtvis uppstår på grund av spänningsförändringar orsakade av en yttre last (Sällfors, 2013). Sättningar kan också ske till följd av grundvattensänkning, till exempel på grund av pumpning eller dränering. Vid markytan finns inga spänningar, men ökar succesivt med djupet till följd av överliggande jordlager. Totalsättningen består av tre delar: elastisk, primär och sekundär sättning.

2.2.1. Klassisk konsolideringsteori

Terzaghis konsolideringsteori är en endimensionell konsolideringsteori som togs fram år 1923 och bygger på ett antagande om att det finns ett samband mellan effektivspänning och töjning som inte beror på tiden (Hansbo, 1975). Utöver det föregående nämnda sambandet antas även att kompressionsmodulen och permeabiliteten är konstanta med tiden under konsolidering. Terzaghis ekvation ser olika ut beroende på om permeabiliteten är konstant med djupet eller inte. Om den inte är konstant används ekvation 5 och annars ekvation 6,

$$\frac{du}{dt} = \frac{M}{y_w} \cdot \frac{d}{dz} \cdot \left(k \cdot \frac{du}{dz} \right) \tag{5}$$

$$\frac{du}{dt} = c_v \frac{d^2u}{dz^2} \tag{6}$$

För att den förenklade ekvationen ska gälla måste följande punkter vara uppfyllda (Hansbo, 1975):

- Jorden ska vara homogen och mättad.
- Töjningen och flödet av porvatten sker vertikalt och är därmed endimensionell.
- Darcys lag är applicerbar.

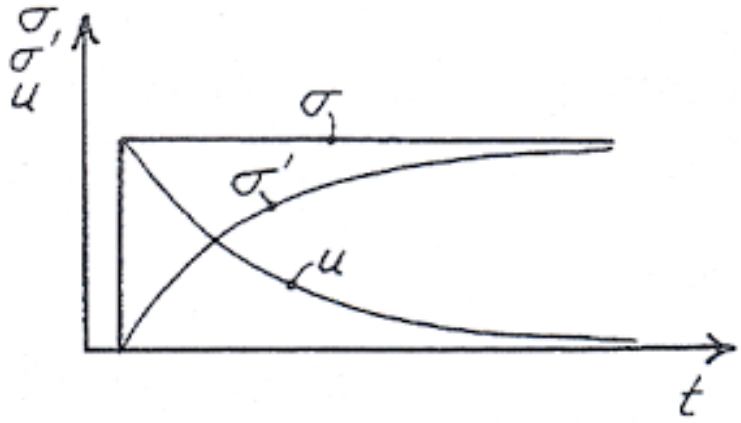
- Förändringen i porvattentrycket är detsamma som förändringarna i effektivspänning.
- Jordpartiklar och porvatten är inkompressibla.
- Töjningen är endast beroende av effektivspänningen, dvs ingen hänsyn tas till krypning.

Terzaghis konsolideringsteori innehåller även teori om beräkningar av tidsfaktor för konsolidering för jordprofiler (Hansbo, 1975). Tidsfaktorn, T_v, uttrycker det matematiska sambandet mellan tid och konsolideringsgrad. Tidsfaktorn beräknas med ekvation 7,

$$T_v = c_v \cdot \frac{t}{h^2} \tag{7}$$

2.2.2. Primär konsolidering i leror

Konsolideringssättningar uppstår när jorden belastas och vatten gradvis pressas ur jorden över tid (Sällfors, 2013). Det leder till en volymminskning, som kallas konsolidering. Lerjordar har en låg permeabilitet, vilket fördröjer utströmningen av vatten. Därför kännetecknas leror och slitiga jordar av en lång tidsberoendedeformation. När jorden belastas ökar direkt totalspänningen och porövertrycket. Efter en tid minskar porövertycket i samma takt som effektivspänningen ökar, se Figur 2.



Figur 2 Samband mellan effektivspänning och portrycket (Sällfors, 2013).

En minskad grundvattennivå gör så att portrycket minskar och därmed ökar effektivspänningen. En ökad effektivspänning leder i sin tur till en ökad sättning. I mjuka leror kan en grundvattensänkning ge upphov till väldigt stora sättningar.

2.2.3. Sekundär konsolidering i leror

Enligt Terzaghis teori styrs hastigheten i kompressionsförloppet i jorden av effektivspänningen som påverkas av porvattentrycket och genomsläppligheten (R.F.Craig, 2020). Kompressionen sker enbart under primär konsolidering, där vattnet i markens porer dräneras ut, vilket minskar porvolymen. Studier har dock visat att sättningar inte upphör när porövertrycket har utjämnats eller sjunkit till noll. Sättningen fortsätter i stället under konstant effektivspänning, men med en avtagande hastighet. Denna process sker efter en lång tid och kallas sekundär konsolidering.

Brytpunkten mellan primär och sekundär konsolidering kallas EOP (End Of Primary consolidation) (Claesson, 2003). Casagrande utvecklade en testprocedur för att bestämma den punkt då primärkonsolideringen anses avslutad, det vill säga när överskottportrycket har avklingat helt. Tid och töjning plottas i ett semilogaritmiskt diagram, där EOP markeras som skärningen mellan tangenterna i tid-töjningskurvan i diagrammet.

Sammanställningar av data för olika jordarter (sand, lera och organisk jord) har visat att sekundär konsolidering motsvarar mellan 1% och 10% av den primära konsolideringen (R.F.Craig, 2020). Sekundär konsolidering är generellt sett mer dominerande i normalkonsoliderade leror än i överkonsoliderade leror.

2.3. Krypteori

Krypning är ett generellt fenomen inom byggmekanik som innebär en ökande deformation under konstant last. I lera beror krypning på en långsam och tidsberoende plastisk deformation av jorden under konstant belastning (Hansbo, 1975). Under den primära konsolideringen uppkommer deformationer i leran där materialet har förändrats vilket leder till en omfördelning av finkorniga partiklar. Dessa partiklar omstruktureras gradvis till en mer stabil konfiguration och som en följd av det förändras spänningsförhållandena i jorden, vilket ökar deformationsmotståndet och gör att kryphastigheten gradvis avtar och till slut närmar sig noll.

Det tidsberoende sambandet mellan effektivspänning och kompression har getts en mängd olika namn som krypning, sekundär kompression, tidsmotstånd och

hastighetseffekter (Larsson, Bengtsson, & Eriksson, 1994). Alla dessa benämningar beskriver samma fenomen.

Det finns flera teorier för att förklara krypsättningar (Claesson, 2003). Krypdeformationer separerades länge från primärkonsolideringen och likställdes i stället med sekundärkonsolideringen. Det antogs att den klassiska konsolideringsteorin gällde fram tills att porövertrycket har utjämnats och därefter skulle sekundär konsolidering ta vid och avta med tiden (Larsson, Bengtsson, & Eriksson, 1994). Efter det har däremot en rad andra modeller presenterats.

2.3.1. Šukljes modell

Šuklje presenterade en modell 1957 där krypdeformationer även ansågs ske under primärkonsolideringen (Larsson, Bengtsson, & Eriksson, 1994). Sekundär konsolidering ansågs inte vara ett isolerat fenomen som sker efter primärkonsolideringen utan hela förloppet ansågs vara tidsberoende. Modellen beskriver sambandet mellan effektivspänning och kompression som en förändring med en viss deformationshastighet. Det tidsberoende fenomenet beskrivs vidare bero av permeabilitet och dräneringsvägar i jorden.

2.3.2. Bjerrums modell

År 1967 presenterade Bjerrum en modell som liknade Šukljes, men som även anpassades för att beskriva sättningar över geologiskt långa tidsperioder (Claesson, 2003). För ingenjörer som vanligen arbetar med kortare tidsperspektiv är det därför viktigt att ta hänsyn till den tidsfördröjning som långsiktigt orsakas av genomsläpplighet och dräneringsförhållanden. Modellen förklarar förkonsolideringstrycket och överkonsolideringsgraden hos orörda leror som uppstår genom geologisk åldring, ett fenomen när lera förändras över tid och uppnår högre hållfasthet än aktuell nuvarande effektivspänning kan förklara. Dessutom beskriver modellen hur sättningar och krypdeformationer utvecklas över tid, samt varför sättning kan uppstå trots att förkonsolideringstrycket inte har uppnåtts. Bjerrum delade in deformationer i omedelbar och fördröjd kompression samt modellerade den avtagande krypeffekten som uppstår vid längre belastning.

2.3.3. Alèns modell

En ytterligare modell för endimensionell konsolidering som inkluderar krypeffekter presenterades år 1998 av Alén (Claesson, 2003). Syftet med modellen var att utveckla en enklare modell som på ett tillförlitligt sätt skulle kunna förutsäga sättningar i mjuka leror och användas som ett verktyg för ingenjörer inom geoteknik. Modellen bygger på en hypotes att tidsberoendesättningar i lera kan beskrivas av tre separata fenomen: konsolidering, elastisk-plastisk deformation och krypdeformation.

2.3.4. Krypparametrar

En parameter som internationellt ofta används för att beskriva krypeffekter i lera är kompressionsindexet C_α som enligt Claesson (2003) definieras enligt ekvation 8,

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \log(t)} \tag{8}$$

I Sverige används vanligen krypfaktorn α_s för att beskriva krypeffekter som en funktion av töjning vilket beskrivs med ekvation 9 (Claesson, 2003). Skillnaden mot kompressionsindexet som används internationellt är att krypfaktorn i stället beror av töjning medan kompressionsindexet beror av portalet.

$$\alpha_s = \frac{\Delta \varepsilon_{cr}}{\Delta \log(t)} \tag{9}$$

Relationen mellan krypparametrarna kan vidare beskrivas enligt ekvation 10 (Claesson, 2003),

$$\alpha_s = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} \tag{10}$$

Janbu beskrev 1969 en ytterligare parameter för att beskriva krypeffekter, tidsmotståndet R (Claesson, 2003). Vanligen anses pålagd spänning vara en handling och töjning en reaktion men vid krypning kommer i stället tiden att anses vara handlingen och krypningen reaktionen. Relationen mellan dem beskrivs enligt ekvation 11,

$$R = \frac{dt}{d\varepsilon} \tag{11}$$

Labbtester har visat att tidsmotståndet i lera ökar med tid vilket kan beskrivas som ett tidsmotståndstal enligt ekvation 12 (Claesson, 2003),

$$\frac{dR}{dt} = r_s \tag{12}$$

På grund av att tidsmotståndet antas öka linjärt med tiden efter en viss tidpunkt kan tidsmotståndet även uttryckas med ekvation 13 (Claesson, 2003),

$$R = r_s * (t - t_r) \tag{13}$$

Till sist kan relationen mellan tidsmotståndstalet och krypfaktorn beskrivas enligt ekvation 14 (Claesson, 2003),

$$\alpha_s = \frac{ln10}{r_s} \tag{14}$$

2.3.5. Förenklad analytisk beräkningsmodell krypsättning

I arbetet används materialmodellen Soft Soil Creep (SSC) i beräkningsprogrammet PLAXIS för att beräkna sättningar inklusive krypning. Total töjning delas enligt modellen upp i en elastisk del ε^e och en tidsberoende krypdel ε^c (Olsson, 2010). Krypsättningen kan förenklat beskrivas med kryptermen av ekvation 15,

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^c = A * \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0}\right) + B * \ln\left(\frac{\sigma_{pc}}{\sigma_{p0}}\right) + C * \ln\left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}\right) \tag{15}$$

Enligt Vermeer & Neher (1999) kan C bytas ut till materialparametern μ^* i SSC-modellen enligt ekvation 16,

$$\mu^* = C \tag{16}$$

Enligt Olsson (2010) kan μ^* vidare beskrivas enligt ekvation 17,

$$\mu^* = \frac{1}{r_1} \tag{17}$$

Krypparametrar bestäms ofta med IL-ödometerförsök som är ett stegvist ödometerförsök, se kapitel 2.5.1 (Olsson, 2010). IL-försök utförs där emot sällan i Sverige. Krypparameterar kan istället bestämmas empiriskt med hjälp av vatteninnehållet w_N, där korrelationen mellan krypparametern och vatteninnehållet är

framtaget enligt ett stort antal IL-ödometerförsök på främst svenska och norska leror och kan beskrivas med ekvation 18,

$$r_1 = \frac{75}{w_N^{1.5}} \tag{18}$$

2.4. Fältundersökningar

När ett område ska studeras ur ett geotekniskt perspektiv används både fältundersökningar och laboratorietester för att bestämma jordlagerföljd och hur marken beter sig (SGF, 2013). Det första som ofta utförs är att gå igenom arkiven för att se om det finns tidigare gjorda undersökningar som kan nyttjas. Över vissa delar av Sverige har Sveriges Geotekniska Undersökning (SGU) jordarts- och berggrundskartor som kan användas. När detta är granskat kan undersökningar i fält genomföras. I nedanstående kapitel beskrivs några olika metoder för fältundersökningar.

2.4.1. CPT-sondering

För att avgöra jordlagrens mäktighet, fasthet samt utsträckning används sonderingar (SGF, 2013). En vanlig metod är spetstrycksondering, eller CPT-sondering. Den metod som används i Sverige idag kan också mäta portrycket och kallas då CPTU. Mätningen utförs genom att en hylsa förs ner i marken där mantelfriktionen mäts längs hylsan samtidigt som portrycket mäts på hylsans spets. Se Figur 3 för en bild av CPT-sonden som förs ner i marken.

Figur 3 Bild på en CPT-sond.

Basparametrar som fås av en CPT-sondering är totalt spetstryck q_t, total mantelfriktion f_t och totalt portryck u (Larsson, 2015). Genom spetstryckssonderingen erhålles en god uppfattning av jordlagerföljden, lagrens egenskaper samt portrycket. Finkorniga jordar som lera och organisk jord kräver att prover tas för bestämning av flytgränsen w_L. Andra alternativa sonderingsmetoder är jord-bergsondering, hejarsondering, viktsondering, mekanisk trycksondering, tung slagsondering och SPT-sondering (SGF, 2013).

2.4.2. Fältvingförsök

En annan vanlig metod är fältvingförsök. Vingförsök används främst i lera för att mäta den odränerade skjuvhållfastheten och jordens sensitivitet (SGF, 1993). Försöket går ut på att ett vingdon med fyra plåtar, se Figur 4, förs ner i jorden och därefter roteras på önskat djup. Egenskaperna bestäms genom att mäta det vridmoment som krävs för att det ska ske ett brott i jorden. Skjuvhållfastheten τ_{Rv} bestäms efter omrörning och sensitiviteten S_{tv} beräknas som kvoten mellan det odränerade skjuvhållfasthetvärdet och skjuvhållfasthetsvärdet efter omrörning enligt ekvation 19,

$$S_{tv} = \frac{\tau_v}{\tau_{Rv}} \tag{19}$$

Figur 4 Bild på ett vingdon.

2.4.3. Dilatometerförsök

I lera, silt och sand kan spänningstillstånd, hållfasthet och deformationsegenskaper bestämmas med ett dilatometerförsök (SGF, 2013). En dilatometer är en stålplatta med ett membran och tryckkammare. Dilatometern drivs ner i marken till önskat djup där sedan trycket ökas och värden läses av på manometrar tillhörande mätinstrumentet. Se Figur 5 för en bild av en dilatometer med tillhörande mätinstrumentet.

För att få den mest kompletta bilden av jordens egenskaper är dilatometerförsök den bästa metoden, men den bör kompletteras med spetstryck och portryckssondering för att validera resultatet (Larsson, 1989).

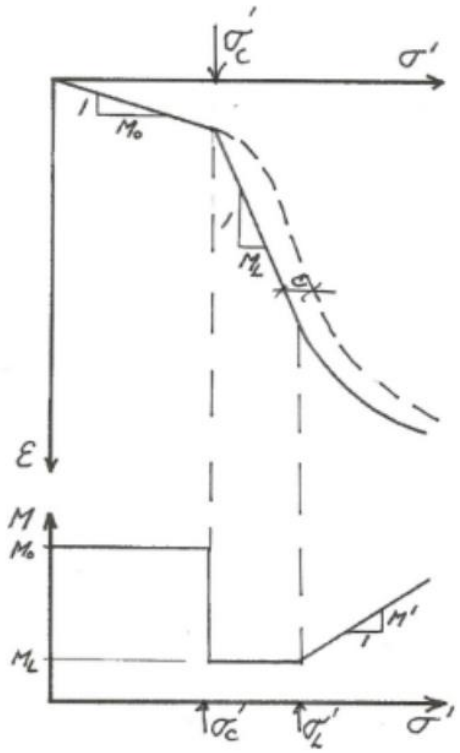
Figur 5 Dilatometer och tillhörande mätinstrumentet (Marchetti Dilatometer, u.d.).

2.5. Laboratorieundersökningar

För att bestämma jordens lagerföljd och dess egenskaper kan även laboratorieundersökningar göras (SGF, 2013). De upptagna proverna kan klassas i tre kategorier, ostörd, störd och omrörd. Om syftet endast är att bestämma typen av jord går det bra med störda eller omrörda prover. Ska däremot hållfasthets- och deformationsegenskaperna bestämmas krävs det att provet är ostört. Väl i laboratoriet kan jordens densitet, konflytgräns, vattenkvot och hållfasthet bestämmas (SGI, 2023b). Nedanstående kapitel redogör för några olika laboratorieförsök som används för att bestämma jordens egenskaper.

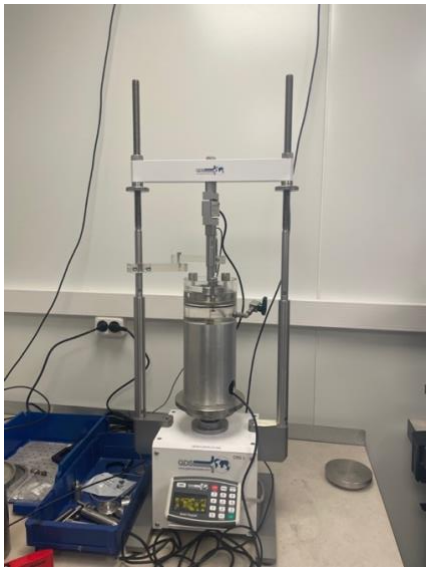
2.5.1. Ödometerförsök

Ett ödometerförsök är ett laboratorietest som används för att undersöka markens sättningsegenskaper vid olika djup (Sällfors, 2013). Ett jordprov tas upp och analyseras i laboratorium genom att utsättas för belastning, vilket ger en ödometerkurva, se Figur 6, som beskriver jordens spännings- och deformationsegenskaper.



Figur 6 Ett exempel på en ödometerkurva framtagen från ett ödometertest (Sällfors, 2013).

Provet placeras i en ring ovanpå en filtersten, med en stämpel i ringens storlek placerad ovanpå (Larsson, 2008). Vidare belastas provet antingen med stegvis belastning eller pressas med konstant deformationshastighet. Efter belastningen mäts deformationen vilket möjliggör framtagande av både en tid-sättningskurva för varje laststeg samt en deformationskurva. En ödometer med konstant deformationshastighet ses i Figur 7.



Figur 7 Bild på en ödometer.

CRS-försök (Constant Rate of Strain) är den vanligaste typen av ödometerförsök och används för att bestämma jordens deformationsegenskaper (Sällfors, 2013). Det är ett labbförsök där ett ostört prov utsätts för en konstant deformationshastighet. Under försöket registreras påförd vertikallast, portryck och deformation. CRS-försöket ger en ödometerkurva som visar sambandet mellan spänning och deformation. Utifrån denna data kan förkonsolideringstrycket och andra parametrar som $\sigma_c', \sigma_L', M_0, M_L$ samt M' och används vidare för sättningsberäkningar (Sällfors, 2013).

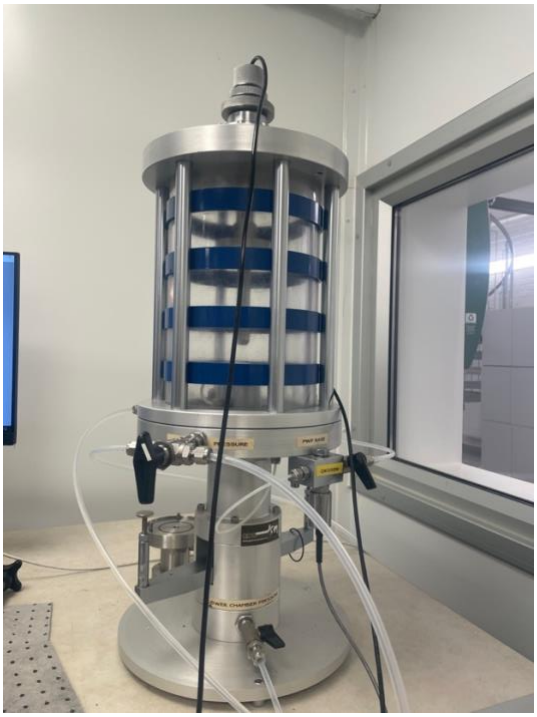
Genom att känna till portrycket och deformationshastigheten kan jordens permeabilitet, k, beräknas (Sällfors, 2013). CRS försöket tar vanligtvis 1 till 2 dygn att genomföra och har blivit allt vanligare då den ger en mer träffsäker information om leras deformationsegenskaper än ett försök med stegvis belastning.

En annan metod för att bestämma jordens deformationsegenskaper är med hjälp av en IL-ödometer (Incremental Loading) som till skillnad från CRS belastas stegvis och ofta används för att bestämma krypparametrar som tidigare nämnt i kapitel 2.3.5 (Olsson, 2010). IL-ödometrar syns i Figur 8.

Figur 8 Bild på IL-ödometerar.

2.5.2. Triaxialförsök

Triaxialförsök används för att bestämma kompressionsmodulen och kan genomföras vid belastningsfall och deformationsvillkor som skiljer sig från ödometerfallet (Larsson, 2008). Vid höga skjuvspänningar nära brottlasten uppstår vertikaldeformationer som är betydligt större än i ödometerfallet vilket triaxialapparaten kan mäta noggrant. Förutom kompressionsmodulen kan triaxialförsöket även användas för att bestämma tryckmodulen, elasticitetsmodulen och kontraktionstalet. En annan användning av triaxialförsök är genom variation av celltrycket för att förhindra horisontaldeformation. Figur 9 visar en bild av en triaxialapparat.



Figur 9 Bild på en triaxialapparat.

2.6. Svensk metod

För beräkning av sättningar används olika metoder där en av de vanligaste metoderna är svensk metod. Metoden bygger på belastningen, jordens egenskaper samt konsolideringsteorin.

2.6.1. 2:1-metoden

2:1-metoden är en förenklad beräkningsmetod som används vid handberäkning. Metoden antar att tillskottsspänningen under lasten sprids med en lutning på 2:1 (Sällfors, 2013). Den tilläggsspänningen som uppstår direkt under en linjelast kan beräknas enligt ekvation 20,

$$\Delta\sigma_z = \frac{b \cdot q}{(b + z)} \tag{20}$$

2.6.2. Sättningsberäkningar vid olika fall

Vid sättningsberäkning skiljs på tre fall beroende på tilläggsbelastningens storlek (Sällfors, 2013). Tilläggsbelastningen minskar med djupet eftersom lasten normalt sprids med djupet enligt 2:1-metoden. Sättningarnas storlek beror på om belastningen gör att förkonsolideringstrycket överskrids eller inte.

En lera är normalkonsoliderad om in-situ spänningarna σ_0' är lika stora som förkonsolideringstrycket σ_c' och överkonsoliderad om $\sigma_c' > \sigma_0'$ (Sällfors, 2013). Vid beräkning av sättningar finns det olika fall beroende på graden av överkonsolidering, se Tabell 1.

Tabell 1 Beräkningsfall.

Fall	Gränser	Formel
Fall 1 Högt överkonsoliderad lera	$\sigma_0' + \Delta_\sigma < \sigma_c'$	$\delta = \sum h \frac{\Delta_\sigma}{M0}$
Fall 2 Svagt överkonsoliderad lera	$\sigma_C' < \sigma_o' + \Delta\sigma < \sigma' L$	$\delta = \sum h \left(\frac{\sigma_C' - \sigma_0'}{M_O} + \frac{\sigma_0' + \Delta_\sigma - \sigma_C'}{ML} \right)$
Fall 3 Svagt överkonsoliderad lera under hög belastning	$\sigma_\sigma' + \Delta_\sigma > \sigma' L$	$\delta = h \left(\frac{\sigma_c' - \sigma_0'}{M_0} + \frac{\sigma' L - \sigma_c'}{M_L} + \frac{1}{M'} ln(1 + (\sigma_0' + \Delta\sigma - \sigma_L') \frac{M'}{M_L} \right)$

Parametrarna i dessa tre fall utvärderas med hjälp av ödometerkurvan (Sällfors, 2013). Med fall 1 uppstår konsolidering under ett snabbt förlopp och kallas därför ibland för momentana sättningar. Fall 2 och 3 innefattar både så kallade momentana och tidsberoende konsolideringssättningar.

2.7. PLAXIS

PLAXIS är ett datorprogram framtaget för finita element analyser inom de flesta områden inom geoteknik (Claesson, 2003). Utvecklingen av programmet skedde på the Technical University of Delft 1987. Det kan användas till bland annat deformationsberäkningar, analyser av vattenflöden och stabilitet (Bentley Systems, u.d.).

I PLAXIS 2D skapar användaren en geometrisk modell över området som ska analyseras (Bentley Systems, 2023b). Användaren placerar ut borrhål där

jordlagerföljden och grundvattenytan kan specificeras. Ovanpå den geometriska jordmodellen kan strukturer eller laster placeras. Materialegenskaperna för jorden och eventuella strukturer läggs till i en materialdatabas med dess parametrar. I programmet finns det flera olika materialmodeller att välja på beroende på vilket typ av material som analyserats och den önskade noggrannheten. En ökad noggrannhet kräver fler ingångsparametrar.

När modellen är färdigmodellerad skapar programmet ett finit elementnät (Bentley Systems, 2023b). Användaren får därefter definiera olika beräkningssteg innan beräkningen kan genomföras. När beräkningarna är genomförda så kan resultaten visas i flera olika utföranden, både grafiskt och i text.

2.7.1. Soft Soil

I de fall en normalkonsoliderad eller lätt överkonsoliderad lera ska modelleras är materialmodellen Soft Soil (SS) ett bra alternativ (Brinkgreve, 2021). Modellen använder isotropisk kompressionsindex (λ^*) och svällningsindex (κ^*) som huvudsakliga parametrar. De parametrar som behöver bestämmas för modellen presenteras i Tabell 2.

Tabell 2 Parametrar för Soft Soil modellen (Bentley Systems, 2023a) .

Parameter
λ* [-]
κ* [-]
ν_{ur} [-]
c' [kPa]
φ [°]
Ψ [°]

λ^* och κ^* definieras i en spänningsgraf plottad i p'-q planet, där $p' = 1/3(\sigma'_v + 2\sigma'_h)$ och $q = \sigma'_v - \sigma'_h$ (Karstunen & Amavasai, 2017). Men de kan även

approximeras utifrån modulerna C_c och C_s som ofta används vid traditionella sättningsberäkningar. För att göra detta används ekvation 21 och 22,

$$\lambda^* = \frac{C_C}{2{,}3(1+e)} \tag{21}$$

$$\kappa^* = \frac{C_s}{1+e} \tag{22}$$

Modellen är väldigt känslig för OCR värden vilket gör att σ_c' behöver bestämmas med stor försiktighet (Karstunen & Amavasai, 2017). Friktionsvinkeln behöver anges för materialet och är den vinkel med vilken skjuvhållfastheten ökar jämfört med effektivspänningen (Bentley Systems, 2023a). Poissons tal är förhållandet mellan spänningsökningarna horisontellt och vertikalt.

2.7.2. Soft Soil Creep

SS modellen som precis nämnts tar inte hänsyn till krypning. Därför finns Soft Soil Creep (SSC) modellen. Modellen bygger på de endimensionella krypteorier från bland annat Šuklje och Bjerrum som tidigare nämnts (Olsson, 2010). Denna modell använder i stort sett samma parametrar som SS modellen men med tillägget krypindex, μ^* (Brinkgreve, 2021). μ^* definieras i ett tid-töjnings (ε_p) diagram men kan precis som de andra två indexparametrarna i SS kopplas till index i 1D (Karstunen & Amavasai, 2017). För krypindexet kopplas det till C_α och kan räknas ut genom ekvation 23,

$$\mu^* = \frac{C_\alpha}{2{,}3(1+e)} \tag{23}$$

SSC modellen antar att alla oelastiska töjningar är krypning och i den endimensionella modellen kan total töjning ges med ekvation 24 enligt Claesson (2003). μ^* är lika med det C som finns i ekvationen.

$$\varepsilon = \varepsilon_c^e + \varepsilon_c^{cr} + \varepsilon_{ac}^{cr} = -A * \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0}\right) - B * \ln\left(\frac{\sigma'_{pc}}{\sigma'_{p0}}\right) - C * \ln\left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}\right) \tag{24}$$

2.8. Klimatpåverkan

Sveriges klimat kommer att påverkas i framtiden på grund av människans utsläpp av växthusgaser i atmosfären (SMHI, 2025). I Sverige har den genomsnittliga

temperaturen ökat med 2 grader sedan 1800-talet, vilket är dubbelt så mycket som det globala medelvärdet. I Västsverige beräknas det att temperaturen kommer att ha ökat med ytterligare 3 grader om 100 år.

2.8.1. Klimatförändringarna påverkan på grundvatten

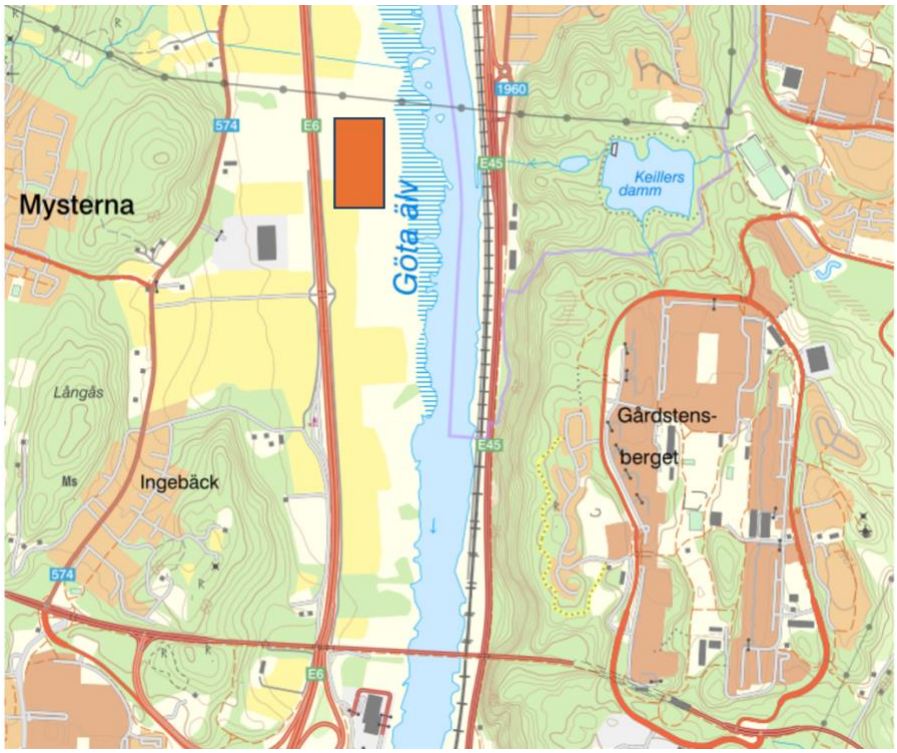
Grundvattennivån varierar kraftigt beroende på plats, markförhållanden och årstid (SGU, 2024). Under hösten och tidig vår är ofta grundvattenbildningen stor, medan under vintern och sommaren finns det risk för grundvattentorka. Klimatförändringarna har dock medfört att dessa årstidsvariationer har påverkats över tid.

Nederbörden beräknas fram till år 2098 att öka med 25 procent vid Västsveriges kustområden (Lundström, Dehlbom, Löfroth, & Vesterberg, 2018). De ökade temperaturerna och nederbörden kommer att påverka grundvattennivåerna. Nederbörd bidrar till en höjd grundvattennivå på grund av den ökande mängden vatten som kommer från nederbörden. Mängden skyfall förväntas även öka i framtiden (Olsson & Foster, 2013). Skyfall definieras av SMHI som när 50 mm nederbörd faller under en timme. Fler skyfall ökar grundvattennivåerna på kort tid på grund av den stora mängden vatten (Lundström, Dehlbom, Löfroth, & Vesterberg, 2018). Den globala temperaturökningen kan även leda till lägre grundvattennivåer, då mer vatten avdunstar samtidigt som tillförseln minskar.

I den senaste studien bedöms det sammantaget att grundvattenbildningen kommer att öka under vintern och minska på våren (SGU, 2024). Grundvattennivån förväntas därmed minska under sommaren och hösten. I Götaland väntas perioderna då det råder grundvattentorka att bli längre och årsmedelvärdet för grundvattennivån väntas bli något mindre eller oförändrad. Skillnaderna mellan ett torrt år och ett blött år förväntas även bli större.

3. Testområdet

Testbanken planeras att byggas i ett område på 29 hektar i Kärra, ca 1,5 kilometer norr om Angeredsbron, se Figur 10. I väst omringas området av E6 och i öst av Göta älv. För att forskargruppen på Chalmers skulle få rätt förutsättningar för studier av sättningar och markrespons i djupa lerlager valdes platsen för testbanken med två centrala kriterier: området skulle vara minimalt påverkat av tidigare mänsklig aktivitet och lerdjupet skulle uppgå till minst 30 meter. I det här kapitlet beskrivs testområdets egenskaper och förutsättningar.



Figur 10 Ungefärlig placering av testområdet, ej skalenlig, hämtad från (Lantmäteriet, u.d.).

3.1. Geologiska förhållanden

Information om de geologiska förhållandena som jordlagerföljd, berggrund och grundvattennivåer i området kring testbanken är mycket viktigt för att kunna utföra sättningsberäkningar. Utöver det är det även viktigt att ta hänsyn till de historiska förutsättningarna marken har i området. Att kartlägga dessa förhållanden bidrar till en ökad förståelse för markens egenskaper och är avgörande för att bedöma om marken är lämplig för byggnation.

3.2. Lokal geologi

Glaciala leror började bildas i Sverige för cirka 20 000 år sedan i samband med inlandsisens avsmältning (Larsson & Sällfors, 1995). Lerorna avsattes främst vid isälvarnas deltan där smältvatten transporterade och sorterade sediment. Sedimentationen fortsatte och de lager som avsattes på senare tid kallas postglaciala leror. Dessa sedimenterades och lagrades i lågt liggande områden ovanpå de glaciala lerorna.

När isen retirerat påbörjades en landhöjning på grund av att marken varit tryckt under isen (Larsson & Sällfors, 1995). Sedimentationen fortsatte fram tills det att markytan steg över havsnivån. Processen påverkade grundvattennivån som sänktes i och med landhöjningen. I Västsverige skedde isens retirerande för cirka 10 000 - 14 000 år sedan, vilket ledde till att stora delar av landytan låg under vatten under lång tid. Mycket finkornigt material sedimenterade till botten för att bilda tjocka lerlager. Landytan i Göteborg har endast legat ovanför vattenytan i omkring 1 000 år.

På västkusten kan lerlager vara upp till nästan 100 meter tjocka (Larsson & Sällfors, 1995). De äldsta glaciala lagren består generellt av grövre lera med lägre plasticitet medan de yngre, postglaciala sedimenten är mer finkorniga och innehåller mer organiskt material, vilket ger dem högre plasticitet. Den långa sedimentationsperioden efter den senaste istiden har även lett till en ökning av lerans effektivspänning.

3.2.1. Lokala variationer

Beskrivningen i kapitlet ovan är en generell bild av lerans bildningsprocess i Sverige, men lokala variationer och specifika geologiska händelser har också påverkat dess egenskaper i olika områden (Larsson & Sällfors, 1995). I det aktuella området på västkusten, finns särskilda händelser som har haft en betydande inverkan på avsättningen. En av dessa händelser är avtappningen av den baltiska issjön för ca 10 000 år sedan. Den baltiska issjön bildades av stora mängder smältvatten som fyllde upp lågt liggande områden framför isens retirerande kant (Andréasson, 2006). I takt med att isen smälte steg vattennivån succesivt. Till en början fanns endast ett utlopp i nuvarande Öresund. Landskapet dominerades av moränleror och glaciala avlagringar vilket gjorde att vattnet lätt eroderade sig djupare. En kritisk punkt uppnåddes när den Baltiska issjön

började dämmas upp. Detta på grund av att isavsmältningen skedde snabbt samtidigt som utloppet vid Öresund blev grundare på grund av pågående landhöjning. Samtidigt utsattes den sydligaste delen av Östersjön för en transgression, då havet trängde in över land, medan en regression, där land blottades, inträffade norr om Skåne. Så småningom inträffade även den stora tappningen av den Baltiska issjön. Det skedde när isen smälte förbi området kring Billingens norra delar som då låg lägre än tröskeln vid Öresund. Sjön tappades ur i flera omgångar vilket har lämnat tydliga spår i landskapet från iskantens rörelser i form av ändmoräner från iskanten samt sediment från den första tappningen. De höga vattenhastigheterna som tappades ur har skapat grova avlagringar som block, sten och grus.

Händelserna har skapat en sänkning av plasticiteten och tillfällig ökning av siltinnehåll i de aktuella lerlagren (Larsson & Sällfors, 1995). Efter dessa händelser återupptogs den generella avsättningsprofilen som beskrivits tidigare.

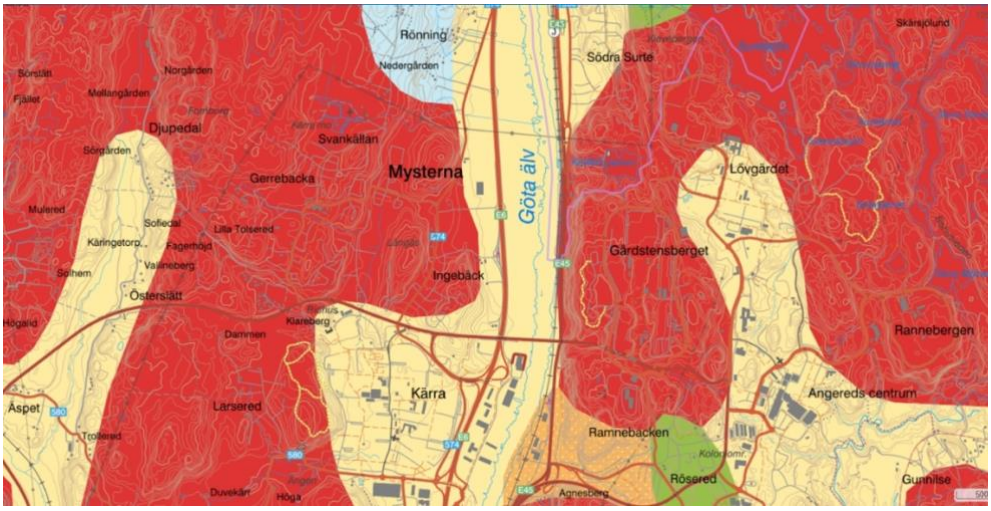
3.2.2. Geologisk åldring

Lösa leror i Sverige brukar anses som normalkonsoliderade eftersom de inte har utsatts för någon större effektiv vertikalspänning, σ_0', än den som finns idag (Larsson & Sällfors, 1995). Trots detta uppvisar lerorna vid undersökning deformationsegenskaper som om de vore svagt överkonsoliderade och klarar en tilläggslast upp till förkonsolideringstrycket σ_c', innan stora sättningar uppstår. Den extra styrkan som uppkommer kallas kvasi-förkonsolideringstryck och orsakas av så kallad geologisk åldring. Kvasi-förkonsolideringstrycket som uppstår är större än in-situ spänningen och kan inte relateras till en tidigare högre effektivspänning. Åldring gör alltså att leran får en högre hållfasthet vilket är fördelaktigt vid belastning. Åldring sker så länge inga andra förändringar inträffar vilket innebär att all lera är mer eller mindre åldrad.

3.2.3. Jordlagerförhållanden

Jordarter bildas genom processer som vittring, nedbrytning och sedimentering av berggrunden, vilket leder till att jordtäcket har varierande jordarter (SGU, 2020). Jordarter har bildats under kvartärtiden, som började för cirka 2,5 miljoner år sedan och bildandet pågår fortfarande.

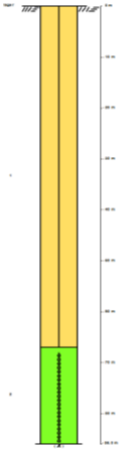
Med hjälp av SGU:s kartvisare kunde jordlagerförhållanden i området bestämmas (SGU, 2025). Enligt Figur 11 består testområdet huvudsakligen av lera och silt.



Figur 11 Jordartsfördelningen i och omkring testområdet, där gult = lera och silt, rött = berg, grönt = isälvssediment och blått = morän (SGU, 2025).

3.2.4. Jordlagerföljden i testområdet

Enligt Figur 12 som visar ett närliggande borrhål består jordlagerföljden i området av finlera mellan 0 – 67 meters djup och därefter friktionsjord från 67 - 88 meter (SGU, 2025). Detta har använts som vägledning och verifiering vid fastställandet av jordlagerföljden som använts i beräkningarna.

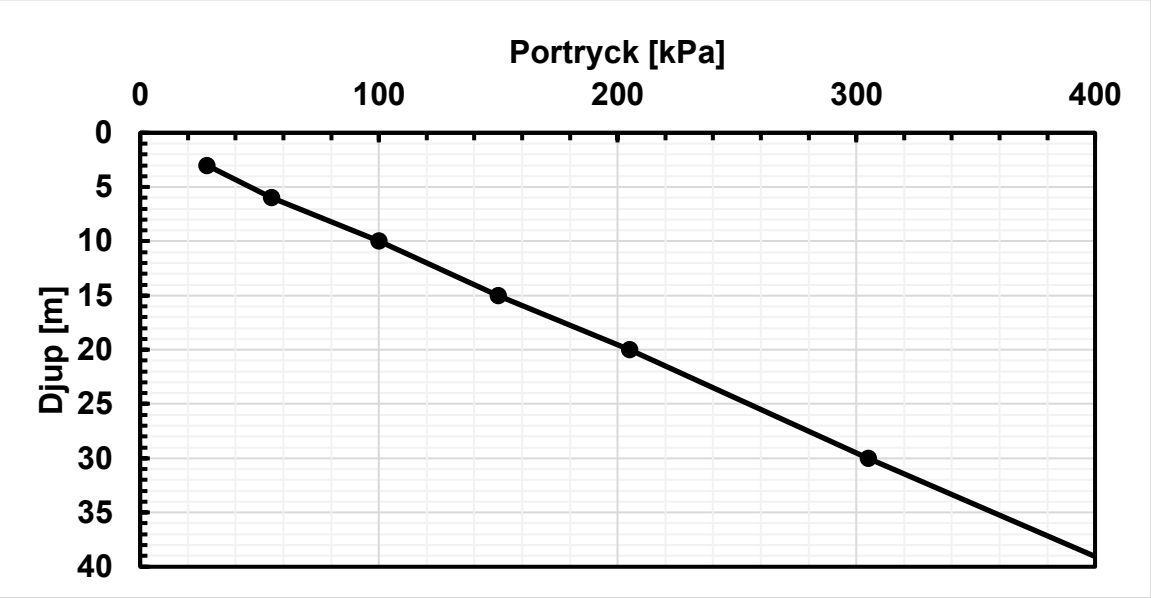


Figur 12 Jordlagerföljden i ett närliggande borrhål (SGU, 2025).

3.2.5. Grundvattennivå

Att bestämma grundvattenyta och portryck är en viktig del i geotekniska projekt, eftersom dessa värden har stor inverkan på beräkningar av effektivspänningarna (Sällfors, 2013). Porvattentrycket mäts i förhållande till atmosfärstrycket, och grundvattennivån definieras där portrycket är lika med noll. Under denna nivå är jorden helt vattenmättad (Knappett & Craig, 2012).

Grundvattennivå har bestämts baserat på portrycksmätningar, genom att sammanställa portycksnivåer enligt Figur 13. Utifrån antagen trendlinje kunde grundvattennivån antas till 1 meter under markytan. Antagandet kunde styrkas genom att notera att vid 2 meters djup var vattenkvoten uppmätt till 98%, se Bilaga 1.



Figur 13 Portryck.

4. Indata och antaganden

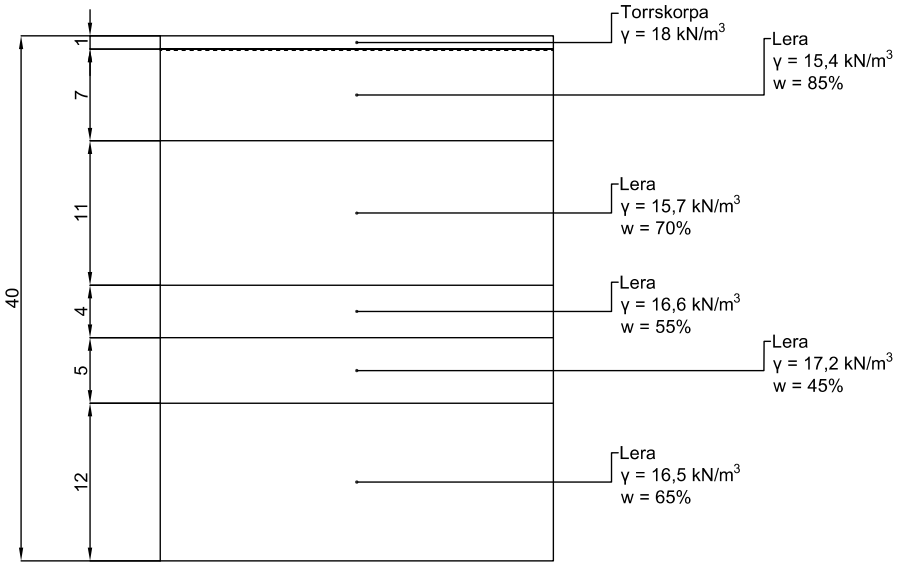
Inför beräkningarna för hand och i programmet PLAXIS fastställdes parametrar genom analys av tillgängliga data kompletterat med antaganden vid behov. Där beräkningsmodellerna delar parametrar användes samma värden för modellerna.

4.1. Bestämning av jordlagerföljd

Med hjälp av sammanställda densiteter och vattenkvoter har en approximativ följd gjorts utefter skapade trendlinjer, se Bilaga 1. Med vetskapen att det är ett djupt lerlager på platsen har jordlagerföljden bestämts och delats in i olika lerlager utefter egenskaper.

I grafen med uppmätta portryck upptäcktes en förändring vid 21 meter, se Bilaga 2. Portrycket sjunker kraftigt vilket skulle kunna tyda på en förändring i jordlagerföljden. Eftersom portrycket minskar skulle lagret kunna bestå av ett material med grövre kornstorlek (Larsson, 2015). Ett material som grus eller sand skulle alltså kunna finnas på djupet. För att verifiera förändringen i jordlagerföljden är det relevant att förändring sker i ytterligare uppmätta egenskaper från CPT-mätningen så som spetstryck och mantelfriktion. I graferna för spetstryck och mantelfriktion upptäcks däremot ingen tydlig förändring vid 21 meter, se Bilaga 2. För att bekräfta ett gruslager skulle spetsmotståndet behöva öka och mantelfriktionen minska (Larsson, 2015). Med anledning av det anses förändringen vid 21 meter inte tyda på ett nytt lager utan snarare en störning vid mätningen.

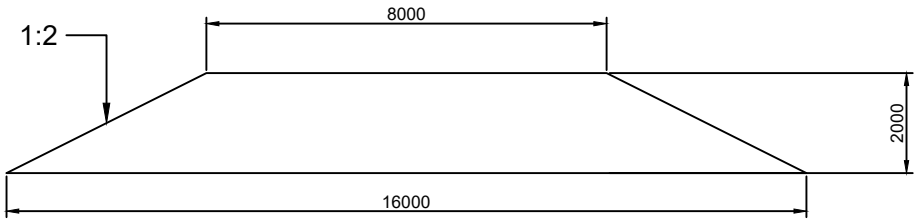
Antagen jordlagerföljd med tillhörande egenskaper redovisas i Figur 14.



Figur 14 Jordlagerföljd.

4.2. Testbanken

Mått på testbanken har tillhandahållits av handledare enligt Figur 15. Tungheten på vägbanken antas till 18 kN/m^3.



Figur 15 Mått på testbank [mm].

4.3. Indata vid handberäkning

Indata som använts vid handberäkning kommer från olika typer av fält- och laborationsundersökningar där parametrar har samlats in. Undersökningarna har genomförts av olika aktörer och är inte en del av denna studie. Fältundersökningarna som indata har hämtas ifrån är CPT och portrycksundersökningar. Laborationsundersökningarna där indata har hämtats ifrån är CRS-försök och ödometerförsök. CRS-försöken har dels genomförts av företaget AFRY och dels forskare från Chalmers.

CRS-försöken har analyserats med den svenska analysmetoden för att utläsa egenspänningarna $\sigma_c^{'}$ och $\sigma_L^{'}$. För att erhålla genomsnittliga spänningar genom hela jordprofilen har trendlinjer skapats. Spänningarna har antagits vara linjära från den punkt närmast markytan upp till ytan. CRS-försöken har även analyserats för att sammanställa elasticitetsmodulerna M_0, M_L och $M^{'}$. Även här användes trendlinjer få fram elasticitetsmoduler för hela jordprofilen.

För att avläsa parametrarna c_v och k har grafer från CRS-försök använts som plottar c_v och k mot töjning ε. Värdena har hämtats från den del av mätningen där parametrarna har stabiliserat sig i graferna, vilket var när töjningen var mellan 10 och 20 procent.

Kryptalet μ^* har räknats ut med hjälp av ekvation 17 där vattenkvoten för varje lager har använts i ekvation 18. τ_c har valts till 25 år då cirka 95% av konsolideringen har skett vid 25 år. Detta valdes på grund av att krypsättningar främst sker när konsolideringen har avstannat.

För grafer med parametrar se Bilaga 3.

4.4. Indata PLAXIS

För beräkning av λ^* och κ^* har formlerna som beskrivs i 2.7.1 använts. C_c och C_s har uppskattats genom σ_v'-e grafer, där σ_v' är den vertikala effektivspänningen och e är porositeten. Graferna är baserade på data från CRS-försök. I formlerna har e_0 använts. I SSC modellen har också μ^* använts, vilket motsvarar det krypindex som används i handberäkningarna.

För att få fram λ^* och κ^* för andra djup än vad σ_v'-e grafer fanns tillgängliga så har de svenska modulerna omvandlats till λ^* och κ^* genom ekvation 25 och 26 (Olsson, 2010). Genom dessa ekvationer fås en uppfattning om i vilken storleksordning indexen kan förväntas vara.

$$\lambda^* = \frac{1{,}1 * \sigma_c'}{M_L} \tag{25}$$

$$\kappa^* = \frac{2 * \sigma_v'}{M_0} \tag{26}$$

Tungheten har valts enligt beskrivning i kapitel 4.1. Poissons tal för av- och pålastning ligger vanligtvis i intervallet 0,1 – 0,2 och har i detta projekt valts till 0,18 i lerlagren (Bentley Systems, 2023a). Dilitansvinkeln sätts till 0 då den kan bortses ifrån vid lermaterial.

OCR värden har beräknats för varje lager genom att dividera $\sigma_c^{'}$ med σ_0'. För K_0 användes 0,6 då det överensstämmer med förhållandet mellan den horisontella och vertikala spänningen i lagren. För M användes inställningen ”STANDARD”. Genom att analysera triaxialförsök har φ och $c^{'}$ kunnat uppskattats.

De olika parametrarna justerades sedan genom att genomföra ”soil test” i PLAXIS och försöka matcha de resulterande kurvorna med den indata som erhållits vilket beskrivs vidare i kapitel 5.2. Parametrar för torrskorpa och vägbank har antagits utifrån vad som anses vara normala värden (Karstunen & Amavasai, 2017).

Parametrar som används i PLAXIS redovisas i Tabell 3.

Tabell 3 Parametrar som används i PLAXIS.

Lager	Vägbank	Torrskorpa	Lager 1	Lager 2	Lager 3	Lager 4	Lager 5
Modell	Hardening Soil	Mohr-Coulomb	SS / SSC	SS / SSC	SS / SSC	SS / SSC	SS / SSC
γ [kN/m^3]	18	18	15,4	15,7	16,6	17,2	16,5
e_0 [-]	0,5	0,5	2,3	2,0	2,0	2,0	2,0
E'_{ref} [kN/m^2]	-	3 000	-	-	-	-	-
E_{50}^{ref} [kN/m^2]	25 000	-	-	-	-	-	-
E_{oed}^{ref} [kN/m^2]	25 000	-	-	-	-	-	-
E_{ur}^{ref} [kN/m^2]	75 000	-	-	-	-	-	-
λ*	-	-	0,26	0,2	0,255	0,21	0,265
κ*	-	-	0,022	0,015	0,012	0,012	0,010
μ*	-	-	0,01045	0,00781	0,0040	0,0040	0,0070
v_{ur} [-]	0,2	0,3	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
c' [kN/m^2]	1	5	2	0	0	0	0
ϕ' [°]	30	30	34	38	38	38	38
k [m/dygn]	-	0,8E-3	1,73E-5	3,46E-5	6,91E-5	4,32E-5	4,32E-5
OCR	1,0	-	1,91	1,725	1,67	1,89	1,8

5. Beräkningar

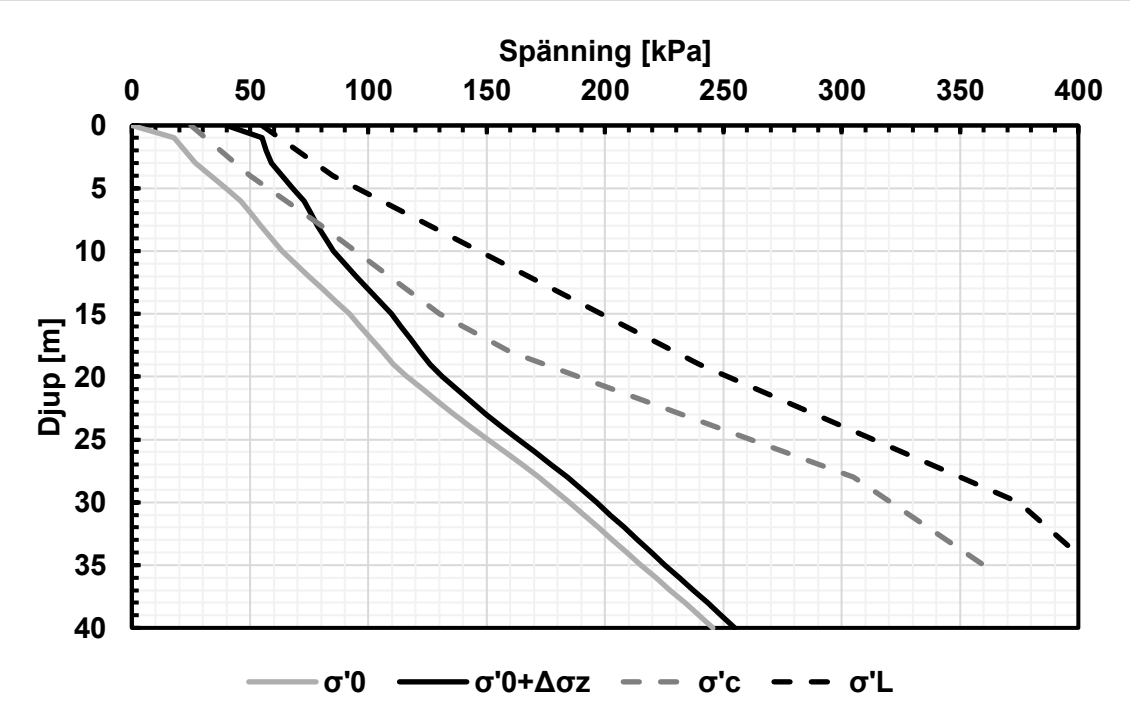
Beräkningar genomfördes för hand med svensk modell och med beräkningsprogrammet PLAXIS. Krypsättningarna för båda metoderna beräknades på en tidsperiod på 100 år. Detta på grund av att en längre tidshorisont än så inte är aktuell att studera då vägbankar inte dimensioneras med en livslängd som överskrider det.

5.1. Handberäkningar med svenska modellen

Beräkningen för sättningarna med svenska modellen beräknades i två delar, konsolideringssättningar och krypsättningar.

5.1.1. Konsolideringssättningar

Tillskottspänningen $\Delta\sigma'$ från testbanken beräknades med 2:1 metoden för att få fram specifika tillskottspänningar för olika djup i jordprofilen. Effektivspänningen σ'_0 beräknades sedan med Terzaghis ekvation för varje djup. Parametrarna σ_c' σ'_L, σ'_0 och $\sigma'_0 + \Delta\sigma'$ sammanställdes i ett diagram för att avgöra vilka beräkningsfall som bör användas, se Figur 16.



Figur 16 Spänningsdiagram.

5.1.2. Krypsättningar

Krypsättningar beräknas oftast inte analytiskt och det finns många olika sätt att beräkna de på. För handberäkningarna i detta projekt har en förenklad metod använts enligt kapitel 2.3.5. Med hjälp av ekvation 15 kan ett tillskott av krypsättningar läggas till motsvarande den sista termen av ekvationen. Med kryptalet μ^* har krypsättningen räknats ut för olika kryptider, $t^{'}$, och adderats på den uträknade konsolideringssättningen.

För att kontrollera krypsättningarna utfördes även samma sättningsberäkning som tidigare gjorts för hand men med värdena för M_0 utbytta mot M_L för hela jordprofilen. På så sätt utfördes en beräkning utan hänsyn till förkonsolideringstrycket som en enkel modell för att räkna sättningar inkluderat krypning. Modellen användes för länge sedan innan det fanns ett mer etablerat sätt att räkna krypsättningar. De resulterande värdena på sättningarna jämfördes sedan för att dra slutsatser om hur bra denna modell skulle kunna beskriva krypsättningar i liknande lerlager.

5.2. PLAXIS

Materialmodellerna skapades i PLAXIS baseras på den indata beskriven i kapitel 4.4. Den geometriska jordmodellen skapades med en bredd på 160 meter och 40 meter djup. Därefter skapades en geometrisk modell med vägbankens mått enligt kapitel 4.2. Den undre randen i modellen sattes som öppen för grundvattenflöde. På grund av den väl tilltagna bredden på jordmodellen förväntades inte sidornas grundvattenflödesinställningar påverka resultaten.

Efter det genererades ett meshnätverk. Nätverket gjordes mer finmaskigt i mitten av jordmodellen där de största sättningarna förväntades. De olika beräkningsfaserna angavs enligt Tabell 4. Tiden för byggnation av banken sattes till 2 dygn.

Tabell 4 Beräkningsfaser

Initial	K0 procedure
1	Consolidation Staged construction 2 days
2	Consolidation Minimum excess pore pressure 1 kN/m^2

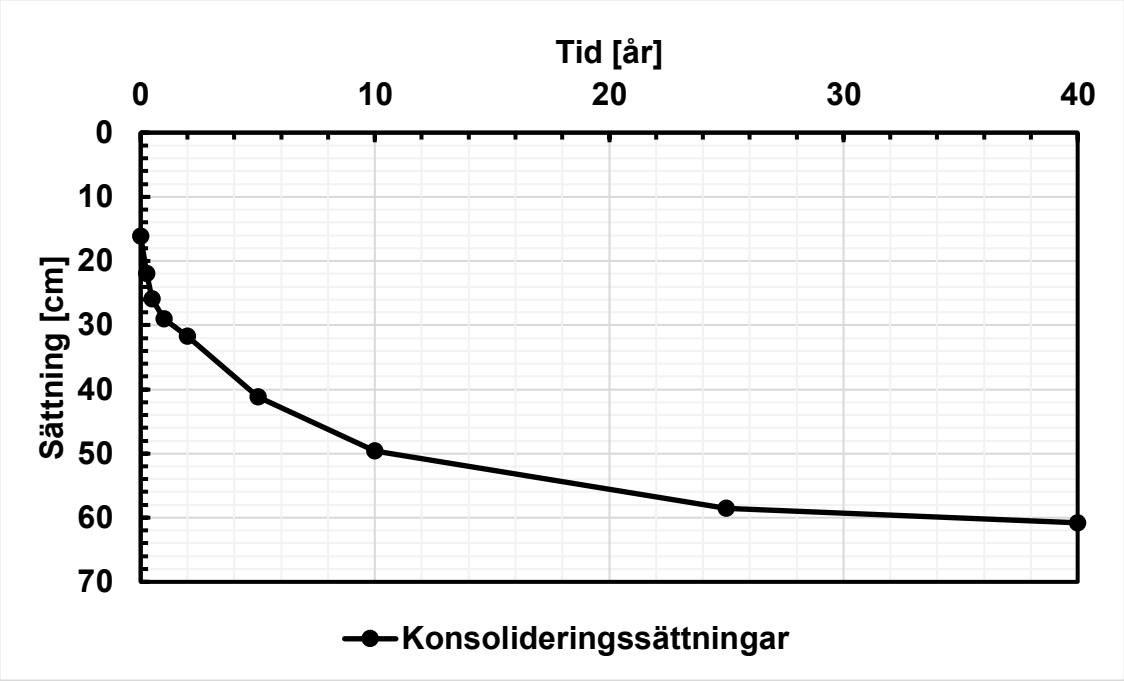
Vid beräkningarna i PLAXIS verifierades att CRS-kurvorna överensstämde med tillhandahållna laboratoriemätningar, samt att resultaten från triaxialförsöken låg i linje med de värden som PLAXIS genererade genom verktyget ”Soil Test”. Parametrarna κ^*, λ^*, μ^*, φ och c' justerades för att få värdena att matcha med kurvorna. Vid jämförelsen låg fokus på att kurvan strax efter avläsningspunkten för σ_c' på CRS-kurvan skulle vara så lik som möjligt. Mindre vikt lades vid att matcha den avslutande delen av kurvan. Se Bilaga 7 och Bilaga 8 för jämförelse mellan tillhandahållna CRS-kurvor och sådana genererade i ”Soil Test”.

6. Resultat

Resultaten redovisas här uppdelat på vilken metod som använts.

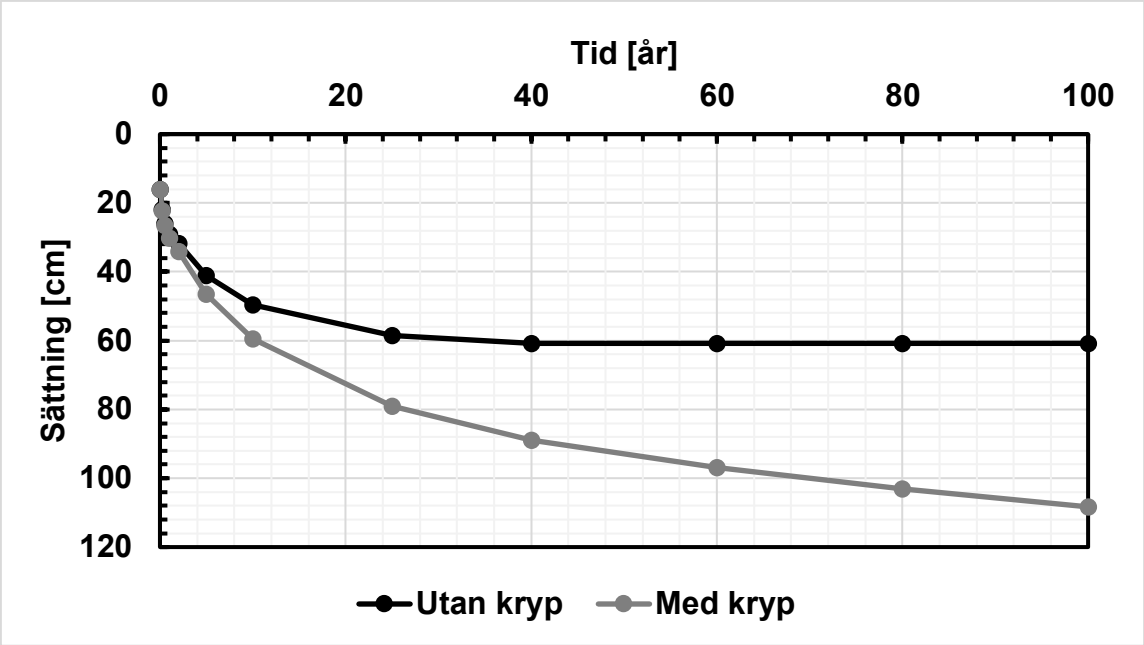
6.1. Handberäkningar

Konsolideringssättningarna beräknades till 60 cm sättning för den aktuella jordprofilen och den fullständiga konsolideringen förväntas inträffa efter ungefär 40 år. För att se hur de tidsberoende sättningarna utvecklas över tid se Figur 17.



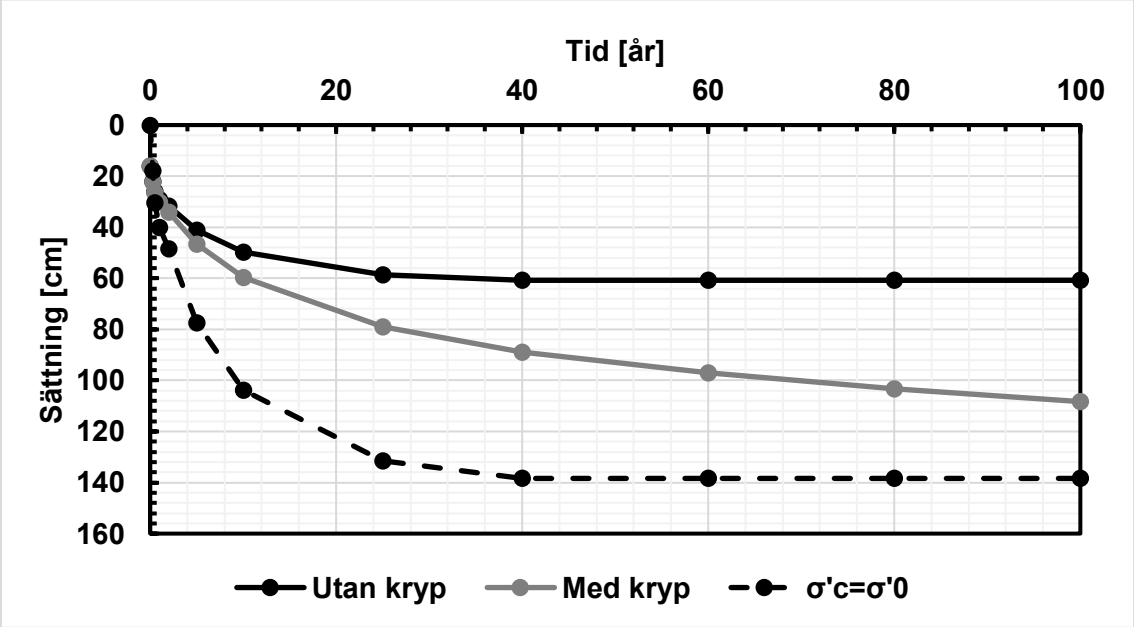
Figur 17 Konsolideringssättningar.

Krypsättningen för jordprofilen beräknades till 48 cm för 100 år framåt. Den totala sättningen för hela jordprofilen med konsolideringssättningar och krypsättningar blev 108 cm vilket visas i Figur 18.



Figur 18 Kryp- och konsolideringssättningar.

För beräkningarna där M_0 ersattes med M_L ($\sigma'_c = \sigma'_0$) uppnåddes en resulterande totalsättning på 138 cm. Den är högre än sättningarna som fås vid krypberäkningen för hand, se Figur 19.



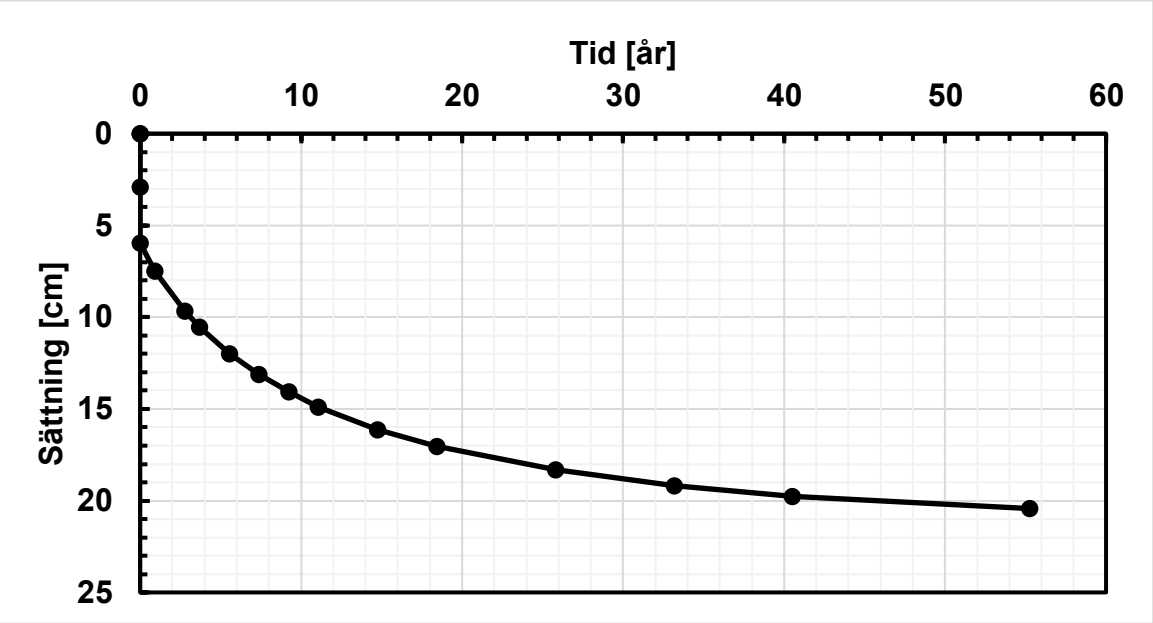
Figur 19 Jämförelse mellan metoderna med och utan kryp samt metoden med M_L i stället för M_0.

6.2. PLAXIS

Resultaten för PLAXIS med materialmodell Soft Soil och Soft Soil Creep redovisas i delkapitlen nedan. Beräkningarna genomfördes enligt 5.2.

6.2.1. Soft Soil

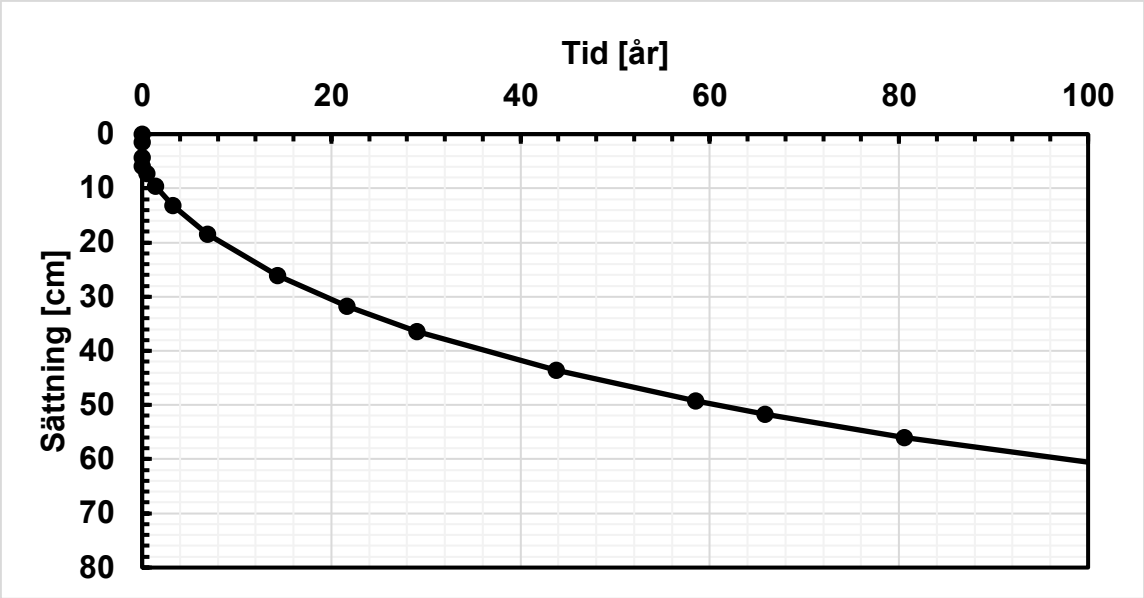
I Soft Soil modellen beräknades sättningarna till cirka 20 cm efter 55 år, se Figur 20. I Bilaga 4 redovisas de vertikala sättningarna och porövertrycket över modellen.



Figur 20 Tidsättningar med Soft Soil.

6.2.2. Soft Soil Creep

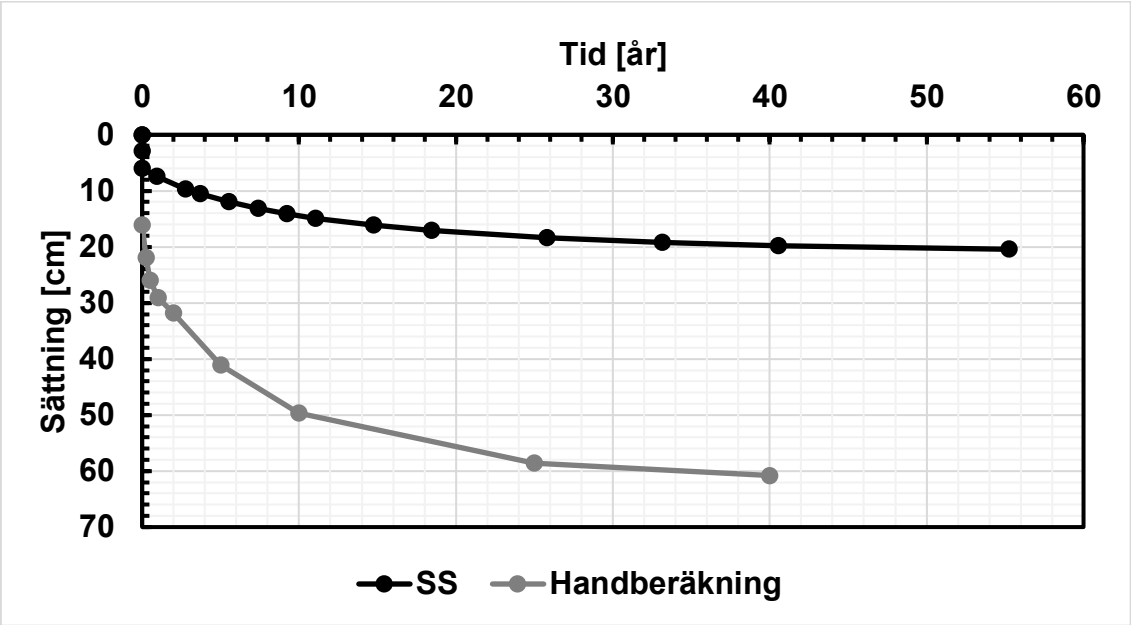
I Soft Soil Creep modellen beräknades sättningarna till cirka 60 cm efter 100 år, se Figur 21. I Bilaga 5 redovisas de vertikala sättningarna och porövertrycket över modellen. I Bilaga 5 redovisas ett annat resultat än i Figur 21, där sättningen uppgår till 1,16 m efter 1 023 år. Skillnaden beror på att inställningarna i PLAXIS i beräkningsfas två är satta till att beräkningen fortsätter till dess att porövertrycket överskrids och därmed sättningen helt har avstannat. Övriga beräkningar och redovisning av resultatet i grafer i detta kapitel är istället begränsade till en tidsperiod på 100 år på grund av att livslängden på vägbankar är begränsad till 100 år.



Figur 21 Tidssättningar med Soft Soil Creep.

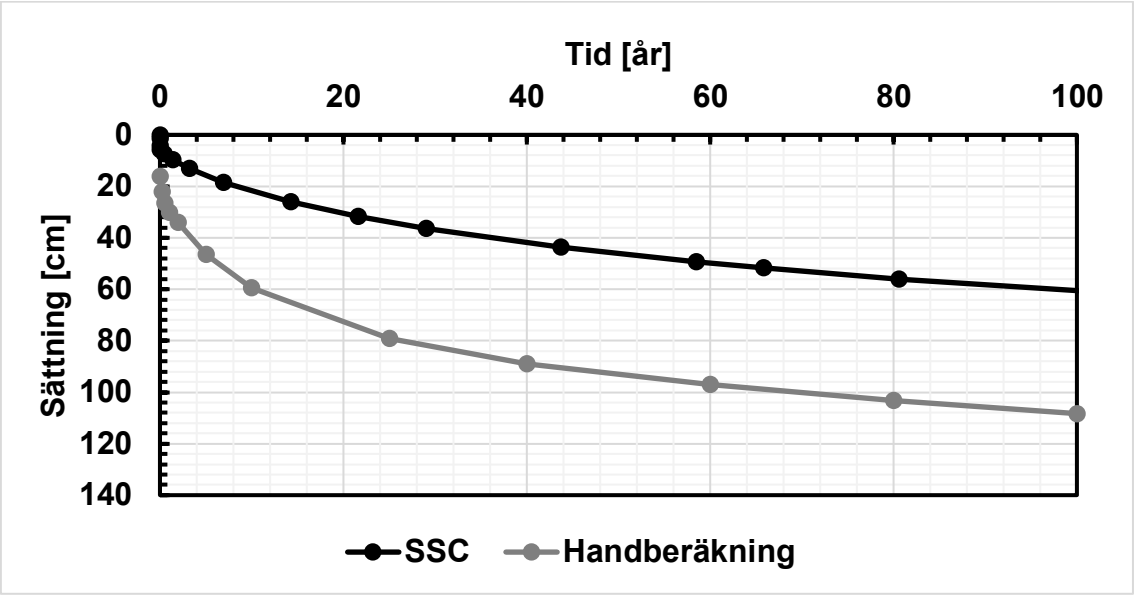
6.3. Jämförelse mellan handberäkning och PLAXIS

Skillnaden mellan konsolideringssättningarna för handberäkningen och PLAXIS redovisas nedan i Figur 22. För handberäkningen upphörde konsolideringen efter 40 år och PLAXIS SS ungefär 55 år, vilket är en skillnad på 15 år. Skillnaden på sättningen mellan handberäkningen och PLAXIS blev 40 cm för konsolideringssättningarna.



Figur 22 Jämförelse mellan konsolideringssättningar beräknade för hand och Soft Soil modellen.

Totalsättning (inkl. kryp) för handberäkningen och PLAXIS redovisas i Figur 23. Där utläses att skillnaden mellan resultaten för totalsättningen blev 48 cm efter 100 år.



Figur 23 Jämförelse mellan kryp- och konsolideringssättningar beräknade för hand och Soft Soil Crepp modellen.

Enligt Bilaga 6 följer spänningarna varandra väl mellan handberäkningarna och PLAXIS. σ_0' i SS- och SSC-modellen är samma därav syns endast en linje som är något större än den initiala spänningen som gavs genom handberäkning. σ_f' är något lägre i PLAXIS modellerna de översta 10 metrarna jämfört med handberäkningen. Under 10 meter är de tvärtom något större.

σ_c' följer varandra väl i de översta jordlagren enligt Bilaga 6. PLAXIS spänningar ligger strax under handberäkningen. Spänningarna för SS och SSC är samma, därav syns bara en linje för PLAXIS.

7. Diskussion

I det här avsnittet diskuteras resultaten i förhållande till arbetets syfte samt tidigare beskriven teori och gjorda antaganden. Fokus ligger på att analysera skillnader mellan beräkningsmetoderna samt diskutera resultatens noggrannhet och rimlighet utifrån antaganden, indata och valda beräkningsmodeller.

7.1. Diskussion av resultat

Resultaten visar att de beräknade sättningarna generellt blir mycket mindre i PLAXIS jämfört med beräkningen för hand, både med och utan krypning. Den största skillnaden kommer från konsolideringssättningen, där PLAXIS SS ger ett värde på 20 cm efter 40 år, medan handberäkningen visar 60 cm - en skillnad på 40 cm. Dessutom avtar konsolideringen över en längre tid i PLAXIS-beräkningen än för hand, 55 år jämfört med 40 år. Detta beror främst på att beräkningsmetoderna skiljer sig åt, vilket beskrivs mer utförligt i kapitel 7.2. I PLAXIS beräknas konsolideringstiden utifrån en mer detaljerad modellering av portryck och dräneringsförhållanden, medan handberäkningen bygger på idealiserade antaganden enligt Terzaghis teori där avläsningen av T_v och U_v kan vara osäkert.

När krypning inkluderas blir skillnaden 48 cm jämfört med 40 cm utan krypning. Skillnaden beror på att handberäkningen använder en förenklad metod för krypsättning. Metoderna som används vid beräkning för hand kan utifrån resultatet betraktas som mer konservativa jämfört med PLAXIS modellerna, som använder mer avancerade materialmodeller.

Skillnaderna i spänningsfördelning mellan metoderna är däremot små vad gäller de initiala och slutliga vertikala spänningarna. De är i stort sett identiska mellan handberäkningen och PLAXIS, vilket tyder på att modellerna använder liknande indata och att beräkningarna genomförts med rimliga antaganden. Spänningsgrafen för $\sigma_c^{'}$ visar att spänningarna följer varandra väl i de översta jordlagren. I de nedre delarna av jordlagren är indatan för spänningarna inte lika tillförlitlig men eftersom den största delen av sättningarna sker i de översta lagren påverkar detta inte resultatet betydande mycket.

Som en jämförelse utfördes en beräkning där förkonsolideringseffekterna uteslöts genom att ersätta M_0 med M_L för hela jordprofilen. Modellen resulterade i avsevärt större sättningar jämfört med övriga metoder. Metoden har historiskt använts innan det fanns mer etablerade metoder för beräkning av krypning och kan idag möjligen fungera för grova och konservativa beräkningar av krypsättningar, men saknar den noggrannhet som krävs för mer tillförlitliga analyser.

7.2. Skillnader i beräkningsmetodik

De observerade skillnaderna mellan beräkningsmetoderna beror huvudsakligen på skillnaderna i beräkningsmetodik. Handberäkningen bygger på 2:1 metoden som är en förenklad empirisk metod som antar att last sprider sig med förhållandet 2:1. PLAXIS använder i stället finita elementmetoden (FEM) som är en numerisk och geometrianpassad metod. PLAXIS tillämpar avancerade materialmodeller, som SS och SSC, som bättre kan beskriva komplexa fenomen som plastiska deformationer och tidsberoende beteenden i mjuka leror. Det är också viktigt att notera att i projektet används en förenklad metod för beräkning av krypsättning för hand vilket innebär mindre noggranna resultat för handberäkningen. Detta bör beaktas vid analys av resultaten.

7.3. Osäkerheter och begränsningar

En ytterligare faktor som påverkar resultatet generellt är att det endast finns data till ett djup av 40 meter tillgängligt, medan lerlagret i området är djupare än så. Detta innebär att de beräknade sättningarna kan vara underskattade. Beräkningen av sättningarna för testbanken beräknades på 100 år på grund av att det är den beräknade livslängden på en vägbank. Det medför dock en osäkerhet i resultaten, eftersom krypsättningar kan fortsätta under en längre tidshorisont än 100 år. Den verkliga totala sättningen kan därför komma att bli större än vad som redovisas i denna beräkning. Det bekräftas av beräkningarna i PLAXIS att den slutliga krypsättningen förväntas vara uppnådd först efter 1 023 år och då uppgå till 1,16 meter.

Indatan har utvärderats och bestämts med hjälp av trendlinjer och antaganden, vilket skapar osäkerheter i resultaten. Avläsning av de olika parametrarna skapar därmed en osäkerhet kring precisionen i indata.

En ytterligare begränsning är att PLAXIS inte redovisar beräkningsstegen i detalj, vilket gör det svårt att följa, kontrollera och jämföra delmomenten i beräkningsprocessen. För att säkerställa att PLAXIS använder samma indata som handberäkningen har därför ”soiltester” där CRS- och triaxialförsök jämförs. Vid jämförelsen av CRS-kurvorna låg fokus på att kontrollera att kurvan stämde överens strax efter avläsningspunkten för förkonsolideringstrycket. Dock matchades inte hela kurvan med samma noggrannhet, vilket bidrar med viss osäkerhet i analysen. Dessutom varierade överenstämmelsen mellan de olika lagren vilket skapar ytterligare viss osäkerhet.

7.4. Klimatförändringars påverkan på sättningar

Ett förändrat klimat, med mer nederbörd och skyfall, kan komma att påverka markens beteende i framtiden. Tillsammans med ökade temperaturer som leder till en snabbare avdunstning, kommer marken både påverkas av mer och mindre vattenmängder. Detta kan i sin tur påverka grundvattennivåerna, som varierar beroende på säsong. De förändrade grundvattennivåerna kan leda till förändrade sättningar genom ett förändrat portryck. När portrycket ändras förändras också effektivspänningen, vilket kan resultera i ökad eller minskad totalsättning för testbanken. Detta är en problematik som bör tas hänsyn till vid framtida byggnationer och sättningsanalyser.

8. Slutsats

Att kunna förutsäga markens sättningar är avgörande för att säkerställa stabiliteten och livslängden hos framtida infrastruktur, särskilt i områden med djupa lerlager. Studien har undersökt hur sättningsprognoser kan variera beroende på val av beräkningsmetod och därmed gett värdefull insikt inför anläggandet av den planerade testbanken.

Resultaten från PLAXIS visade generellt lägre sättningar, särskilt vid konsolideringssättning. Det indikerar att handberäkningen ger ett mer konservativt resultat, något som kan vara fördelaktigt i tidiga skeden av projektering där säkerhetsmarginaler är önskvärda. Samtidigt ger PLAXIS ett mer detaljerat resultat och troligtvis närmare det resultat som kan förväntas för testområdet i verkligheten.

Klimatförändringarna som väntas i framtiden kommer att påverka sättningarnas storlek och beteende då grundvattennivåerna kommer att variera alltmer mellan säsongerna.

Sammanfattningsvis bedöms resultaten i rapporten vara relativt tillförlitliga, men de bör tolkas med viss försiktighet med hänsyn till gjorda antaganden och förenklingar som gjorts i beräkningsmodellerna. Resultaten från PLAXIS kan anses något mer trovärdiga då det är en mer avancerad beräkningsmodell. De liknande spänningsnivåerna mellan de två metoderna stärker tillförlitligheten i de använda parametrarna och modellvalen, vilket tyder på att de båda modellerna utgår från jämförbara indata och geotekniska egenskaper.

Trots skillnader mellan beräkningsmodellerna uppvisar de liknande mönster vad gäller sättningens storlek och utveckling över tid. De presenterade resultaten ger därmed en god uppfattning om storlek och beteende för framtida sättningar i testområdet. Detta kan användas som riktlinje för nya mer utförliga prognosmodeller för sättningar i djupa lerlager.

8.1. Framtida arbete

Framöver bör arbetet med banken fortsätta med ambitionen att banken anläggs och mätningar av den verkliga responsen kan börja göras på området. Detta skulle möjliggöra validering av beräkningsmodellerna och öka förståelsen för sättningsbeteendet i djupa lerlager under verkliga förhållanden. För att stärka validiteten

i resultaten bör ytterligare beräkningsmodeller användas och jämföras, vilket kan bidra till en mer tillförlitlig utvärdering och ge ökad säkerhet i tolkningen av sättningsprognoserna.

Vidare studier bör fokusera på klimatförändringarnas potentiella påverkan på sättningsutvecklingen. Detta kan göras i syfte att identifiera eventuella behov av anpassningar av dimensionering av vägbankar som krävs med anledning av variationer i grundvattennivåer och portryck orsakade av förändrat nederbördsmönster och temperatur. Detta kan också bidra till att kartlägga vilka åtgärder som i så fall behövs.

Ett annat utvecklingsspår kan vara att studera effekten av olika belastningstyper och grundläggningsmetoder på liknande tjocka lerlager, exempelvis andra bankdimensioner eller analyser av beteenden till följd av pålning eller andra förstärkningsåtgärder. Detta skulle bidra till en förbättrad förståelse för lerans mekaniska beteende vid olika belastningar.

Referenser

Andréasson, P.-G. (2006). *Geobiosfären en introduktion.* Lund: Författarna och Studentlitteratur AB.

Bentley Systems. (2023a). *PLAXIS 2D 2023.2 Material Models Manual 2D.* Bentley Systems. https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0107989

Bentley Systems. (2023b). *PLAXIS 2D 2023.2 Reference Manual 2D.* Bentley Systems. https://bentleysystems.servicenow.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0107989

Bentley Systems. (u.d.). *PLAXIS 2D, 2D Geotechnincal Engineering Software*. Bentley Systems. https://www.bentley.com/software/PLAXIS-2d/

Brinkgreve, D. R. (den 3 Mars 2021). *The Soft-Soil And Soft-Soil Creep Model*. https://blog.bentley.com/software/the-soft-soil-and-soft-soil-creep-model/

Claesson, P. (2003). *Long term settlements in soft clays* [Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Publikation Nr. 1945]. Institutionen för geoteknik, Chalmers tekniska högskola. https://research.chalmers.se/en/publication/409

Craig, R. F., & Kanppett, J. A. (2012). Craig's Soil Mechanics (8 uppl.). Spon Press

Hansbo, S. (1975). *Jordmateriallära*. Stockholm: AWE/Gebers.

Karstunen, M., & Amavasai, A. (2017). *BEST SOIL: Soft soil modelling and parameter determination* (Forskningsrapport för BIG-projekt A2015-06). Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, Chalmers tekniska högskola. https://research.chalmers.se/publication/522789

LabMind AB. (u.d.). *Metoder*. https://www.labmind.se/metoder

Lantmäteriet. (u.d.). *Min karta*. https://minkarta.lantmateriet.se

Larsson, R. (1989). *Dilatometerförsök – en in-situ metod för bestämning av lagerföljd och egenskaper i jord: Utförande och utvärdering* (SGI Information Nr. 10). Statens geotekniska institut. https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i10.pdf

Larsson, R. (2007). *Långtidsobservationer av konsolideringsprocesser* (SGI Rapport Nr. 70) Statens geotekniska institut.https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1299953/FULLTEXT01.pdf

Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper* (SGI Information Nr. 1, 5:e rev. utg.). Statens geotekniska institut. https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i1.pdf

Larsson, R. (2015). *CPT-sondering: Utrustning – utförande – utvärdering. En in-situ metod för bestämning av jordlagerföljd och egenskaper i jord* (SGI Information Nr. 15, 3:e rev. utg.). Statens geotekniska institut. https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i15.pdf

Larsson, R., & Sällfors, G. (1995). *Sättningsegenskaper i lös lera på grund av geologisk avsättning och "åldring"* (Rapport Nr. 438). Statens geotekniska institut. https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1300344/FULLTEXT01.pdf

Larsson, R., Bengtsson, P.-E., & Eriksson, L. (1994). *Sättningsprognoser för bankar på lös finkornig jord*. (SIG Information Nr. 13) Statens geotekniska institut. https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1299893/FULLTEXT01.pdf

Lundström, K., Dehlbom, B., Löfroth, H., & Vesterberg, B. (2018, 16 april). *Klimatlasters effekter på naturlig mark och geokonstruktioner – geotekniska aspekter på klimatförändringen* (Diarienr: 1.1-1706-0431). Statens geotekniska institut. https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/uppdragsrapporter/klimatlasters-effekter-pa-naturlig-mark-och-geokonstruktioner-180416.pdf

Marchetti Dilatometer. (u.d.). *Marchetti Dilatometer*. Hämtad från https://www.marchetti-dmt.it

Olsson, J., & Foster, K. (2013). *Extrem korttidsnederbörd i klimatprojektioner för Sverige* (Klimatologi Nr. 6). SMHI. https://www.smhi.se/download/18.18f5a56618fc9f08e832a208/1717801341414/Klimatologi_6%20Extrem%20korttidsnederbörd%20i%20klimatprojektioner%20för%20Sverige.pdf

Olsson, M. (2010). *Calculating long-term settlement in soft clays – with special focus on the Gothenburg region* (SGI Rapport Nr. 74) [Licentiatuppsats nr 2010:3, Chalmers tekniska högskola & Statens geotekniska institut]. https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgi-r74.pdf

Sällfors, G. (2013). *Geoteknik: jordmateriallära, jordmekanik* (5:e uppl.). Cremona.

Svenska Geotekniska Föreningen. (1993). *Rekommenderad standard för vingförsök i fält* (SGF Rapport Nr. 2:93). Svenska Geotekniska Föreningen. https://svenskageotekniskaforeningen.se/kunskapsbank/sgf-rapporter/

Svenska Geotekniska Föreningen. (2013). *Geoteknisk fälthandbok* (SGF Rapport Nr. 1:2013). Svenska Geotekniska Föreningen. https://svenskageotekniskaforeningen.se/kunskapsbank/sgfs-falthandbok-geoteknik/

Statens geotekniska institut. (2023a, 25 augusti). *Jords tekniska egenskaper*. https://www.sgi.se/sv/Forskning--larande/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/jords-tekniska-egenskaper/

Statens geotekniska institut. (2023b, 18 oktober). *Undersökningsmetoder*. https://www.sgi.se/sv/vagledning-i-arbetet/falt--och-laboratoriemetoder/geotekniska-undersokningar/vad-undersoks/

Sveriges geologiska undersökning. (2020, 12 november). *Jord*. https://www.sgu.se/om-geologi/jord/

Sveriges geologiska undersökning. (2021, 8 mars). *Bergarter*. https://www.sgu.se/om-geologi/berg/bergarter/

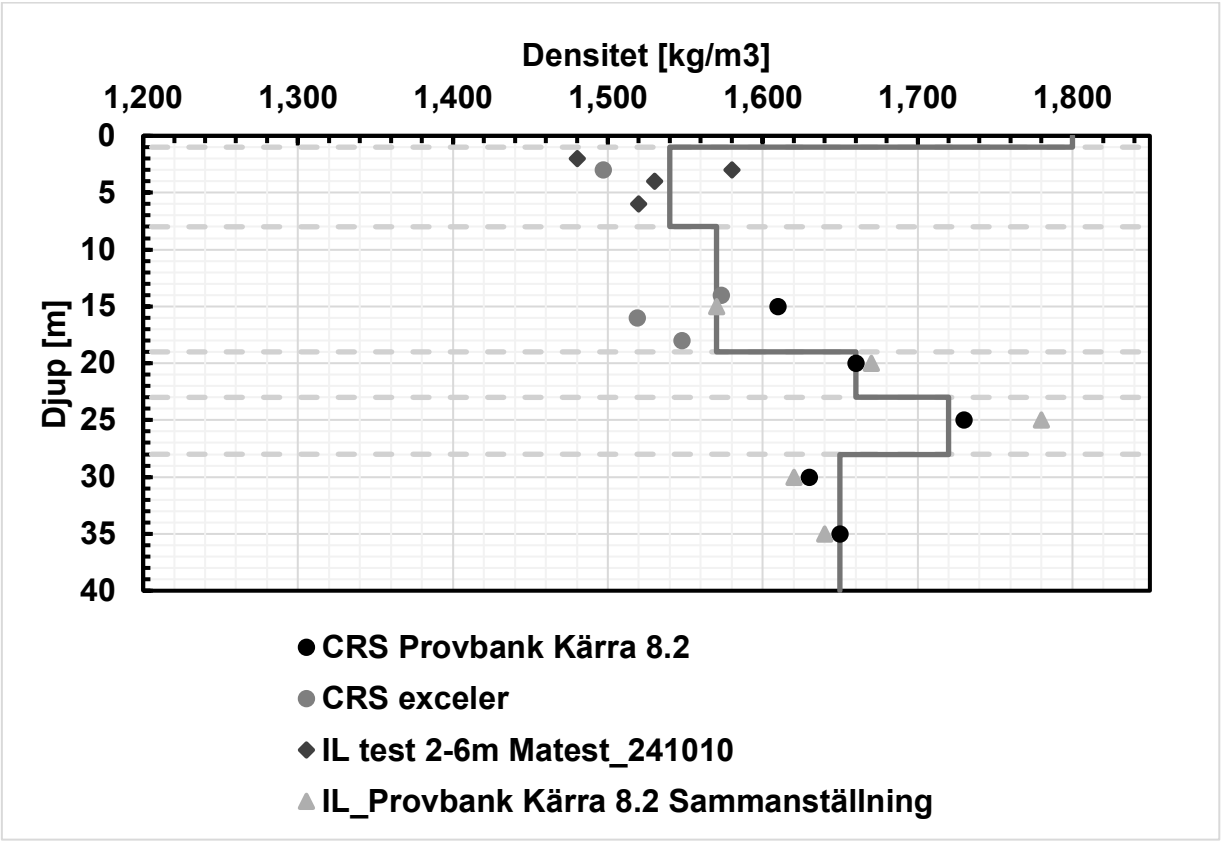
Sveriges geologiska undersökning. (2024, 8 april). *Grundvatten och förändrat klimat*. https://www.sgu.se/samhallsplanering/planering-och-markanvandning/grundvatten-i-planeringen/klimatforandringar/grundvatten-och-forandrat-klimat/

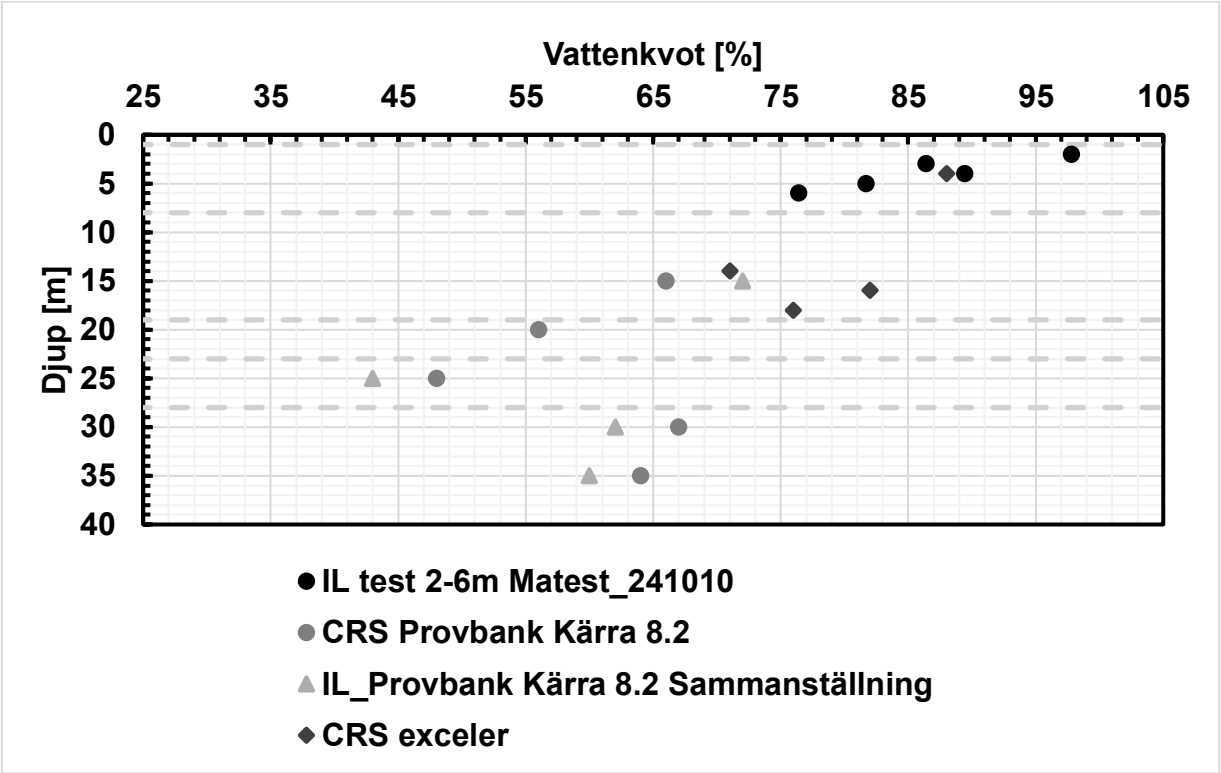
Sveriges geologiska undersökning. (2025). *SGU kartvisare*. https://apps.sgu.se/kartvisare/

Svenska meteorologiska och hydrologiska institutet. (2025, 29 mars). *Klimat – statistik, forskning och vägledning*. https://www.smhi.se/klimat

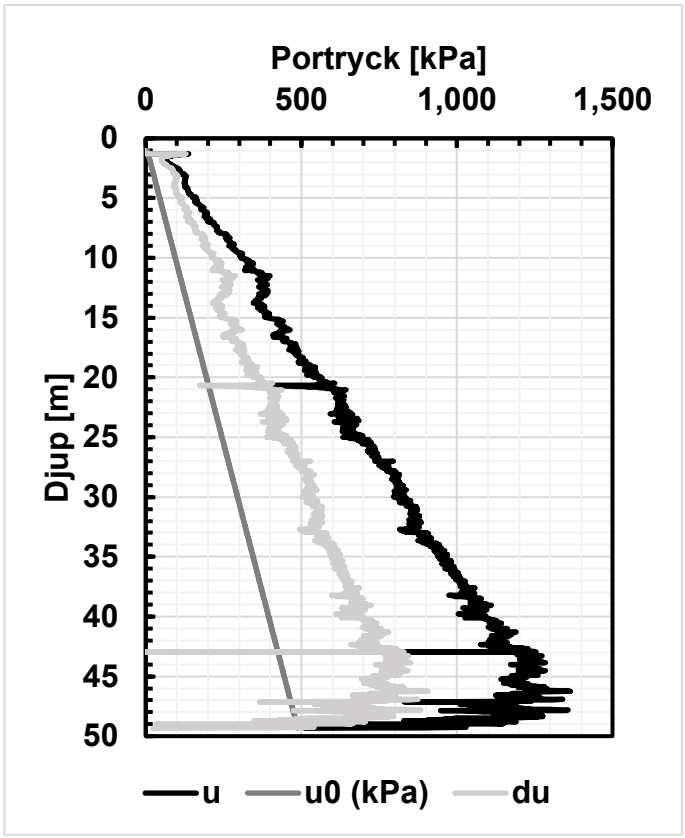
Vermeer, P., & Neher, H. (1999). A soft soil model that accounts for creep. *University of Stuttgart*. http://www.dl.edi-info.ir/A%20soft%20soil%20model%20that%20acounts%20for%20creep.pdf

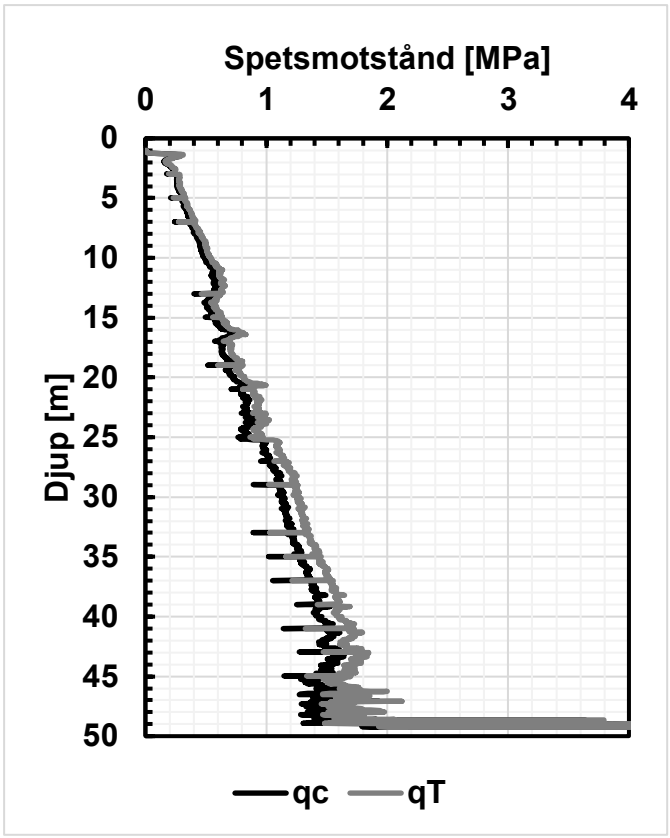
Bilaga 1

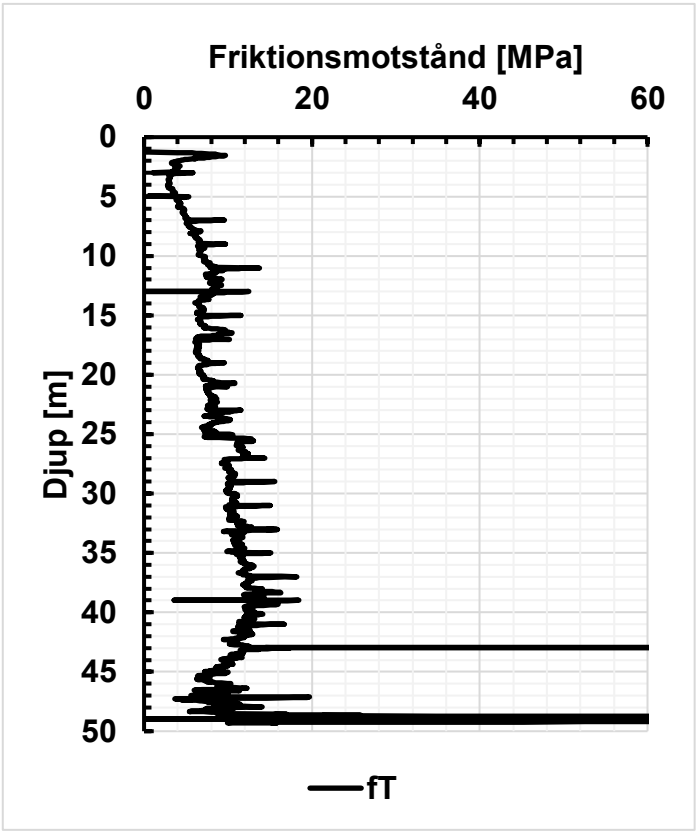

Densitet [kg/m3]
1,200
1,300
1,400
1,500
1,600
1,700
1,800
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
CRS Provbank Kärra 8.2
CRS exceler
IL test 2-6m Matest_241010
IL_Provbank Kärra 8.2 Sammanställning


Vattenkvot [%]
25
35
45
55
65
75
85
95
105
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
IL test 2-6m Matest_241010
CRS Provbank Kärra 8.2
IL_Provbank Kärra 8.2 Sammanställning
CRS exceler

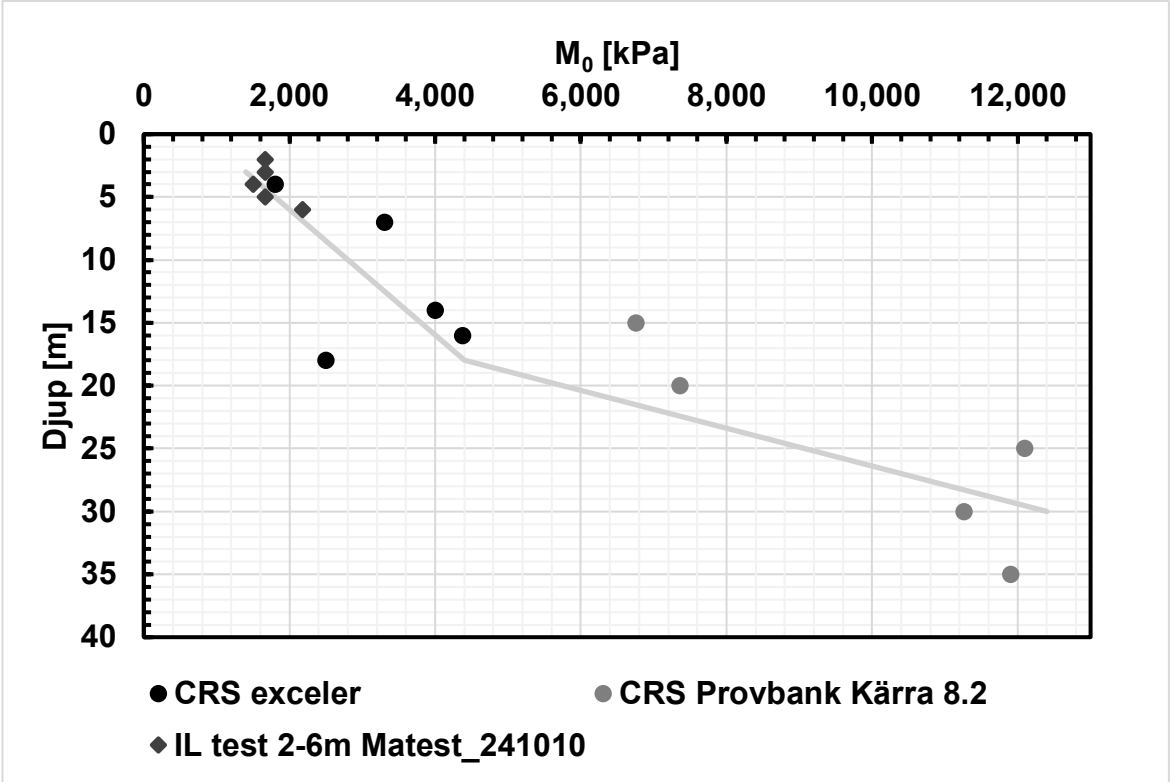
Bilaga 2

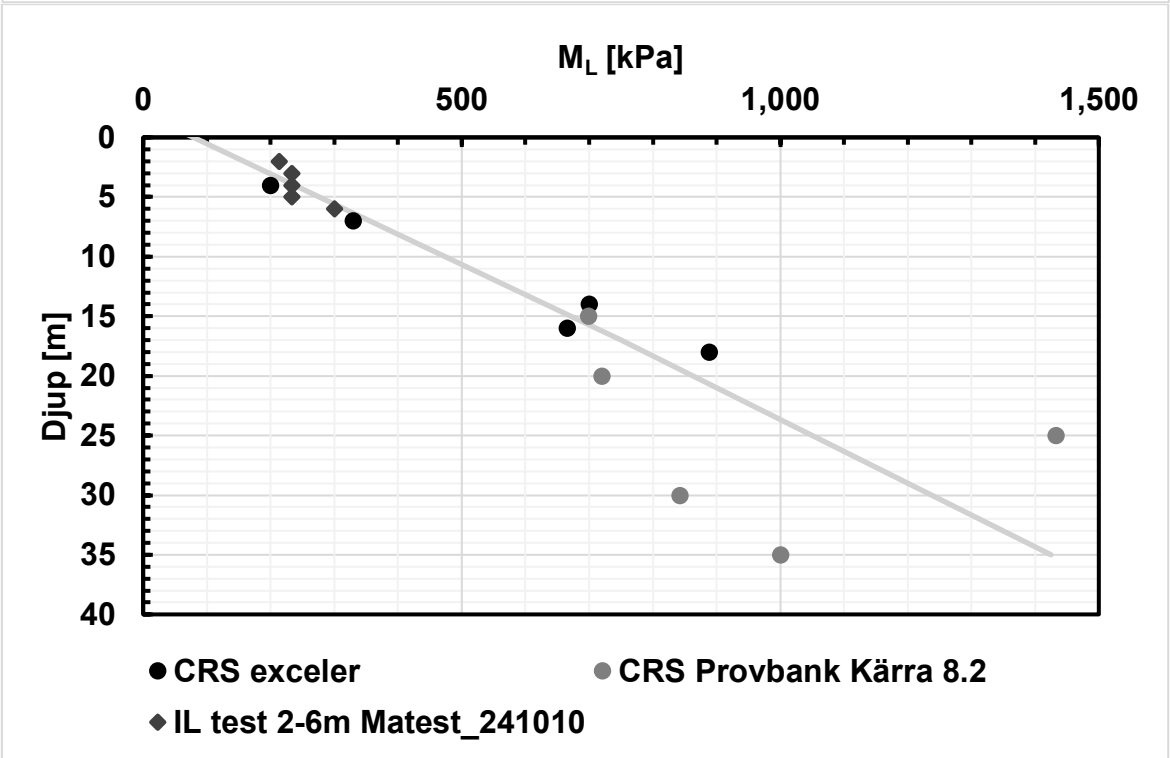

Portryck [kPa]
0
500
1,000
1,500
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
u
u0 (kPa)
du

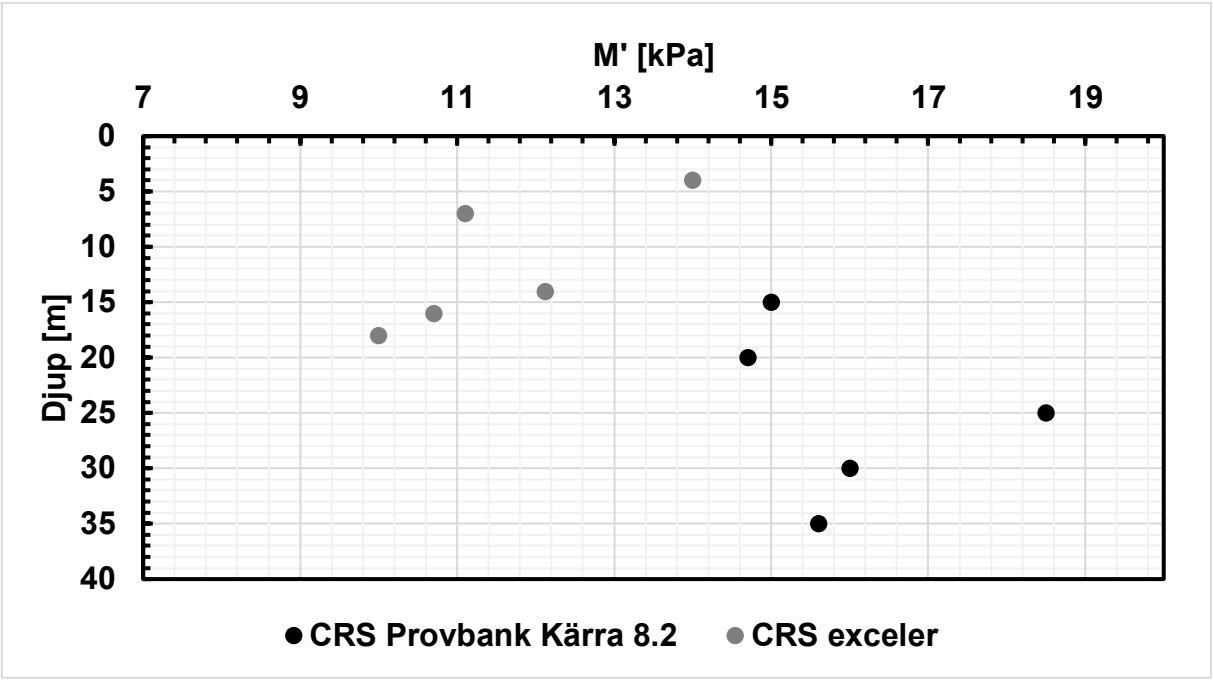

Spetsmotstånd [MPa]
0
1
2
3
4
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
qc
qT

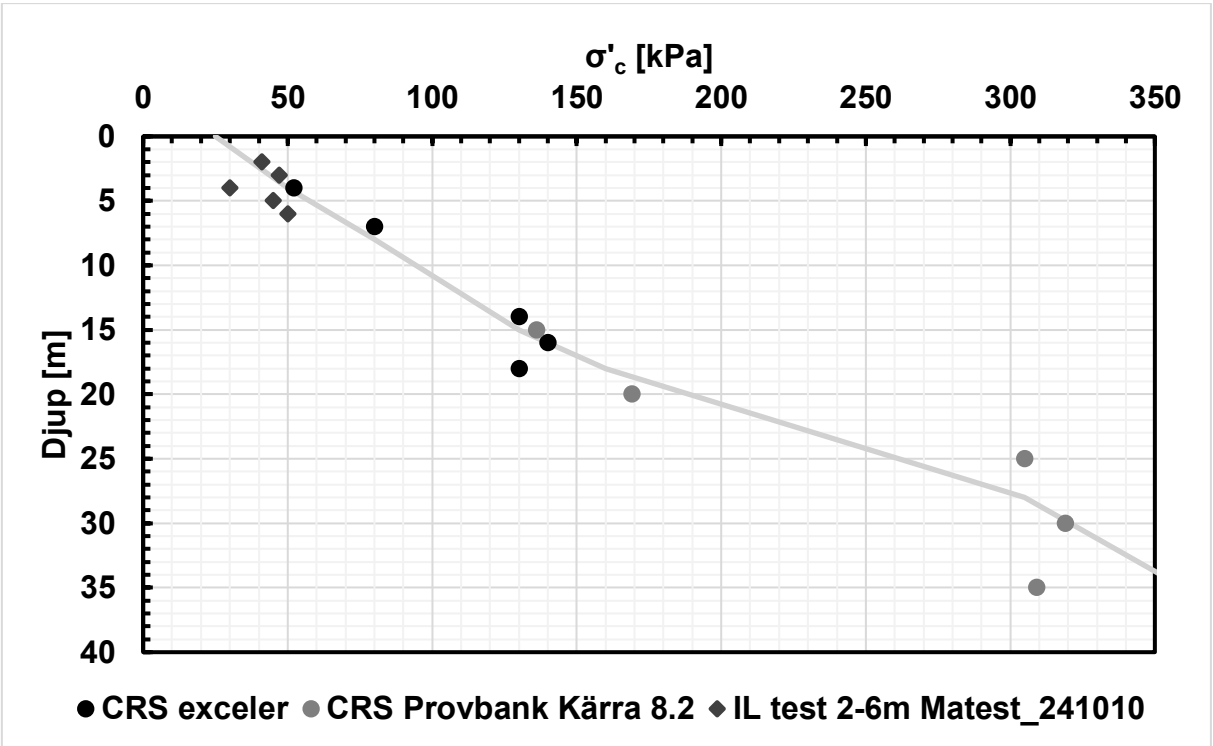

Friktionsmotstånd [MPa]
0
20
40
60
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
fT

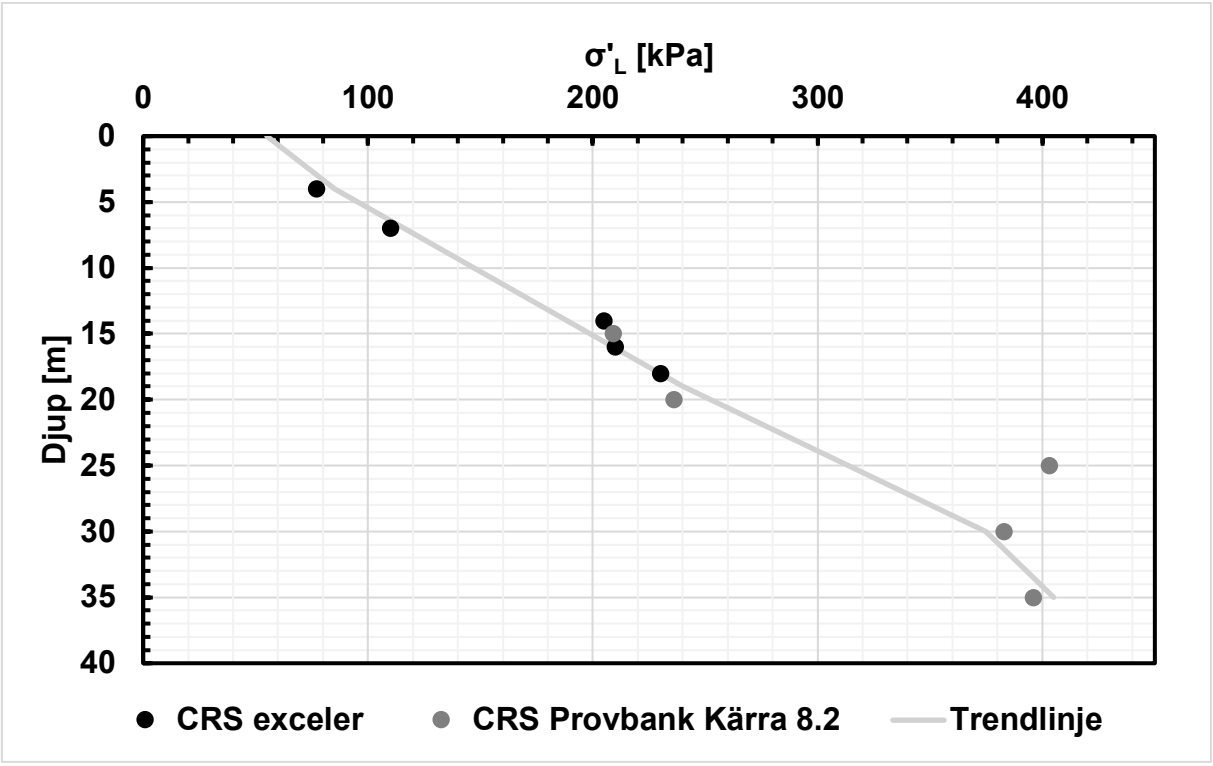
Bilaga 3

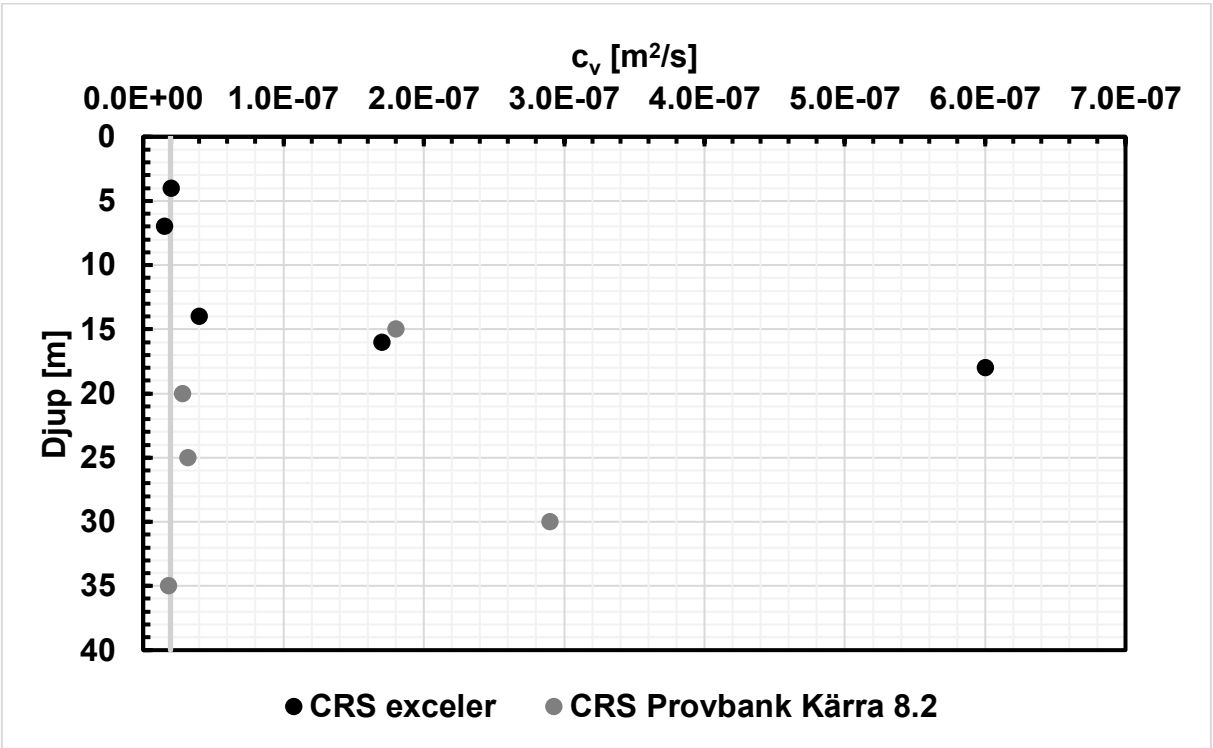

M_0 [kPa]
0
2,000
4,000
6,000
8,000
10,000
12,000
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
CRS exceler
CRS Provbank Kärra 8.2
IL test 2-6m Matest_241010

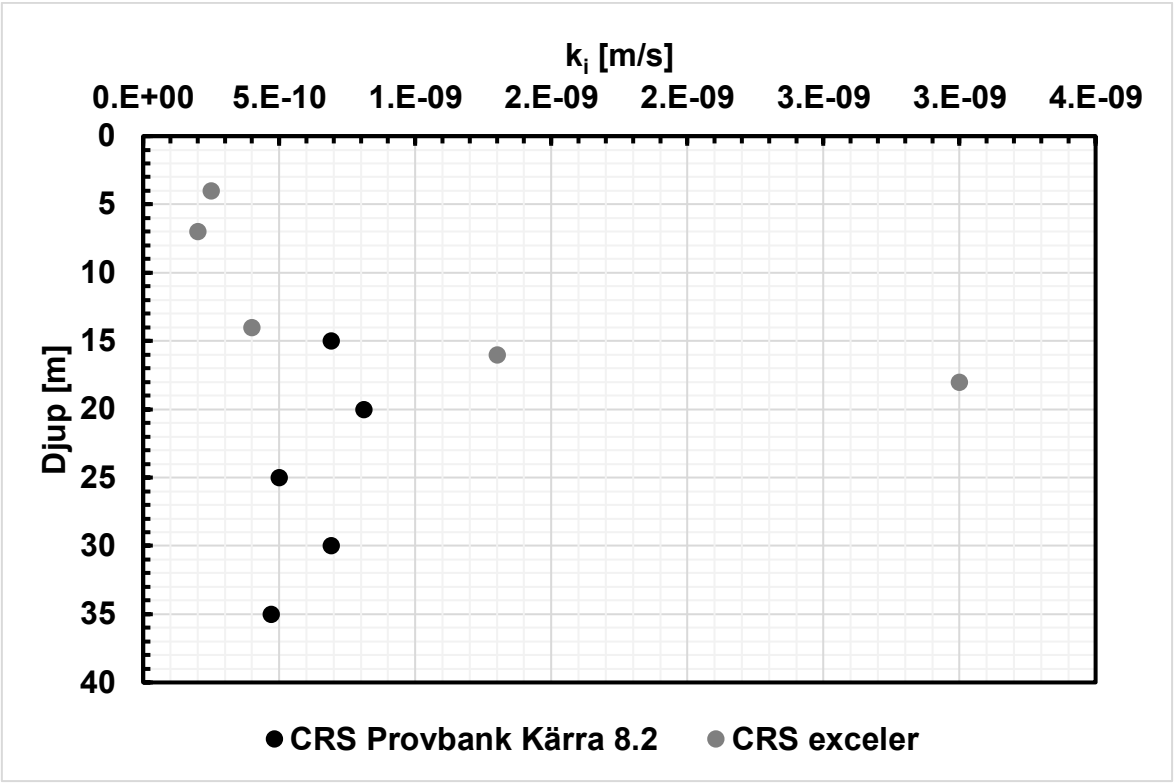

M_L [kPa]
0
500
1,000
1,500
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
CRS exceler
CRS Provbank Kärra 8.2
IL test 2-6m Matest_241010


M' [kPa]
7
9
11
13
15
17
19
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
CRS Provbank Kärra 8.2
CRS exceler


σ'c [kPa]
0
50
100
150
200
250
300
350
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
CRS exceler
CRS Provbank Kärra 8.2
IL test 2-6m Matest_241010

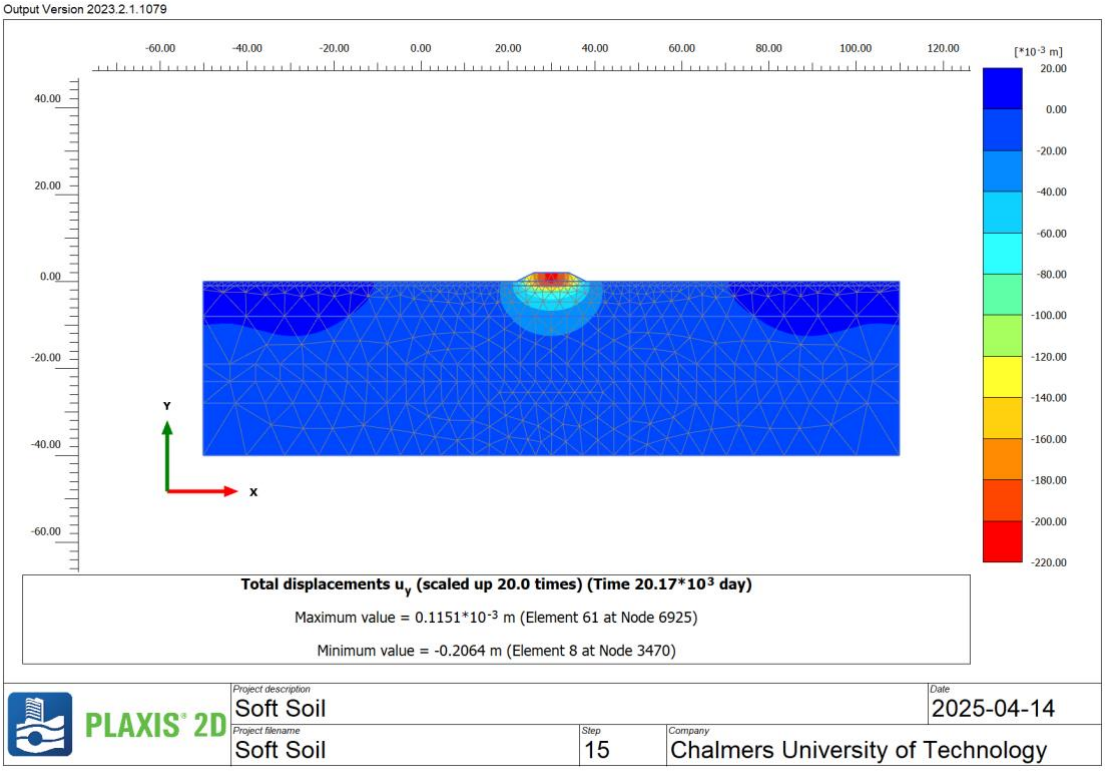

σ'L [kPa]
0
100
200
300
400
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
CRS exceler
CRS Provbank Kärra 8.2
Trendlinje


cv [m²/s]
0.0E+00
1.0E-07
2.0E-07
3.0E-07
4.0E-07
5.0E-07
6.0E-07
7.0E-07
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
CRS exceler
CRS Provbank Kärra 8.2

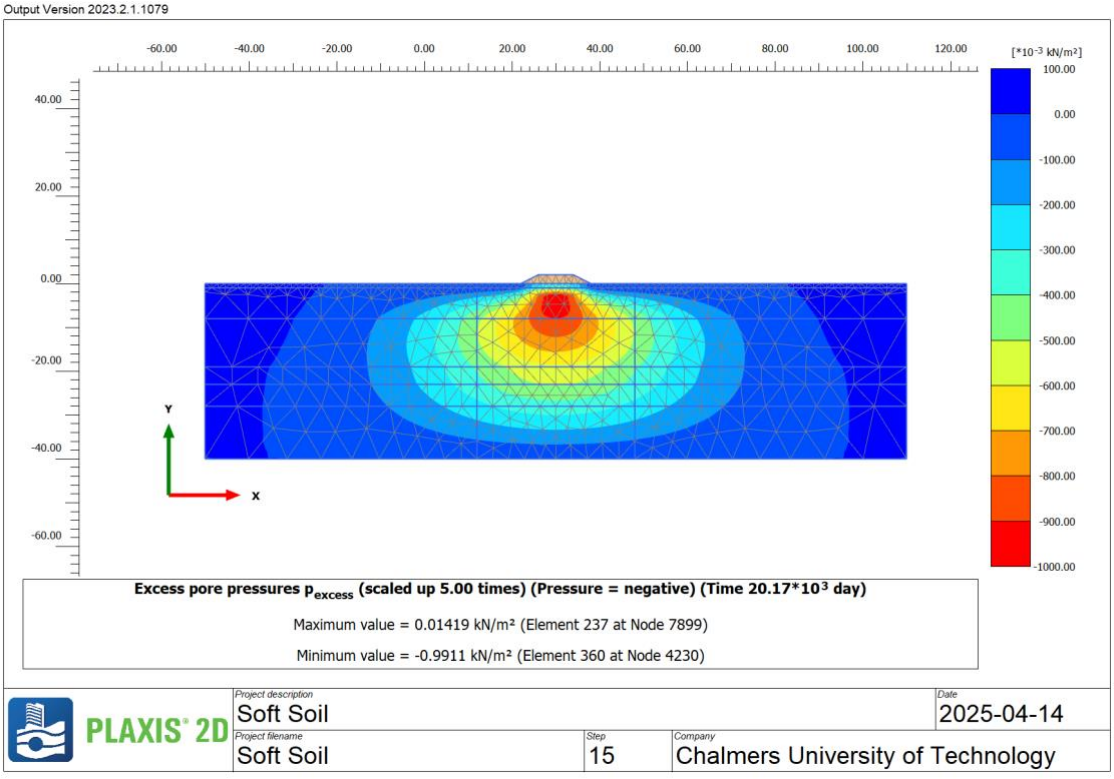

k_i [m/s]
0.E+00
5.E-10
1.E-09
2.E-09
2.E-09
3.E-09
3.E-09
4.E-09
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
CRS Provbank Kärra 8.2
CRS exceler

Bilaga 4

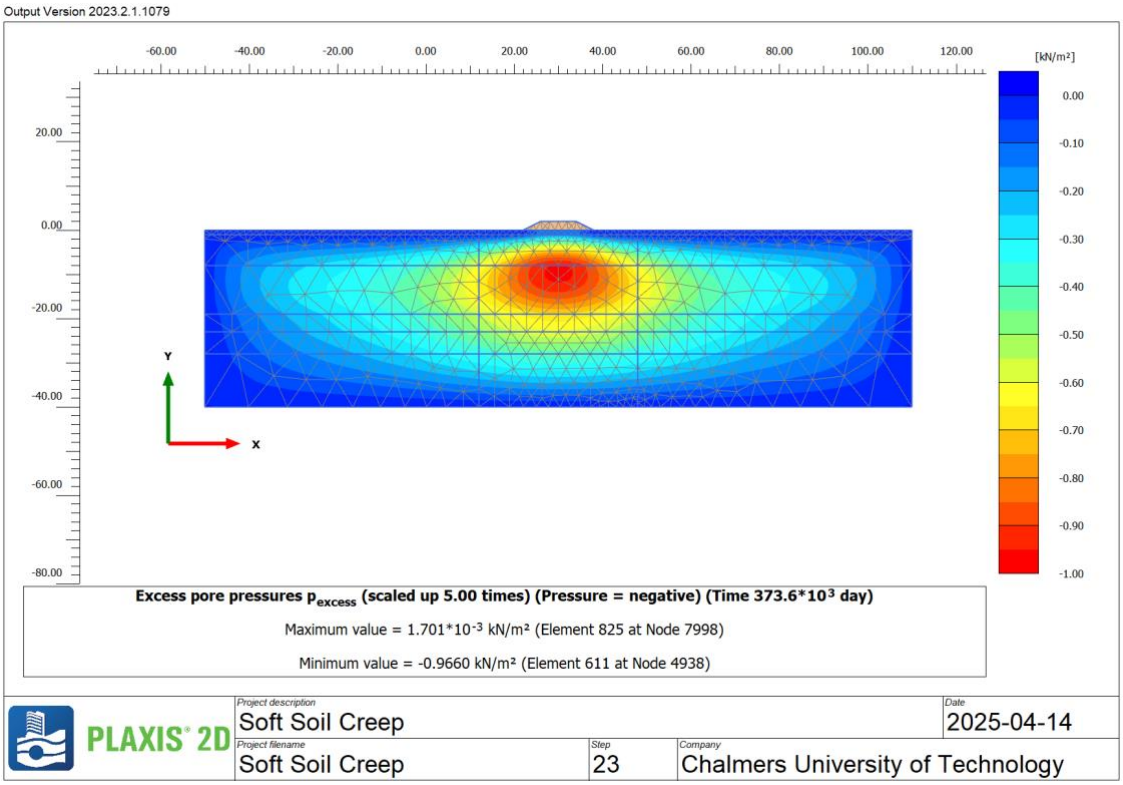
Output Version 2023.2.1.1079

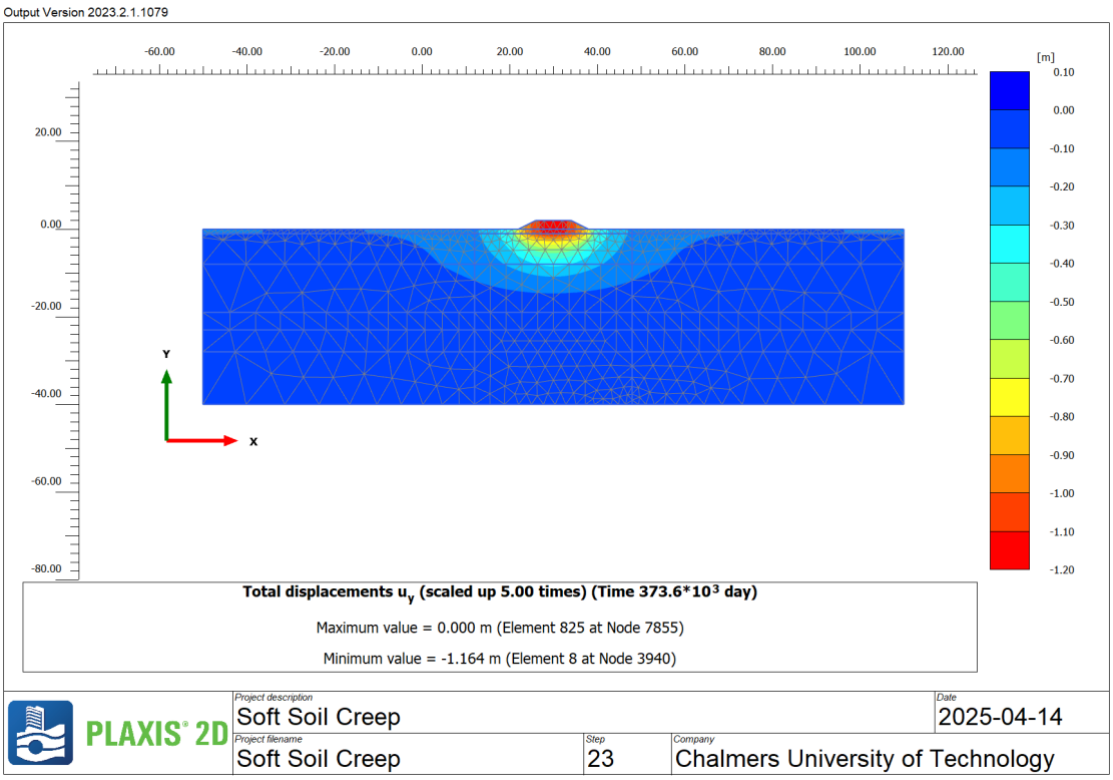


Output Version 2023.2.1.1079

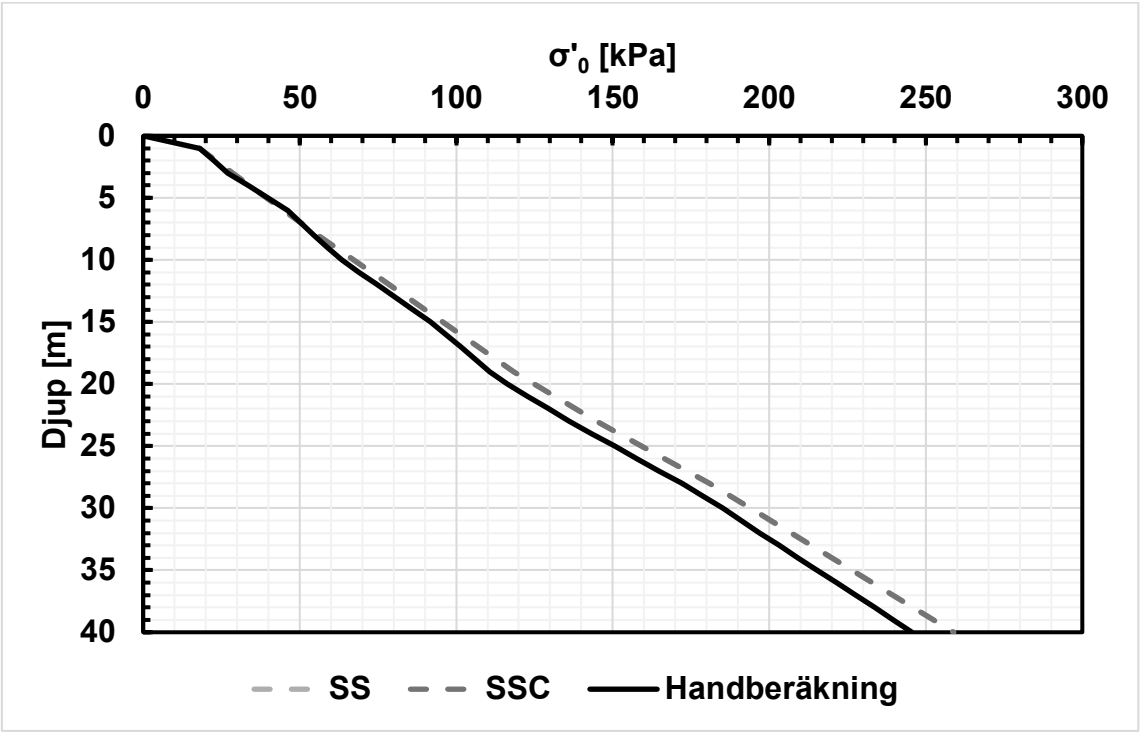


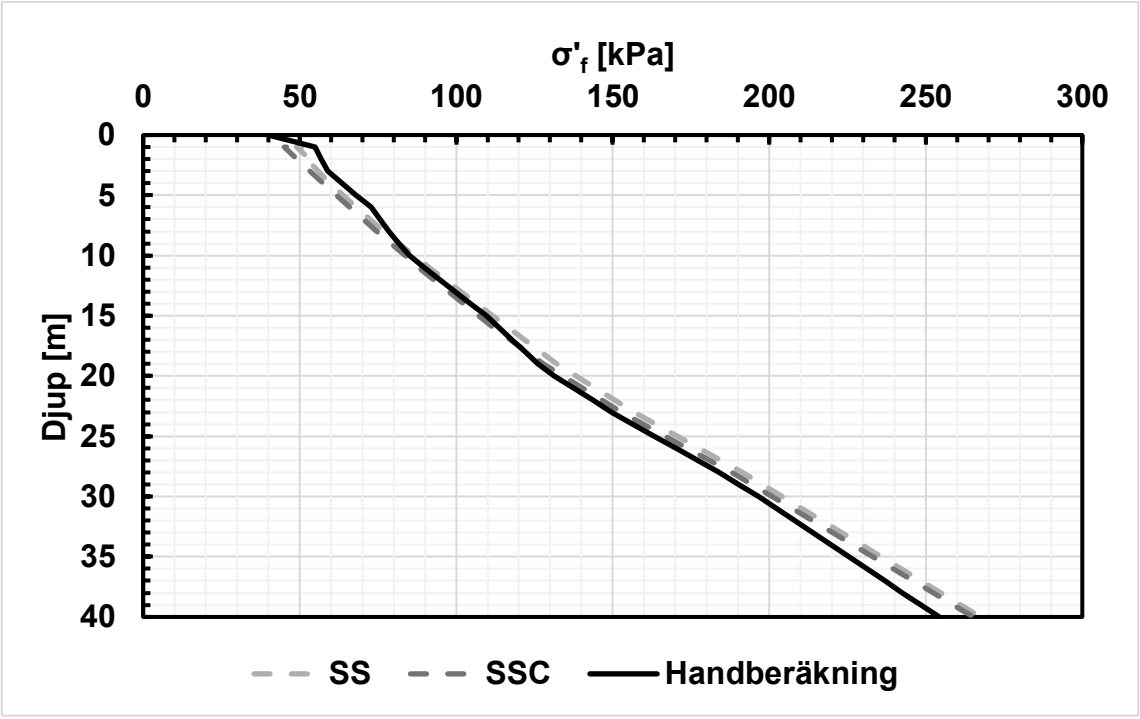
Bilaga 5

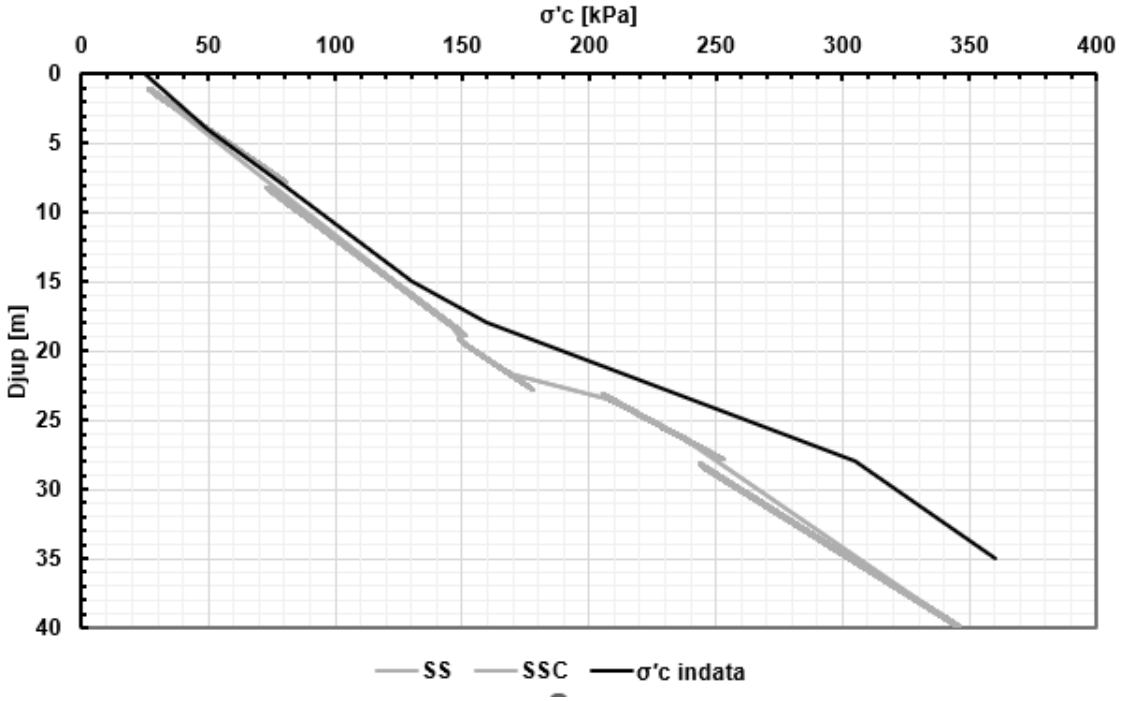

Output Version 2023.2.1.1079
-60.00 -40.00 -20.00 0.00 20.00 40.00 60.00 80.00 100.00 120.00
[kN/m²]
0.00
-0.10
-0.20
-0.30
-0.40
-0.50
-0.60
-0.70
-0.80
-0.90
-1.00
20.00
0.00
-20.00
-40.00
-60.00
-80.00
Y
X
Excess pore pressures p_excess (scaled up 5.00 times) (Pressure = negative) (Time 373.6*10³ day)
Maximum value = 1.701*10⁻³ kN/m² (Element 825 at Node 7998)
Minimum value = -0.9660 kN/m² (Element 611 at Node 4938)
PLAXIS 2D
Project description
Soft Soil Creep
Date
2025-04-14
Project filename
Soft Soil Creep
Step
23
Company
Chalmers University of Technology


Output Version 2023.2.1.1079
-60.00 -40.00 -20.00 0.00 20.00 40.00 60.00 80.00 100.00 120.00
[m]
0.10
0.00
-0.10
-0.20
-0.30
-0.40
-0.50
-0.60
-0.70
-0.80
-0.90
-1.00
-1.10
-1.20
20.00
0.00
-20.00
-40.00
-60.00
-80.00
Y
X
Total displacements u_y (scaled up 5.00 times) (Time 373.6*10³ day)
Maximum value = 0.000 m (Element 825 at Node 7855)
Minimum value = -1.164 m (Element 8 at Node 3940)
PLAXIS 2D
Project description
Soft Soil Creep
Date
2025-04-14
Project filename
Soft Soil Creep
Step
23
Company
Chalmers University of Technology

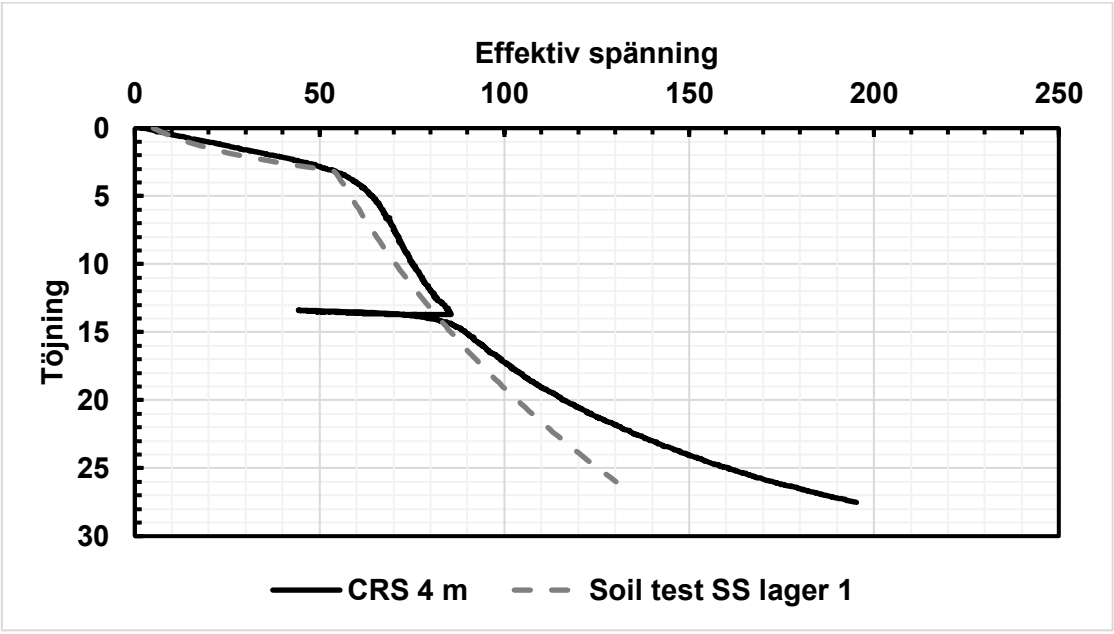
Bilaga 6

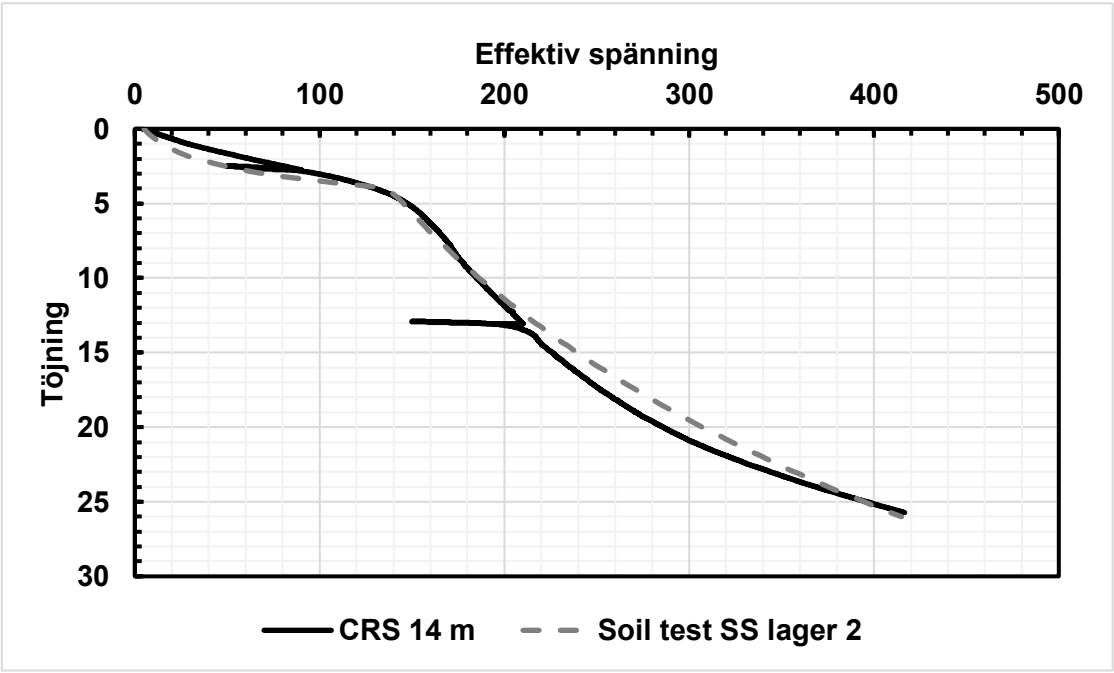

σ'0 [kPa]
0
50
100
150
200
250
300
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
SS
SSC
Handberäkning

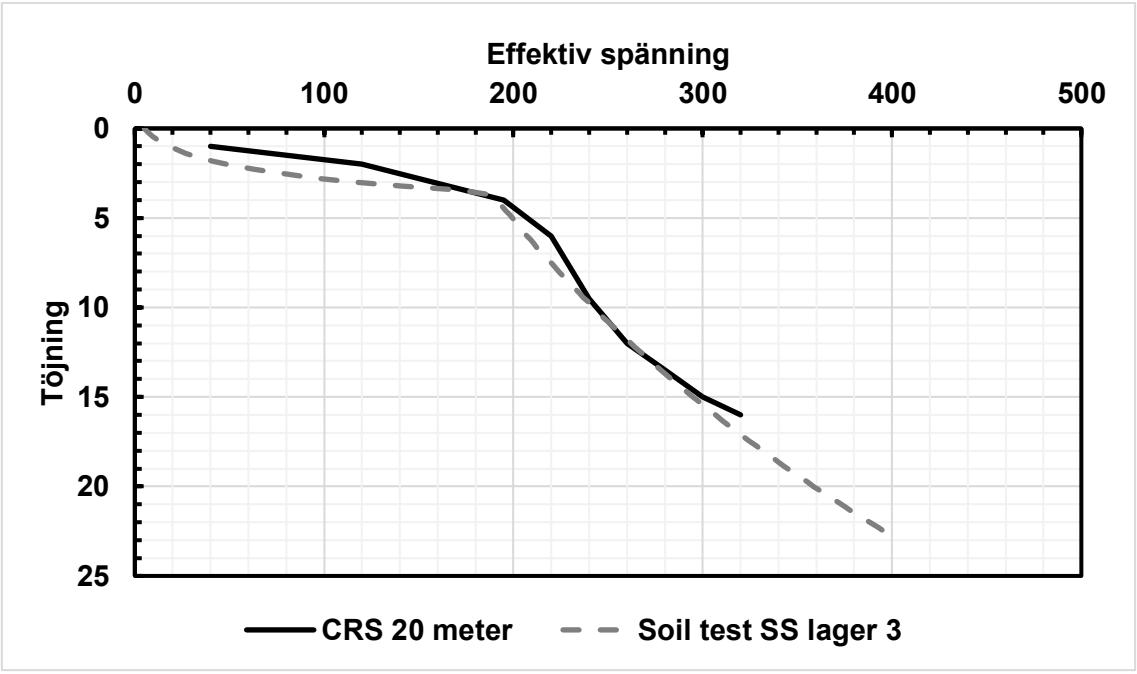

σ'f [kPa]
0
50
100
150
200
250
300
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
SS
SSC
Handberäkning

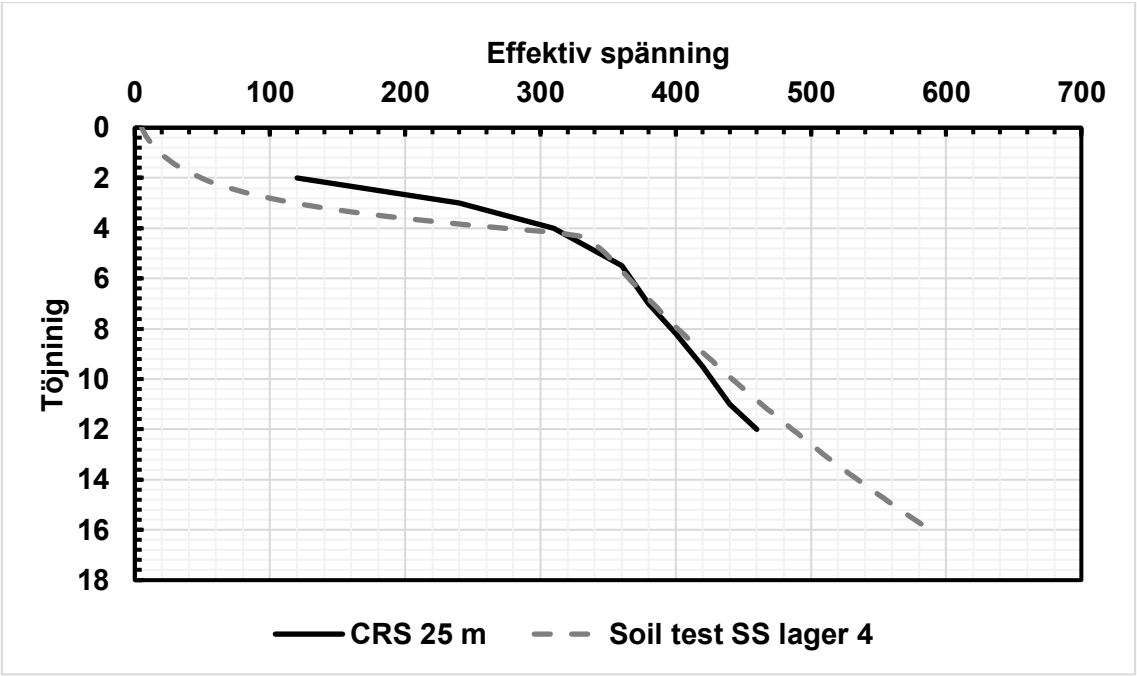

σ'c [kPa]
0
50
100
150
200
250
300
350
400
Djup [m]
0
5
10
15
20
25
30
35
40
SS
SSC
σ'c indata

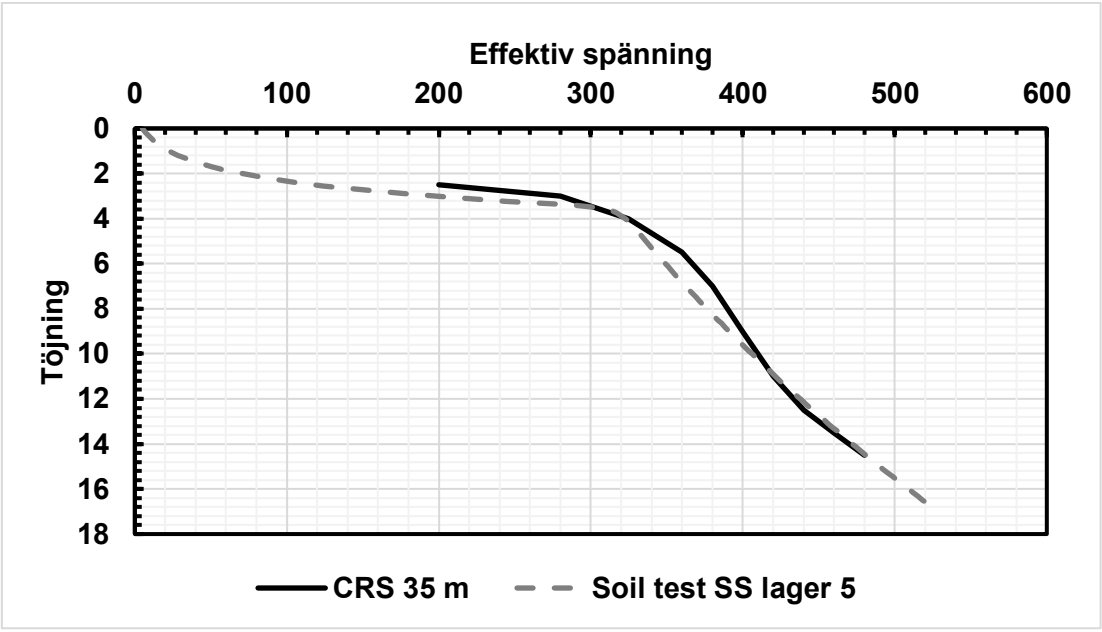
Bilaga 7


Effektiv spänning
0
50
100
150
200
250
Töjning
0
5
10
15
20
25
30
CRS 4 m
Soil test SS lager 1

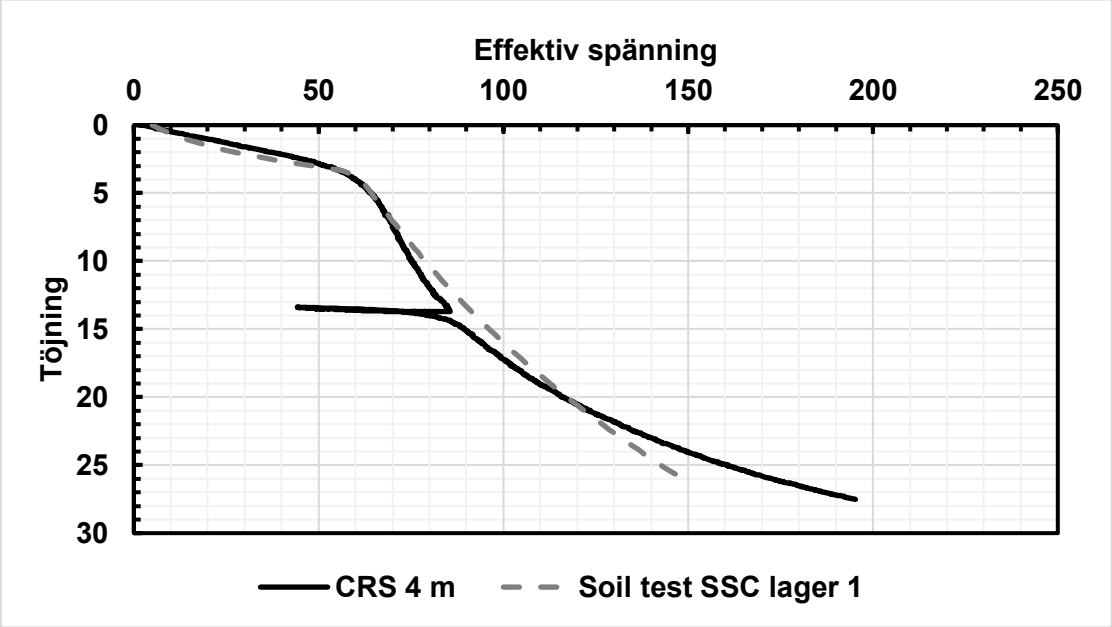

Effektiv spänning
0
100
200
300
400
500
Töjning
0
5
10
15
20
25
30
CRS 14 m
Soil test SS lager 2

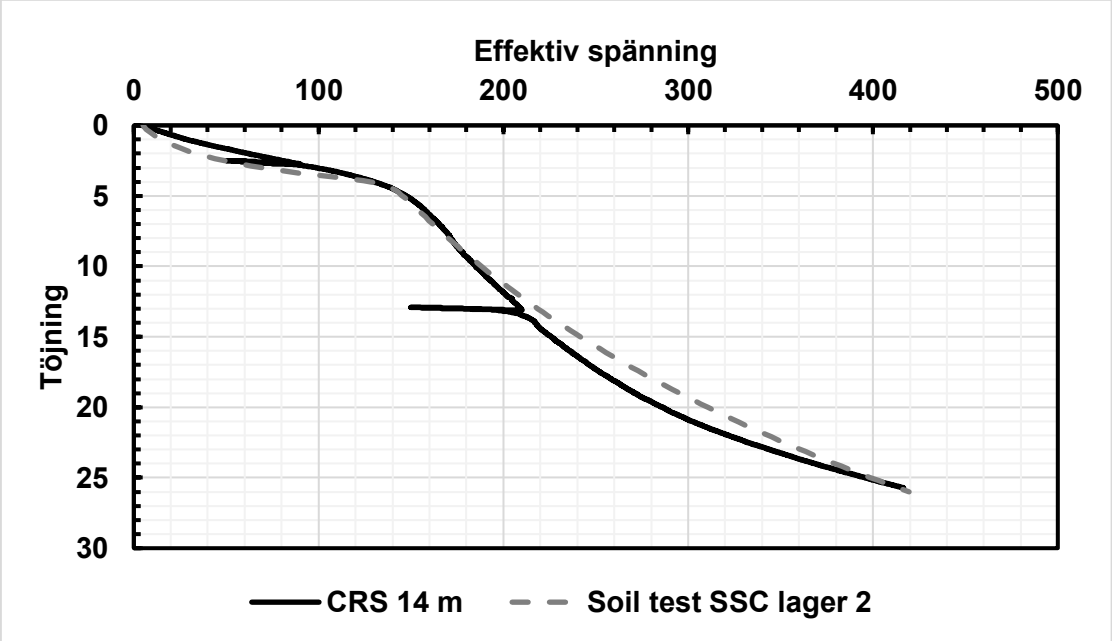

Effektiv spänning
0
100
200
300
400
500
Töjning
0
5
10
15
20
25
CRS 20 meter
Soil test SS lager 3

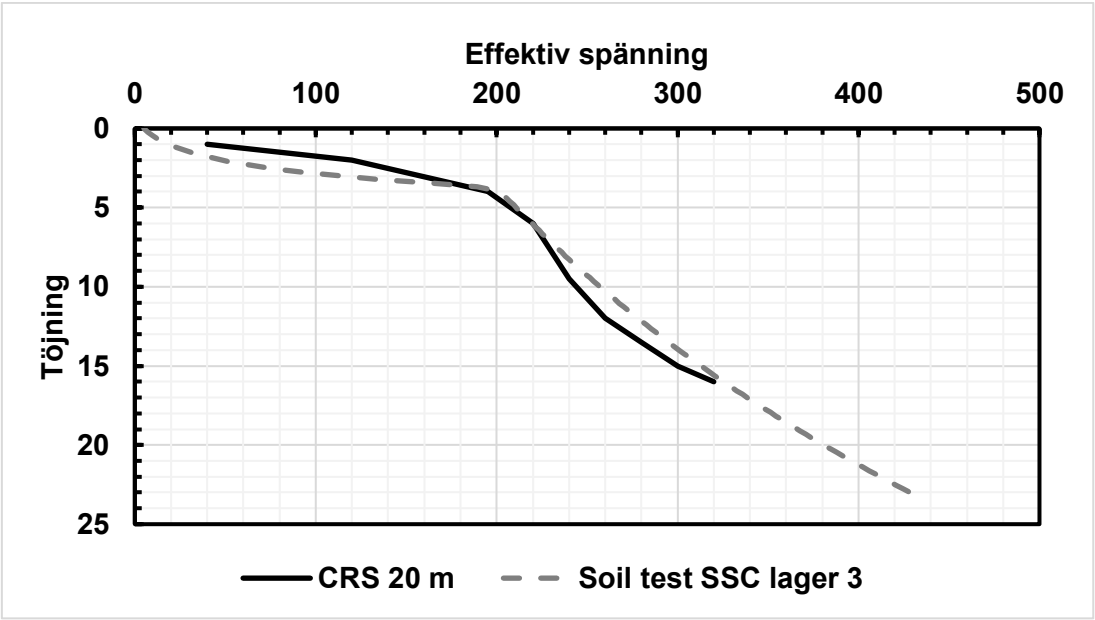

Effektiv spänning
0
100
200
300
400
500
600
700
Töjninig
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
CRS 25 m
Soil test SS lager 4

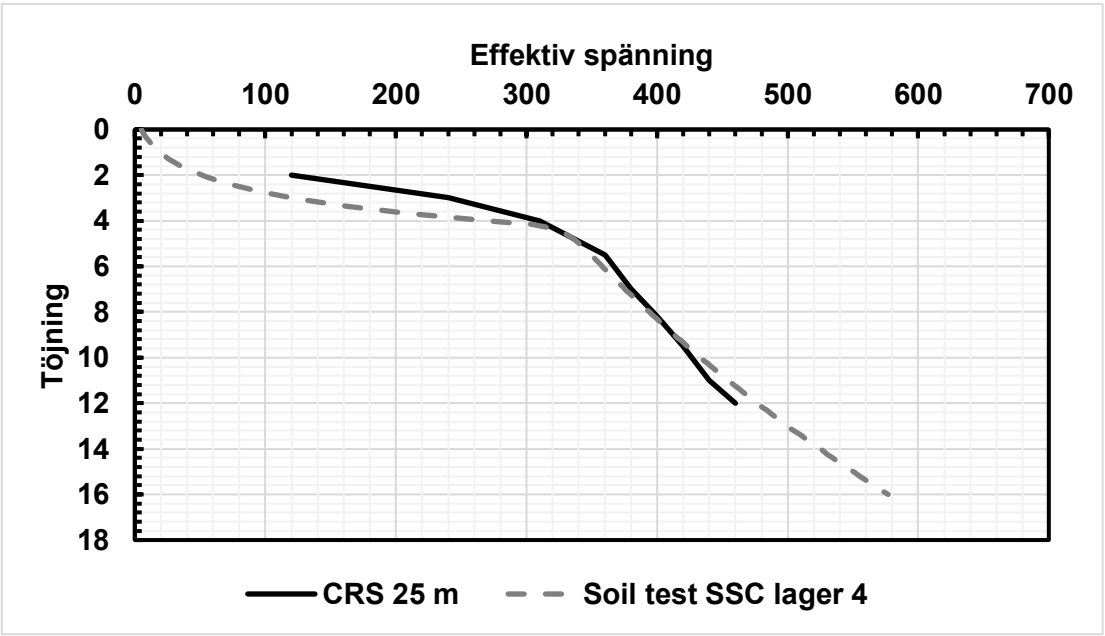

Effektiv spänning
0
100
200
300
400
500
600
Töjning
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
CRS 35 m
Soil test SS lager 5

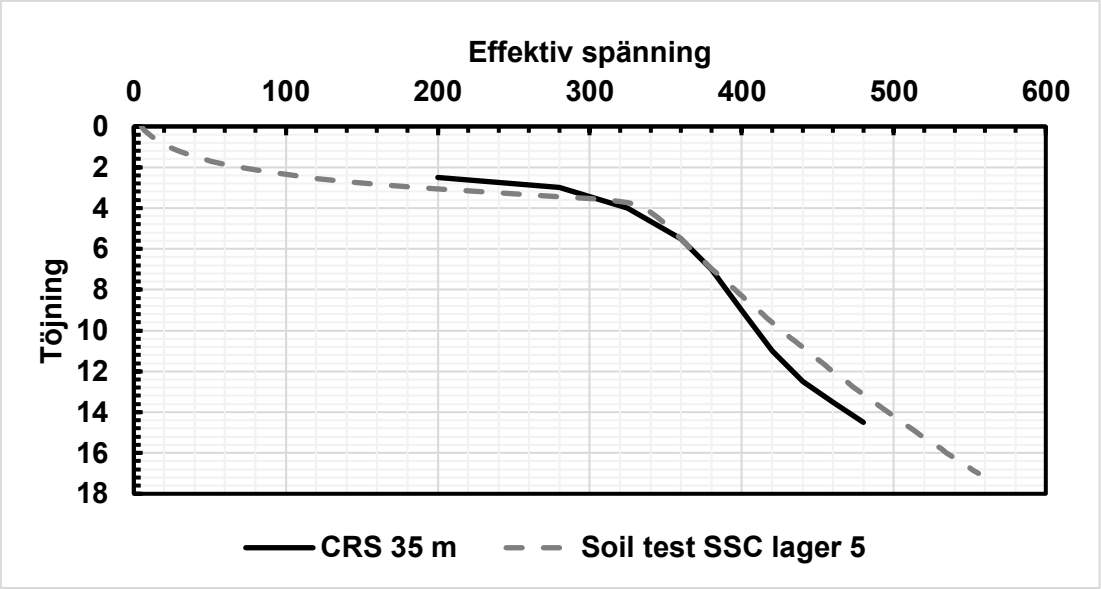
Bilaga 8


Effektiv spänning
0
50
100
150
200
250
Töjning
0
5
10
15
20
25
30
CRS 4 m
Soil test SSC lager 1


Effektiv spänning
0
100
200
300
400
500
Töjning
0
5
10
15
20
25
30
CRS 14 m
Soil test SSC lager 2


Effektiv spänning
0
100
200
300
400
500
Töjning
0
5
10
15
20
25
CRS 20 m
Soil test SSC lager 3


Effektiv spänning
0
100
200
300
400
500
600
700
Töjning
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
CRS 25 m
Soil test SSC lager 4


Effektiv spänning
0
100
200
300
400
500
600
Töjning
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
CRS 35 m
Soil test SSC lager 5

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se

CHALMERS