CHALMERS

Sättningsberäkningar i lös lera

En jämförelse mellan handberäkningar och numeriska modeller

Mustafa Amira
Ahmad Dawood
Nada Jarbou

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHLLSBYGGNADSTEKNIK

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

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

CHALMERS

SAMMANFATTNING

Behovet av att bygga nya konstruktioner ökar ständigt och blir mer utmanande i de områden som har dåliga markförhållanden. Ett exempel på detta är områden med lösa leror, för att leror är kända för att vara högkompressibla och känsliga för krypning över tid. Detta gör att noggranna sättningsprognoser är avgörande för att kunna bygga säkert och stabilt.

Datorprogram har blivit ett viktigt hjälpmedel i de geotekniska beräkningarna och ger snabba och detaljerade analyser. Ett av dessa program är PLAXIS 2D som bygger på finita elementmetoden och innehåller bra varianter av beräkningsmodeller.

Syftet med detta kandidatarbete är att öka förståelse för krypsättningar i lösa leror samt att jämföra resultaten från olika beräkningsmodeller med de uppmätta resultaten. Arbetet undersöker också påverkan av parameterjustering på den slutliga resultaten. Sättningsberäkningar har genomförts för den odränerade provfyllningen i området Lilla Mellösa utanför Upplands Väsby, med hänsyn till båda primära och sekundära konsolideringar.

Beräkningen har genomförts med tre olika materialmodeller. Vilka är Soft Soil Creep-modell (SSC) och Soft Soil-modell (SS) i PLAXIS, samt en handberäkningsmodell. De erhållna resultaten jämförs sedan med de verkliga fältresultaten som Statens geotekniska institut (SGI) observerade och rapporterade sedan år 1947.

Resultatet visar att de modeller som tar hänsyn till sekundärkonsolidering visar högre korrelation med de uppmätta resultaten än modeller som inte tar hänsyn till sekundär konsolidering. Vidare märks det att tunghet och förkonsolideringsstryck är de mest påverkande parametrar, där en ökning av tunghet och minskning av förkonsolideringstrycket förbättrar överensstämmelsen med verkligheten.

En slutsats som kan dras av detta arbete är att samtliga modeller är känsliga för variationer i geotekniska parametrar, särskilt när det gäller krypparametrar i SSC-modellen. SSC-modell i PLAXIS gav de resultat som låg närmast de verkliga mätningarna, vilket tyder på att denna modell är särskilt lämplig för Sättningsberäkningar i lösa leror.

Innehåll

Beteckningar 6
1 Inledning 8
1.1 Bakgrund: 8
1.2 Syfte och mål 8
1.3 Genomförande 9
2 Geologin hos de finkorniga jordarterna 10
2.1 Inlandsis 10
2.2 Glaciala leror och varvig lera 10
2.3 Postglacial Lera 10
3 Deformationsegenskaper 11
3.1 Spänningar och portryck 11
3.1.1 Spänningshistoria 11
3.1.2 Effektivspänning och portryck 11
3.1.3 Tillskottsspänningar (2:1-metoden) 12
3.2 Ödometerförsök 13
3.2.1 Allmänt 13
3.2.2 Stegvis belastning 13
3.2.3 CRS-försök 14
3.3 Konsolidering/tidsberoendesättningar 15
3.3.1 Allmänt 15
3.3.2 Konsolideringstyper 15
3.3.3 Terzaghis konsolideringsekvationer och teorier 16
3.3.4 Sekundärkonsolidering och krypning 17
3.3.5 Tidsmotståndet 18
3.4 Elasticitetsteorin 19
3.5 Mohr-Coulomb 20
3.6 Materialmodeller 21
3.6.1 Soft Soil - modell 21
3.6.2 Soft Soil Creep-modellen 22
3.6.3 Grundläggande egenskaper hos SSC-modellen 22
3.6.4 Endimensionell krypmodell 22
3.6.5 Tredimensionell krypmodell 23
4 Fältförsök i Lilla Mellösa 25
4.1 Allmänt 25

4.2 Jordförhållanden i Lilla Mellösa ... 26
4.3 Uppmätta porövertryck och sättningar för den odränerade fyllningen ... 27
5 Parametrar för sättningsberäkningar ... 29
5.1 Inledning ... 29
5.2 Modellparametrar ... 29
5.2.1 Jordens Tunghet ... 29
5.2.2 Tillskottsspänningen ... 29
5.2.3 Permeabilitet ... 30
5.2.4 Portryck ... 30
5.3 CRS-Försök ... 31
5.3.1 Förkonsolideringstrycket i Lilla Mellösa ... 31
5.3.2 kompressionsmodul i Lilla Mellösa ... 31
5.3.3 Krypparametrar i Lilla Mellösa ... 32
5.4 Materialparametrar för Soft Soil Creep-modellen ... 33
5.5 Styvhetsparametrar ... 33
5.5.1 Kompressionsindex Cc och svällningsindex Cs ... 33
5.5.2 sekundärt kompressionsindex $C \propto$ ... 34
6 Parameterjusteringar ... 35
6.1 Allmänt ... 35
6.2 Parametrar som ska justeras ... 35
6.2.1 Tungheter ... 35
6.2.2 Förkonsolideringstryck ... 36
7 Plaxis ... 37
7.1 Allmänt ... 37
7.2 simulering av CRS-försök i Plaxis ... 37
7.3 Uppbyggnad av Plaxis-modellen ... 37
7.3.1 modellgeometri och randvillkor ... 37
7.3.2 skiktindelningen och materialegenskaper ... 38
7.3.3 konstruktionsfaser ... 40
7.3.4 Mesh och inställning ... 40
8 Resultat ... 41
8.1 Resultat för handberäkningar ... 41
8.2 Resultat för Plaxis ... 42
8.2.1 Porövertrycks jämförelse plaxis ... 44
8.3 Resultat - handberäkning ... 45
9 Diskussion ... 46
9.1 modellernas noggrannhet ... 46

9.2 Handberäkning jämförts med numeriska modellering 46
9.3 modellbegränsningar 47
9.4 uppmätta data 47
10 slutsatser 48
Referenser 49

Beteckningar

$\propto_s$ koefficienten för sekundär kompression
M Kompressionsmodul, Ödometermodul
M_0 Ödometermodul i överkonsoliderat tillstånd
σ Totalt tryck
σ' Effektivt tryck
u Portryck
σ'_v Effektivt vertikalt tryck
σ'_h Effektivt horisontellt tryck
σ'_v Förkonsolideringstryck
σ'_o Ursprungligt effektivt tryck
σ'_L Gränstryck
γ Skrymtunghet
W Vattenkvot
k Permeabilitet
c_v Konsolideringskoefficient
T_v Tidsfaktor
U_v Medelkonsolideringsgrad
r, r_s Krypmotståndstalet
t Tid
z Djup
γ_w Vattens tunghet
P Axialkraft
A Tvärsnittarea
δl deformation
l provets ursprungliga längd
q Total volymflöde (Darcy)
K Hydraulisk konduktivitet
i Hydraulisk gradient
$\Delta\sigma_z$ Tillskottsspänning (2–1 metoden)
t´ Tid sedan belastningen lades på
τ_c Referenstid
C (μ) Krypparameter
P´ aktuell medeleffektivspänning
P´o tidigare effektiv medelspänning
λ∗ Kompressabilitet vid primär belastning
κ∗ Kompressabilitet vid återlastning
τ skjuvspänning
$C_\propto$ sekundärt kompressionsindex
σ'_c förkonsolideringsstryck
$\sigma'_{c,0}$ initialt förkonsolideringsstryck

e_0 initial portal
C_c Kompressionsindex
C_s Svällningsindex
c'_{ref} Effektiv kohesion
φ′ Friktionsvinkel
ψ Dilatansvinkel
μ* Modifierat krypindex
R Tidsmotstånd
SSC Soft Soil Creep-modellen
SS Soft Soil-modellen
ε deformation
c krypparameter

1 Inledning

1.1 Bakgrund:

Idag ökar behovet av byggnation och markanvändning på grund av en ökande befolkning och nya investeringar. Även markområden som har dåliga grundläggningsförhållanden, där lera utgör en stor del av jordprofilen, måste i många fall tas i bruk trots de utmaningarna för grundläggningsteknik.

Att bygga säkert innebär att genomföra de nödvändiga geotekniska beräkningar och analyser så noggrant som möjligt. Idag blev teknologin ett stort hjälpmedel vid detta, där moderna datorprogram har utvecklats för att snabbt och effektivt ge mer realistiska resultat av sättningsberäkning. Ett av dessa datorprogram som används i detta arbete är PLAXIS 2D som baseras på finita elementmetoder (FEM) och har olika beräkningsmodeller.

Marken som tidigare ansetts olämpliga för byggnation utgör idag en bra möjlighet för att genomföra fältundersökningar och observationer. Detta ger möjlighet att bättre förstå beteende av lösa leror över tiden. Ett exempel av de områdena med sådana markförhållande är Lilla Mellösa.

Lilla Mellösa är ett område som ligger utanför Stockholm. Där var Statens Geotekniska Institut (SGI) intresserade av att undersöka markförhållandena i syfte att hitta ett lämpligt område för att bygga en stor flygplats. Området i Lilla Mellösa karakteriseras av tjocka lager av lös lera med låg permeabilitet och tidsberoendekompressabilitet, vilket innebär att konsolidering och sättningar behöver beaktas.

SGI genomförde undersökningen i Lilla Mellösa genom att anlägga två provfyllningar. Den ena provfyllningen var dränerad, medan den andra provfyllningen var odränerad för att möjliggöra en jämförelse av konsolideringsprocessen. Resultaten av undersökningen visade att Lilla Mellösa inte var lämplig för att bygga flygplatsen, men området blev ett provfält för långtidsobservationer av sättningar i lös lera (Larsson, 2007).

1.2 Syfte och mål

Detta kandidatarbetes huvudsakliga syfte är att öka förståelsen för sättningar i lösa leror med hänsyn till krypning, samt att jämföra resultaten för sättningsberäkning från olika geotekniska beräkningsmodeller. Följande frågeställningar kommer att undersökas och besvaras:

- Hur påverkas resultaten i modellerna, vid handberäkning och i datorprogram, av justeringar i de geotekniska parametrarna?
- Hur skiljer sig modellernas resultat från uppmätta sättningar vid provfyllningen i Lilla Mellösa?

Målet med arbetet är att utvärdera noggrannheten hos datorprogrammet PLAXIS 2D och handberäkningsmodellen som använts, genom att observera hur resultatet påverkas av ändringen i parametrar, samt avgöra vilken modell som bäst överensstämmer med verkliga mätdata.

1.3 Genomförande

Detta kandidatarbete inleds med litteraturstudie om geologin hos lösa leror samt de grundläggande deformationsegenskaperna och teorier. Därefter beskrivs jordförhållande i Lilla Mellösa, hur undersökningen genomfördes där och vilka resultaten som erhölls.

Indata för båda handberäkningar och numeriska beräkningar i PLAXIS 2D hämtas från SIG-rapporten 29 (Larsson, 1986). Efter detta utförs parameterjusteringar och nya beräkningar genomförs med de nya parametrarna i både handberäkningsmodell och PLAXIS.

Utöver studier av PLAXIS-manualen har även flera instruktionsvideor på YouTube följts, då programmet använts för första gången. Slutligen presenteras resultaten från samtliga beräkningar och modeller, följt av en diskussion.

2 Geologin hos de finkorniga jordarterna

De finkorniga jordarter har en geologisk bakgrund som sträcker sig tillbaka till istiden. De bildades under olika förhållanden och tidpunkter, vilket har stor betydelse för deras egenskaper.

2.1 Inlandsis

Den senaste istiden började för ungefär 115 000 år sedan, och de sista is resterna smälte bort från norra Sverige för nästan 10 000 år sedan (SGU, 2020-a). Snö samlades under många år och omvandlades till inlandsisar (SGU, 2020-b). Enligt SGU (2020-a) låg Stora delar av Sverige under havsytan på grund av det enorma trycket från inlandsisen, men trycket minskade efter isavsmältningen vilket ledde till att landet som var under havsytan började höja sig. Denna process kallas för landhöjning. Jordarterna i Sverige har bildats antingen under istiden och då kallas de för glaciala jordarter eller efter isavsmältning och då kallas de för postglaciala jordarter (SGU, 2020-a).

2.2 Glaciala leror och varvig lera

Lera som avsattes i lugna och djupa vattenmiljöer under istiden benämns glacial lera (SGU, 2020c). I saltvatten sedimenterar finkorniga material som lera och silt med samma hastighet och bildar en relativt homogen och icke-varvig sedimentblandning (SGU, 2020c).
Varvig lera indikerar att sedimentationen skedde i en sötvattensmiljö. under vår och sommar sedimenterar silt först och bildar ett ljust skikt, medan lera sedimenterar senare under vintern och bildar ett mörkare skikt (SGU, 2020c). Enligt SGU (2020c) utgör dessa två skikt tillsammans det som kallas ett årsvarv.

2.3 Postglacial Lera

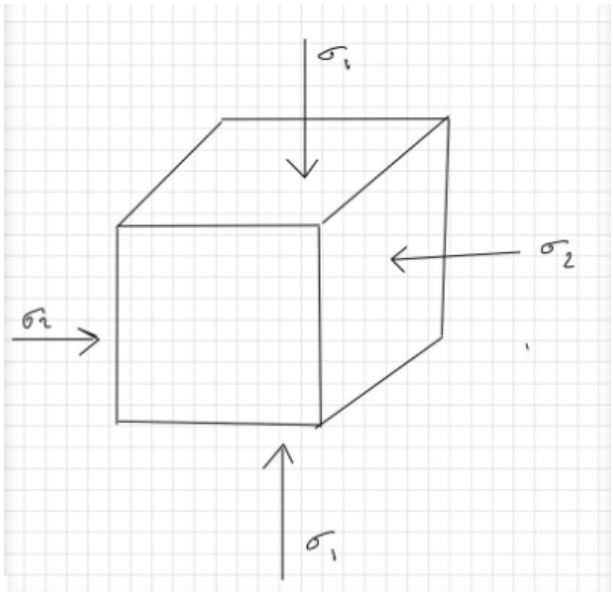
Postglacial Lera är lera som sedimenterade i djupa hav och sjöar efter istiden. Den kännetecknas av blåaktig färg och skiljer sig från glacial lera som har en ljusare färg (SGU, 2020d). De flesta postglaciala leror innehåller ingen kalk och saknar varvighet. Den yngre varianten, som kallas för lergyttja, innehåller ofta rester av de växter som levde och dog i vattnet (SGU, 2020d).
Enligt SGU (2020d) är de plana lerslätter i södra och mellersta Sverige tidigare bottnar som höjts upp på grund av landhöjningen efter istiden. Leran i dessa områden är en kombination av glacial och postglacial lera.

3 Deformationsegenskaper

3.1 Spänningar och portryck

3.1.1 Spänningshistoria

Jorden utsätts för olika spänningar som är orsakade av ovanliggande jordlager, samt vilka spänningar jorden historisk utsätts för. Dessa spänningar ökar med djupet och påverkar lerans deformationsegenskaper. Horisontell markyta har vertikala och horisontella huvudspänningar som är olika i storlek, oftast är spänningar i vertikal led större än de i horisontell led (Sällfors, 2013). Man kan se i figur 3.1 att (σ1) står för de vertikala spänningarna, medan (σ2) står för de horisontella spänningarna.



Figur 3.1: Vertikala och horisontella spänningar i jord

Den viktigaste spänningen som man måste beräkna är den vertikala spänningen (σ1), även känd som (σo) och beräknas som:

$$\sigma 0 = \sum_{i=l}^{N} g \cdot pi \cdot zi \quad = \quad \sum_{i=l}^{N} \gamma i \cdot zi \qquad (3.1)$$

3.1.2 Effektivspänning och portryck

Begreppet effektivspänning (σ`) är väl känd inom geoteknik, den styr jordens deformation, bärförmåga samt konsolidering. Effektivspänning (σ`) beskriver spänningen som bärs av kornskelettet (Sällfors, 2013). Den delas in i två grupper, horisontell effektivspänning samt vertikal effektivspänning.

Den vertikala effektivspänningen (σ`o) beräknas med formel:

$$\sigma 0 = \sigma`o + u \quad (3.2)$$

Den vertikala effektivspänning (σ`o) är relativt enkelt att beräkna, medan den horisontella effektivspänningen (σ`ho) är lite svårare då det inte finns något metod för dess bestämning, man använder i stället empiriska värde. Man kan beräkna förhållandet mellan den horisontella effektivspänningen (σ`ho) och den vertikala effektivspänning (σ`o) genom att beräkna vilojordstryckskoefficient (Ko) (Sällfors, 2013). Den beräknas som:

$$Ko = \frac{\sigma`ho}{\sigma´v0} \quad (3.3)$$

Där Ko varierar beroende på om leran är överkonsoliderat (OC) eller normalkonsoliderat (NC).

Portrycket kan variera beroende på om vattnet är i hydrostatiskt tillstånd eller hydrodynamiskt tillstånd. Vid hydrostatiskt tillstånd är vattnet i statiskt tillstånd i varje punkt, detta leder till att ingen strömning sker (Sällfors, 2013). Portrycket vid hydrostatiskt tillstånd beräknas med formel:

$$u = g \cdot p \cdot z = \gamma \cdot z \quad (3.4)$$

Vid pumpning och dränering kan vatten ändra sitt tillstånd från hydrostatisk till hydrodynamiskt, ju mer vattnets tillstånd blir hydrodynamiskt desto snabbare strömmar vattnet. När vattnet strömmar i jord kan det påverka kornen som i sin tur påverkar effektivspänningen (Sällfors, 2013). Vattenströmningen beräknas med Darcys lag:

$$q = k \cdot A \cdot i \quad (3.5)$$

3.1.3 Tillskottsspänningar (2:1-metoden)

Jorden utsätts ofta för yttre laster som kan bero på till exempel byggnader, ett enkelt sätt att beräkna förhand den spänningen som kommer från yttre lasten är 2:1-metoden. Denna metod antar att tillskotsspänningen sprids under lasten med 2:1 lutning (Sällfors, 2013). Vid en långsträckt belastning beräknas tillskottsspänningen med formel:

$$\Delta\sigma_z = \frac{b \cdot q}{(b+z)} \quad (3.6)$$

Medan tilläggsspänningen av ett rektangulärt fundament beräknas med formel:

$$\Delta\sigma_z = \frac{b \cdot q \cdot l}{(b+z) \cdot (l+z)} \quad (3.7)$$

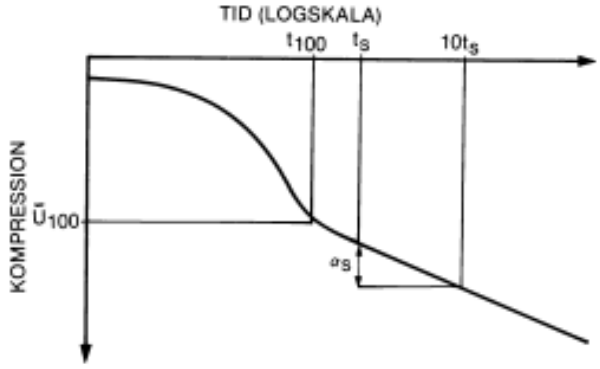
3.2 Ödometerförsök

3.2.1 Allmänt

Ödometerförsök används på ostörda prover av finkorniga jordar för att bestämma dess deformationsegenskaper, den är användbar för att undersöka hur lera reagerar på långsiktiga belastningar vid planering av byggnation. Ett prov placeras i en ring sedan belastas antingen stegvis eller pressas med konstant deformationshastighet (Larsson, 2008).

3.2.2 Stegvis belastning

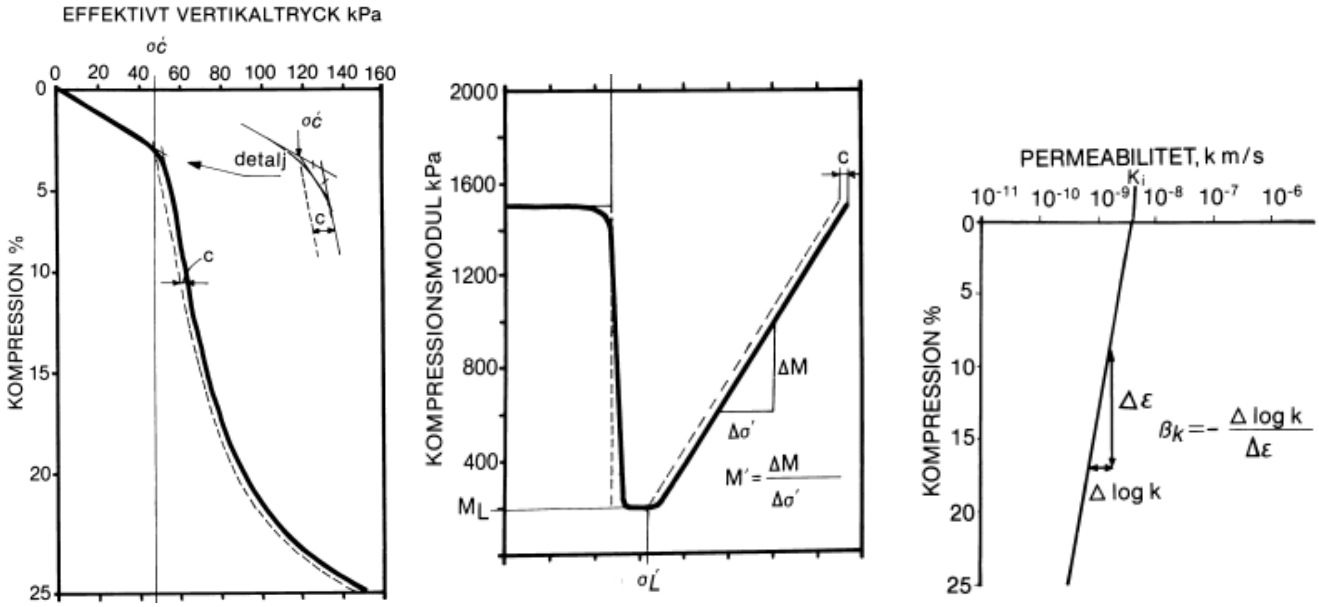
Vid detta försök påförs belastningen steg för steg, man fördubblar lasten varje dag så att varje last får verka en dag innan den fördubblas. Provet bör vara dubbelsidig dränerat vid detta försök. Vid varje belastningssteg mäts jordprovets deformation, i resultat får man två kurvor, tid-sättningskurva samt deformationskurvan. Deformationen plottas mot belastning i ett logaritmiskt diagram. Man kan få ut förkonsolideringstrycket genom att identifiera krökpunkten/brytpunkten i diagrammet, därefter dras en vertikal linje från där kurvan börjar avvika uppåt, skärningskurvan mellan dessa två linjer ger oss förkonsolideringsstryck, se figur 3.2 (Larsson, 2008).



Figur 3.2: Tid-sättningskurva för ett laststeg. (Larsson, 2008)

3.2.3 CRS-försök

CRS-försök som är även känd för Constant Rate of Strain är den vanligaste ödometerförsök som används i Sverige. Vid detta försök bör provet vara enkelsidig dränerat. Den går till genom att registrera påförd kraft, deformation och porvattentryck, där porvattentrycket mäts i undersidan. Med hjälp av dessa informationer kan datorn automatisk rita upp kompressionsmodul och permeabilitet (Sällfors, 2013).
CRS-försöket tar ofta 1–2 dagar och ger säkrare resultat än stegvis belastning om lerans deformationsegenskaper. För att bestämma förkonsolideringstrycket gör man samma sak som i stegvis belastning, man drar en vertikal linje från där kurvan krökar och sen kan man avläsa vad förkonsolideringstrycket blir. Därefter utvärderas ML, gränstrycket där modulen börjar öka σ_L' samt relationen mellan modulökning och effektivspänningsökning M'. Utifrån dessa försök kan man även få fram permeabilitet som funktion av kompression (Larsson, 2008).



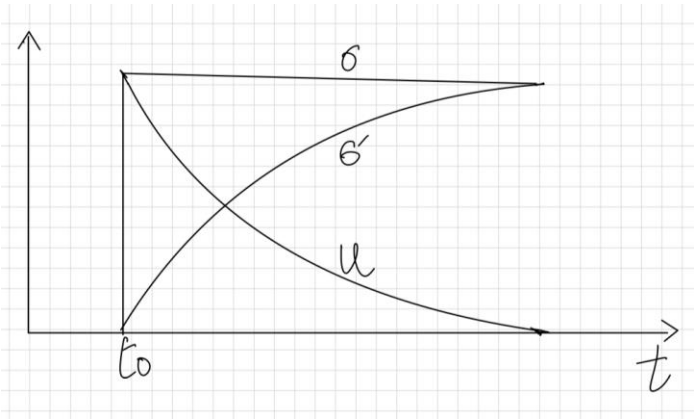
Figur 3.3: Utvärdering av förkonsolideringsstryck (σ_c'), kompression samt permeabilitet m.h.a CRS försök. (Larsson, 2008)

3.3 Konsolidering/tidsberoendesättningar

3.3.1 Allmänt

När lera belastas brukar det ta flera åt innan den totala sättningen inträffar, anledningen är att lera är vattenmättad och det tar lite tid för leran att pressa ut allt vatten. Denna process från att leran belastas till leran minska sin volym genom att pressa ut vattnet kallas för konsolidering/tidsberoendesättningar. Konsolidering kan även inträffa till följd av en minskning av porvattentrycket, exempelvis vid en sänkning av grundvattennivån. Denna volymminskning orsakar vertikala deformationer som kallas för sättningar (Knappett & Craig, 2012).

Jordar med hög permeabilitet sker volymminskning momentan, medan för jordar med låg permeabilitet fördröjs deformationen eftersom det tar lång tid för vattnet att pressas ut från leran (Sällfors, 2013). Efter påförd last ökar den effektiva spänningen i samma takt som volymminskningen av vatten, medan den totalaspänningen förblir det samma, se figur 3.4.



Figur 3.4: konsolideringsförloppet med porövertryck (u), effektivspänning (σ') och tillskottsspänning (σ).

3.3.2 Konsolideringstyper

Vid Sättningsberäkningar skiljer man på olika fall beroende belastningsstorlek. För att kunna veta vilket fall som gäller för varje sättningsberäkning behöver man utvärdera förkonsolideringstrycket, kompressionsmoduler samt gränstrycket. Dessa parametrar kan utvärderas från ödometerförsök (Sällfors, 2013).

Lerans deformationsegenskaper beror på hur den effektiva vertikala spänningen (σ`o) förhåller sig till förkonsolideringstrycket (σ`c), där lera med σ`o= σ`c sägs vara normalkonsoliderat (NC). Vilket innebär att leran utsätts för den högsta spänning den någonsin har utsätts för (Larsson och Åhnberg, 2003). I detta fall när leran belastas ytterligare av till exempel byggnation kan det leda till betydande sättningar över tid.

Lera med σ`o< σ`c sägs vara överkonsoliderat (OC), detta innebär att leran har tidigare utsätts för högre spänning än det som den för nuvarande upplever (Larsson och Åhnberg, 2003). Detta kan ske genom erosion eller schaktning av byggnader, detta gör leran mer motståndskraftigt mot sättningar.

3.3.3 Terzaghis konsolideringsekvationer och teorier

Den 1925 presenterade Karl Terzaghis sina teorier samt ekvationer kring konsolidering. Terzaghis ekvation för porövertrycksutjämning beskrivs i formel 3.8, den bygger på att kompression och vattenströmning sker endast vertikalt, samt att de är konstanta med djupet (Sällfors, 2013).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = M\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial u}{\partial z}\right) \quad (3.8)$$

Terzaghis modell bygger på ett antal grundläggande antaganden. Det antas att jorden är homogen och helt mättad samt att både de fasta partiklarna och vattnet är inkompressibla. Vidare antas att kompression och vattentransport endast sker i vertikal riktning, att deformationerna är små och att Darcy's lag kan tillämpas vid alla hydrauliska gradienter. Dessutom betraktas permeabilitetskoefficienten och volymkompressabilitetskoefficienten som konstanta under hela konsolideringsförloppet. Slutligen antas att det finns en unik, tidsberoenderelation mellan portal och den effektiva spänningen.

Utifrån dessa antaganden och villkor härledde Terzaghi en differentialekvation som beskriver förändringen av porövertyck u_e över tid och djup (Knappett & Craig, 2012).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3.9)$$

Där:

$$c_v = \frac{k\cdot M}{g\cdot p_w} \quad (3.10)$$

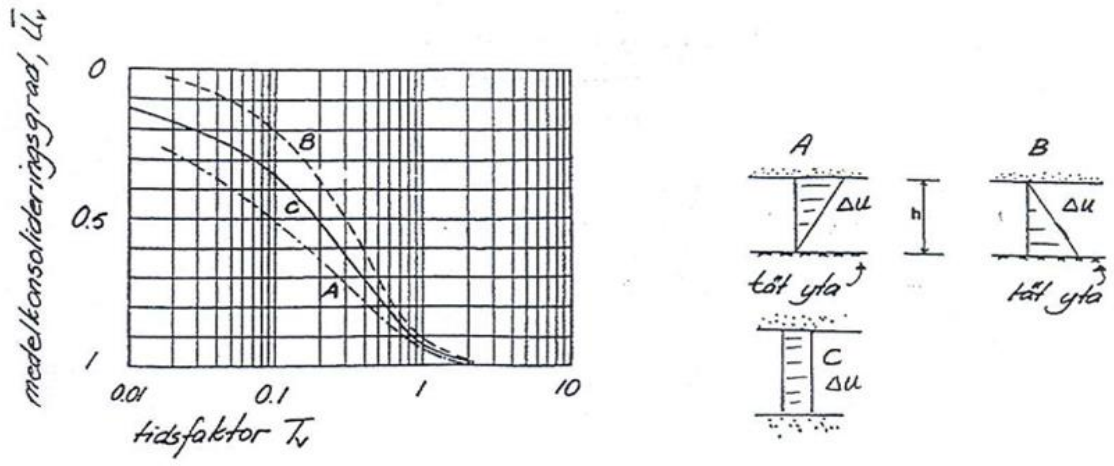
För att kunna beräkna tidsförloppet har Terzaghi infört tidsberoendesättningar (Tv) enligt formel (3.11). Denna formel beskriver tidsberoendesättningar och beror på konsolideringsgraden samt dräneringsförhållanden.

$$T_v = c_v \cdot \frac{t}{h^2} \quad (3.11)$$

När man använder denna formel måste man beakta dräneringsförhållanden. Vid beräkning av dubbelsidig dränering bör man räkna med halva tjockleken på dräneringsvägen alltså ((h/2) ^2), medan när man räknar med enkelsidigdränering ska man ta hela tjockleken på dräneringsvägen (Knappett & Craig, 2012).

Med hjälp av tidsfaktorn (Tv) kan man få fram medelkonsolideringsgraden (U (%)). Där medelkonsolideringsgraden står för den andelen av porvattentryck som har jämnats ut. I figur 3.5 kan man se 3 kurvor där kurva A står för jordprofil med enkelsidig dränering som är tät från undersidan. Kurva B står för

enkelsidig dränering som är tät från toppen. Medan kurva C avser en jordprofil som är dubbelsidig dränering (Sällfors, 2013).



Figur 3.5: medelkonsolideringsgraden som beror på randvillkor och tidsfaktor. (Sällfors, 2013)

3.3.4 Sekundärkonsolidering och krypning

Effektivspänningar ökar under konsolideringsfaser vilket gör att deformationer börjar bildas, de kan fortsätta bildas även efter att porövertrycket hat utjämnats i långsammare takt. Denna deformation kallas för sekundärkonsolidering/krypning (Sällfors, 2013).
Sekundärkonsolidering uppstår när de finkorniga jordpartiklarna gradvis omfördelas till en stabilare packning efter att den primära konsolideringen har minskat porvolymen och förändrat jordens struktur. En ytterligare faktor som påverkar den sekundärkonsolideringen är de små sidledes förskjutningar som uppstår i tjocka jordlager under påverkan av skjuvspänningar.
Hastigheten för sekundärkonsolidering tros styras av den viskösa vattenfilmen som omger lerpartiklarna i jorden. Detta adsorberade vatten är mycket trögflytande och rör sig långsamt från kontaktpunkter mellan filmerna, vilket gör att lerpartiklar kan packas tätare. När partiklarna närmar sig varandra ökar vattnets viskositet, vilket leder till att kompressionshastigheten gradvis avtar.
Det antas att primär konsolidering och sekundärkonsolidering sker samtidigt från den stund jorden belastas (Knappett & Craig, 2012).
Krypsättning i jordmaterial beskrivs med en metod som är baserad på en-dimensionell modell i SSC, modellen är utvecklat av Stolle et al. (1997) och Vermeer et al. (1998). Modellen fokuserar på den totala deformationer som påverkas av lastpåslag, där den totala deformationen delas upp i elastisk deformation samt visko-plastisk krypsättning (Olsson, 2010). Denna uppdelning gör det bättre att förstå de långsiktiga sättningarna i lerlagret. Den totala deformationen (ε) uttrycks som summan av primär konsolidering och krypning:

$$\varepsilon = \varepsilon^c + \varepsilon^c_{dc} + \varepsilon^c_{ac} = A \cdot \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_o}\right) + B \cdot \ln\left(\frac{\sigma_{pc}}{\sigma_{p0}}\right)' + C \cdot \ln\left(1 + \frac{t'}{\tau_c}\right) \qquad (3.12)$$

Där första två summor representera den elastisk deformation medan sista summan presenterar visko-plastisk krypsättning. För att bestämma t´ används formel:

$t´=t-\tau c$ (3.13)

Där τc är den tidpunkt då konsolidering är avslutad och krypning har börjat, (t`) representerar den återstående tiden fram till att den totala sättningen uppnås.

Parametern C, även betecknas som (μ) står för krypindex och beräknas genom att använda formel:

$$\mu = \frac{1}{r} \quad (3.14)$$

där r är krypparametern som används i Sverige idag rätt så ofta då den gäller för skandinavisk lera eftersom ödometerförsök med stegvis pålastning inte alltid använts i Sverige (Olsson, 2010). För att ta fram krypparametern (r) används formel:

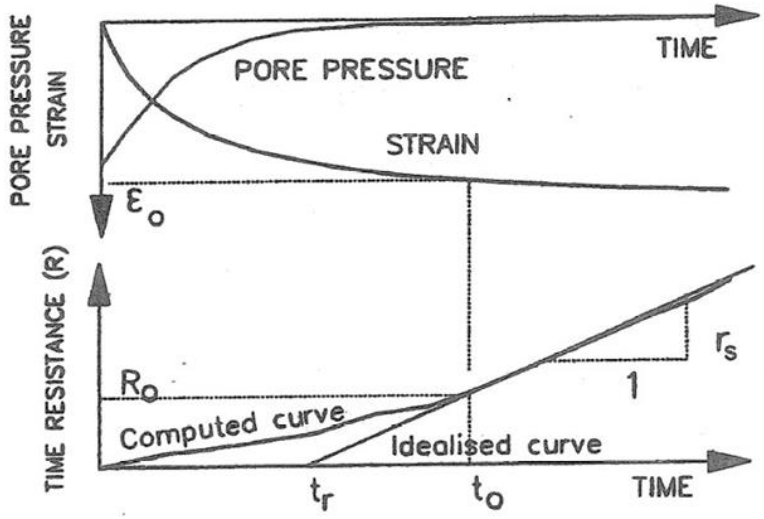
$$r = \frac{75}{w_n^{1,5}} \quad (3.15)$$

3.3.5 Tidsmotståndet

Janbu (1969) introducerade begreppet tidsresistens för att bättre förstå jordens spännings- och tidsberoende beteende vid kompression och svällning. Konceptet bygger på att se tid som handling och deformationen som dess svar (Olsson, 2010).

Figur 3.6 visar resultatet från ett ödometerförsök med ett enstaka laststeg och enkelsidig dränering. Provet är dränerat i toppen medan portrycket mäts vid botten (Olsson, 2010). I detta sammanhang definierar Janbu tidsresistensen som följande:

$$R=\frac{dt}{d\varepsilon} \rightarrow \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{R} \quad (3.16)$$



Figur 3.6 Tidsmotståndet R vid ett enstaka laststeg i ödometerförsök. (Olsson, 2010)

Som figur 3.6 visar, blir porövertrycket jämnt vid tidpunkten t_0, där avslutar den primärkonsolideringen. Efter t_0 blir sambandet mellan tidsmotstånd R och tiden t linjärt och det är endast krypning som sker. Lutningen på denna räta linje definieras som krypmotståndstalet r_s, och R kan beskrivas med ekvation (3.17) (Olsson, 2010).

$$R = r_s(t - t_r) \quad (3.17)$$

Där är t_r en referenstidpunkt. Krypdeformation kan beräknas enigt ekvation (3.18) (Olsson, 2010).

$$\varepsilon_c = \frac{1}{r_s} \ln \left(\frac{t-t_r}{t_0-t_r}\right) \quad (3.18)$$

Enligt Olsson (2010) uttrycks sambandet mellan koefficienten för sekundär kompression $\propto_s$ och krypmotståndstalet r_s som följande:

$$\propto_s = \frac{2.3}{r_s} \quad (3.19)$$

3.4 Elasticitetsteorin

Grunden för Elasticitetsteorin formulerades under 1600 talet. Robert Hooke formulerade Hooke´s lag år 1685. Hooke´s lag ledde till definitionen av Youngs modul E, som relaterar spänning till motsvarande töjning.

$$E = \frac{(P/A)}{(\delta l/l)} \quad (3.20)$$

Om ett prov utsätts till dragbelastning uppstår det längdutvidgning och radiell deformation. Axiell spänning som styrs av Poissons tal v orsakar den radiella deformationen.

$$v = \frac{(\delta d/d)}{(\delta l/l)} \quad (3.21)$$

Då d är provets diameter och δd är den radiella deformationen. Detta beskriver hur materialet ändrar form i sidled vid en viss dragning. Elastiska beteendet hos ett isotropt material kan beskrivas med hjälp av Youngs modul E, samt Poissons tal v. Ett Elastiskt, linjärt isotropt material återfår sin ursprungliga storlek och form när spänningarna tas bort.

För jordmaterial är det mer optimalt att arbeta med andra elastiska konstanter:

- Volymmodulen K, vilket beskriver ändringen av volymen vid tryck
- Skjuvmodulen G, vilket beskriver ändringen av materialets form vid skjuvning.

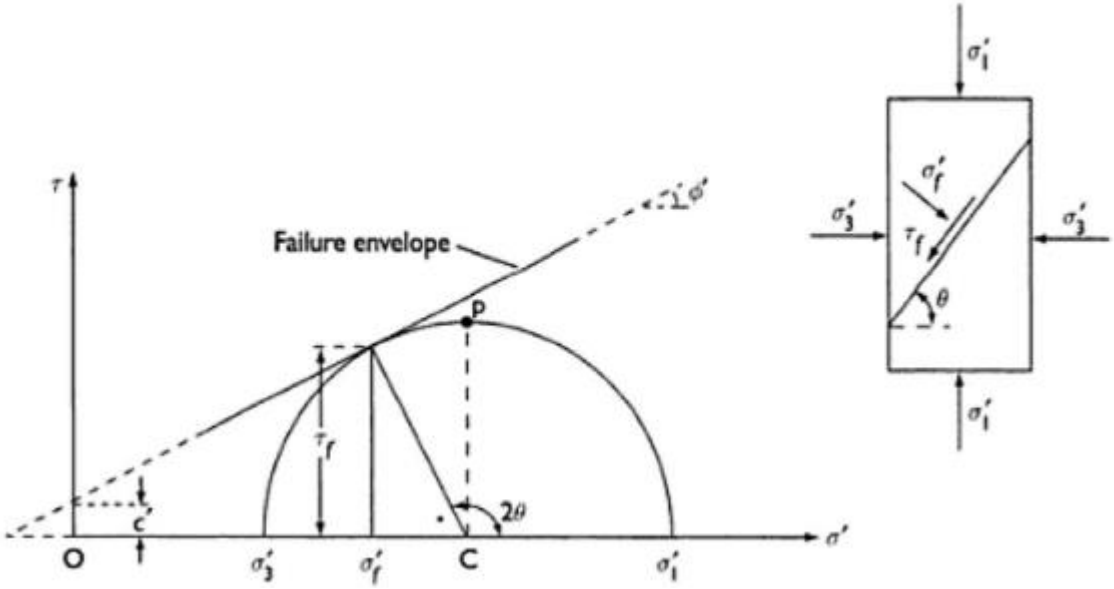
Påverkan av både skjuvmodulen och volymmodulen leder till skjuvning i jord.
Endimensionella Konsolideringsmodulen E_{oed} är en vanlig styvhetsparameter och kan fås ur ödometerförsök. Den kan kopplas till Youngs modul E genom Poissons tal v (larsson,2008).

$$E_{oed} = \frac{(E(1-v))}{((1+v)\cdot(1-2v))} \quad (3.22)$$

3.5 Mohr-Coulomb

Mohr Coulomb materialmodellen används i Plaxis för att approximera jordens beteende. Mohr-Coulomb modellen innebär att brott uppstår i en jordmassa när skjuvspänningen på ett plan blir lika med materialets skjuvhållfasthet. skjuvhållfastheten τ_f, beskrivs enligt coulomb som en linjär funktion av kohesion c, friktionsvinkeln φ och normalspänning vid brott σf . För att skjuvspänning i jord överförs endast genom kontaktkraft mellan fasta partiklar i en jordmassa, bör relationen formuleras med hänsyn till effektiva spänningar, för att kunna beskriva jordens hållfasthetsegenskaper på ett korrekt sätt.

I Plaxis när man räknar med Mohr-Coulomb representeras spänningstillstånd i ett diagram med två dimensioner, där skjuvspänning τ plottas mot effektivspänningen σ' (Craig, 2003). Spänningstillstånd beskrivs som en Mohr-cirkel där höjden på cirkeln är radien, alltså avståndet mellan $\sigma'_1 \; och \; \sigma'_3$ genom 2. Brottlinjen beskriv som en rak linje som visas i figur 3.7, om Mohr cirkel överstiger brottlinjen kan det ske brott i modellen.
Jorden beter sig elastisk vid spänningsnivåerna innanför flytytan, medan vid kritiska kombinationer mellan skjuvspänningar och effektiva spänningar kan jorden uppvisa ett perfekt plastiskt beteende, dvs en kontinuerlig skjuvning vid konstant spänning. När detta sker kan inte materialet återgå till sitt ursprungliga elastiska tillstånd utan att ha några kvarstående deformationer. (Craig, 2003)



Figur 3.7: Mohr-Coulomb brottvilkor (Craig, 2003)

3.6 Materialmodeller

Det finns flera olika materialmodeller i Plaxis att välja mellan. De olika modeller varierar i hur noggrant de kan fånga upp jordens respons vid mekaniska belastningar. Varje modell beskriver relationen mellan spänning och deformation i materialen på ett unikt sätt. Modellerna som används i detta arbete kommer beskrivas utförligt.

3.6.1 Soft Soil - modell

Soft Soil modellen används då den har bra egenskaper vid modellering av kompressionsbeteende hos jordar som klassas som mycket mjuka såsom leror och leriga siltjordar. Modellen antar ett logaritmiskt samband mellan töjning och effektivspänningen. För att få fram brottvilkoret för skjuvhållfasthet i soft soil modellen används Mohr-Coulomb brottyta (Plaxis, 2012b).

Figur 3.8 visar sambandet mellan volymtöjning ε_v och logaritmiskt medel effektivspänning $ln(p')$ under primär belastning, samt avlastning och omlastning. Vid isotop Virgin kompression längs konsolideringslinjen, formuleras sambandet:

$$\lambda^* = \frac{\Delta\varepsilon_v}{ln(p\prime)} \quad (3.23)$$

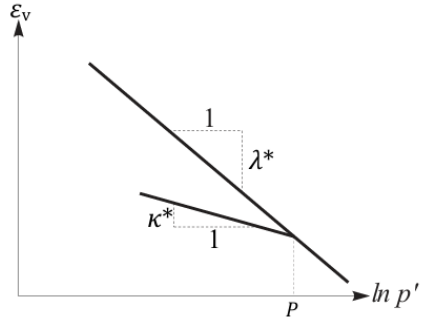
Soft soil modellen i Plaxis använder sig av parametern λ * som är jordens kompressabilitet vid primär belastning, den motsvara Ml som tagits fram tidigare med hjälp av CRS-metoden.

Om jorden utsätts för avlastning eller återbelastning ändras jordens beteende, vilket gör att kompression uttrycks enligt följande samband:

$$k^* = \frac{\Delta\varepsilon_v}{ln(p\prime)} \quad (3.24)$$

I Plaxis definieras k* som svällningsindexet och beskriver jordens kompression vid avlastning eller återbelastning. k* motsvarar M0 som tagits fram tidigare med hjälp av CRS-metoden.

Det som är bra med att använda soft soil-modellen är att den visar en tydlig uppdelning mellan primär och sekundär belastning samt avlastning och återbelastning. Den har lite svårigheter när det gäller andra jordtyper än mjuka jordar då hårda jordtyper är normalkonsoliderade (Plaxis, 2012b). Soft soil-modellen tar bara hänsyn till primär konsolidering vilket gör att man inte kan få en helhetsbild av konsolideringen, därför används även soft soil creep-modellen i denna rapport för att kunna se vad som sker hos den sekundära konsolideringen (krypning).



Figur 3.8 Samban mellan volymtöjning och logaritmiskt medel effektivspänning (Bentley Systems, 2024).

3.6.2 Soft Soil Creep-modellen

Deformationen i finkorniga jordar som lera fortsätter långsamt även efter att allt överporvattentryck har försvunnit. Denna tidsberoendedeformation, som kallas krypning, har stor betydelse för konstruktioner på mjuka jordar och behöver därför beaktas i geotekniska analyser. För att möjliggöra detta har Soft Soil Creep-modellen (SSC) utvecklats i PLAXIS (Bentley Systems, 2024).

SSC-modellen bygger enligt Bentley Systems (2024) på tidigare forskningsarbeten av bland andra Buisman, Garlanger och Bjerrum och är särskilt anpassad för att simulera deformationer i mjuka, finkorniga jordar där krypning utgör en viktig del av markens beteende.

3.6.3 Grundläggande egenskaper hos SSC-modellen

Enligt Bentley Systems (2024) bygger Soft Soil Creep-modellen (SSC) på följande egenskaper:

- Spänningsberoende styvhet och logaritmiskt kompressionsbeteende.
- Skillnad mellan primär pålastning, omlastning och avlastning.
- Tidsberoende deformation (krypning).
- Minneseffekt av förkonsolideringsstryck.
- Brottkriterium enligt Mohr–Coulomb.

3.6.4 Endimensionell krypmodell

Enligt Bentley Systems (2024) orsakas den totala logaritmiska deformationen ε av höjningen i den effektiva spänningen från in situ-effektivspänning σ_0' till en ny effektivspänning σ' under en tidsperiod ($t = t_c + t'$). Denna deformation kan beskrivas med hjälp av ekvation (3.25), som bygger på antagandet att den effektivspänningen höjs till σ' och därefter hålls konstant över tid. Enligt denna ekvation består den totala deformationen ε av tre termer. Den första termen uttrycker de elastiska deformationer, den andra termen uttrycker de visko-plastiska krypdeformationer som sker under primärkonsolidering, medan den tredje termen beskriver de visko-plastiska krypdeformationer som sker efter att den primärkonsolideringen avslutas.

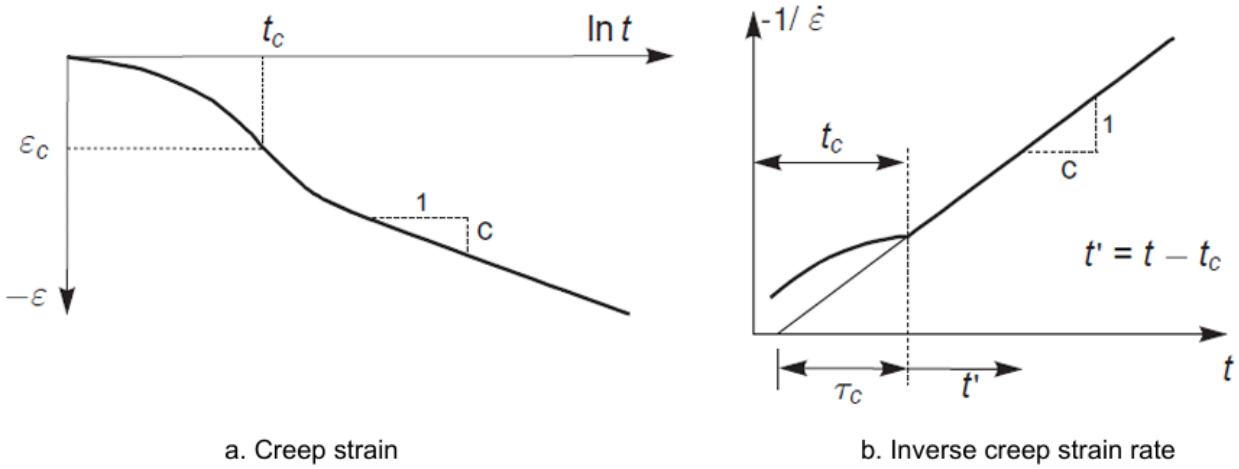
$$\varepsilon = -a ln(\frac{\sigma'}{\sigma_0'}) - (b-a)\ln(\frac{\sigma_c'}{\sigma_{c,0}'}) - c ln(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}) \qquad (3.25)$$

Parametrarna a och b är konstanter som relateras till jordens kompression och kan beräknas med ekvation (3.26) och (3.27) (Bentley Systems, 2024).

$$a = \frac{C_S}{(1+e_0).ln10} \qquad (3.26)$$

$$b = \frac{C_c}{(1+e_0).ln10} \qquad (3.27)$$

Figur 3.9 visar hur deformationen i ett ödometerförsök utvecklas över tid när lasten är konstant. I grafen till vänster (a) syns hur deformationen ökar snabbt, vilket beror på primärkonsolidering. Denna fas upphör vid tiden t_c. Därefter fortsätter deformationen, men i mycket långsammare takt, vilket beror på ren krypning. I den högra grafen (b) är töjnings hastigheten omvandlad till sin invers ($\frac{1}{\dot{\varepsilon}}$) och plottad mot tid. Den räta linjen som dras genom datapunkterna under krypfasen skär tidsaxeln just vid τ_c (Bentley Systems, 2024).



Figur 3.9 deformationens utveckling under ett ödometerförsök med konstant belastning, som visar olika tidsparametrar. (Bentley Systems, 2024).

Ett mer generellt alternativ till ekvation (3.25) som kan tillämpas vid varierande spänningstillstånd utan att använda tidsparametrar är ekvation (3.28). Denna ekvation beskriver den logaritmiska deformationen ε i termer av effektivspänning (Bentley Systems, 2024).

$$\varepsilon = -aln(\frac{\sigma'}{\sigma_0'}) - (b-a)\ln(\frac{\sigma_c'}{\sigma_{c,0}'}) \qquad (3.28)$$

Där

$$\sigma_c' = \sigma_{c,0}' exp(\frac{-\varepsilon^c}{b-a}) \qquad (3.29)$$

ε^c avser den tidsberoende delen av deformationen (Bentley Systems, 2024).

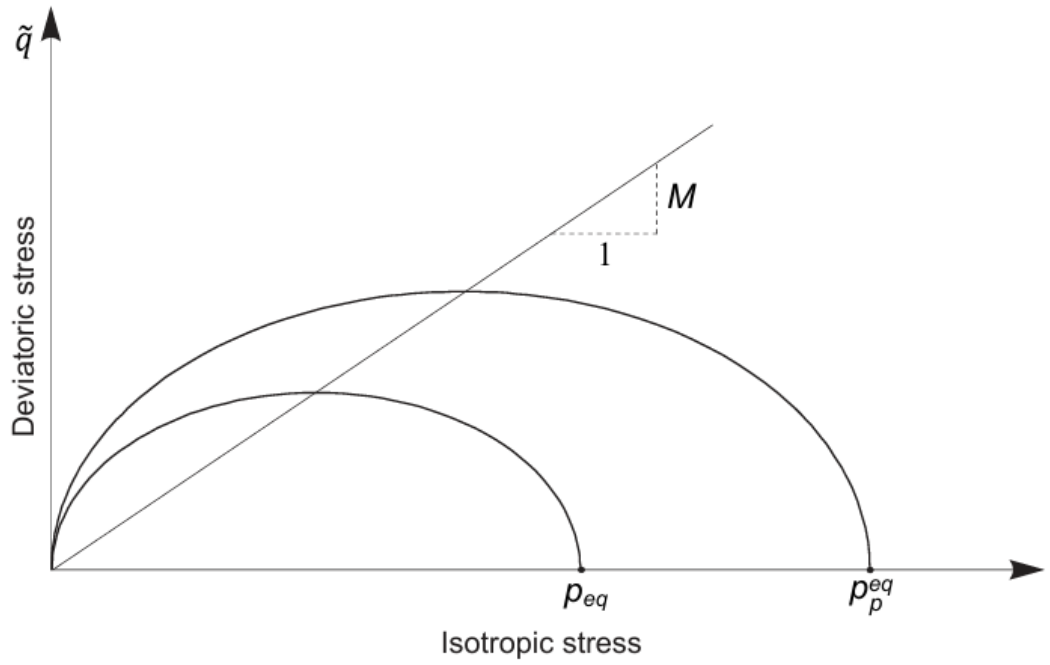
3.6.5 Tredimensionell krypmodell

Den endimensionella krypmodellen har utvecklats till en mer generell tredimensionell modell för att kunna beräkna spänningar och deformationer i alla riktningar. För att möjliggöra detta används spänningsinvarianterna medelspänning p och deviatorisk spänning q för att identifiera den ekvivalenta medelspänningen p^{eq} , som ekvation (3.30) visar (Bentley Systems, 2024).

$$p^{eq} = p' + \frac{\tilde{q}^{\,2}}{M^2(p'+c\cot(\varphi)} \qquad (3.30)$$

Där är M lutningen på den kritiska tillståndslinjen och c samt φ är kohesion respektive friktionsvinkel, som figur 3.10 visar (Bentley Systems, 2024).

.



Figur 3.10 Den ekvivalenta medelspänningen p^{eq} i p´–$\tilde{q}$ plan (Bentley Systems, 2024).

I 3D-modellen används modifierat krypindex (μ^*), modifierat svällning-index (k^*) och modifierat kompressionsindex (λ^*) som alternativa materialparameterar i stället för de parametrarna a,b ,c som används i 1D-modellen (Bentley Systems, 2024). Sambandet mellan de parametrarna beskrivs enligt ekvationer (3.31), (3.32) och (3.33).

$$k^* = \frac{2}{3}(1 + 2K_0)a \rightarrow k^* = \frac{2\,C_S}{2{,}3\,(1+e_0)} \quad (3.31)$$

$$\lambda^* = b \rightarrow \lambda^* = \frac{C_c}{2{,}3(1+e_0)} \quad (3.32)$$

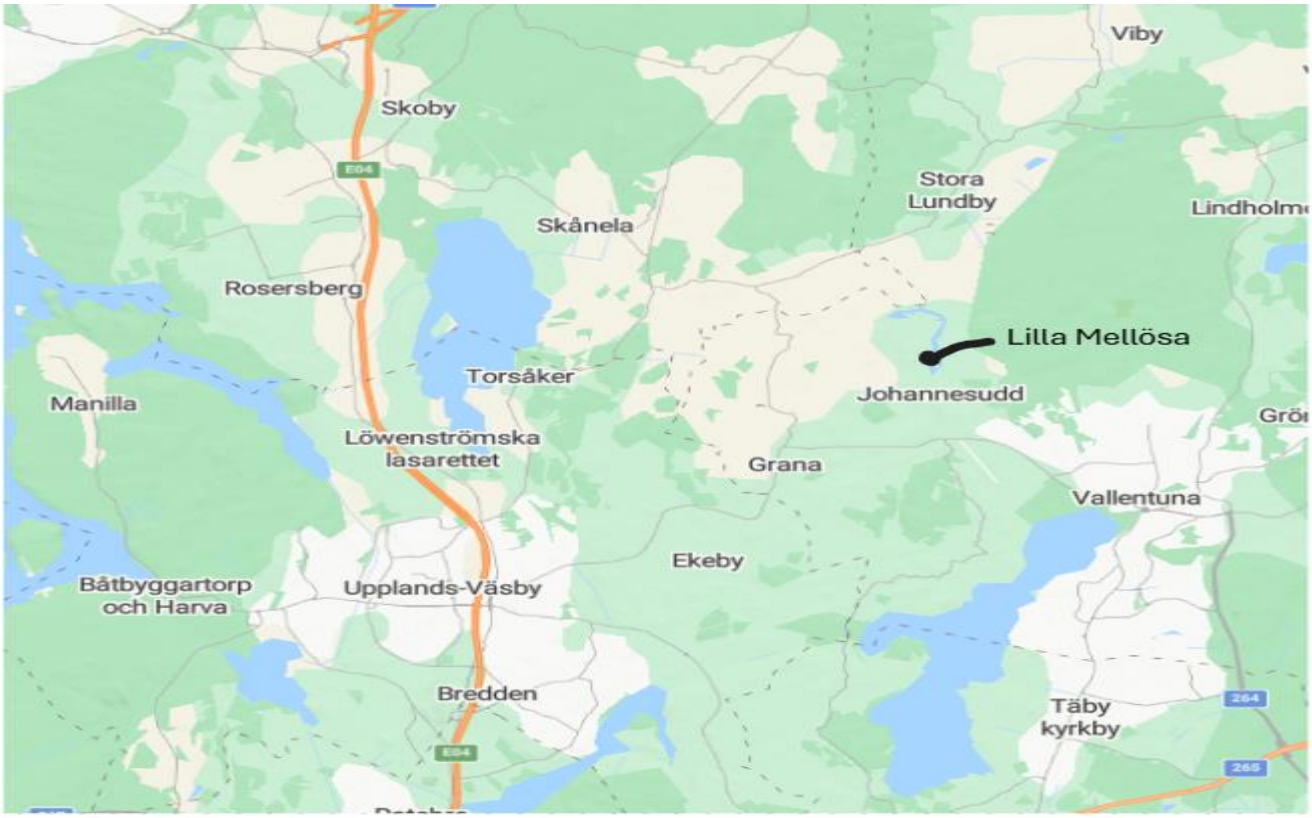
μ^*=c, vilket motsvarar enligt Figur 8.2, $\mu^* = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta ln(t)}$ (3.33)

4 Fältförsök i Lilla Mellösa

4.1 Allmänt

Lilla Mellösa är ett område som är belägen nära upplands Väsby, syd om Märsta och norr om Täby. Området är stort med relativt plant med otät byggelse, detta fick staten att börja planera en möjlig byggnation av en ny internationell flygplats år 1940 (Larsson, 2007). Efter att staten genomförde markundersökningar fick de fram att jorden bestod av 10–15 meters jordlager med sättningsbenägna jordar, vilket kan vara ett problem vid byggnation av flygplatsen.
År 1945 ville staten förbättra jordenbärförmåga genom att använda sig av popdräner som är utvecklat av SGI. Tanken var att studera effekten av förbelastning och konsolidering genom att jämföra en dränerad fyllning med en identisk som är odränerad, de kunde endast använda sig av 5 meter långa dräner vilket begränsade resultaten. Till slut bestämde de sig till att inte bygga flygplatsen då jordförhållanderan inte var idealiska med 10 till 15 meter tjock kompressibel lera. Trots detta har provfyllningar legats kvar och området har bevarats som ett geotekniskt provfält (Larsson, 2007).

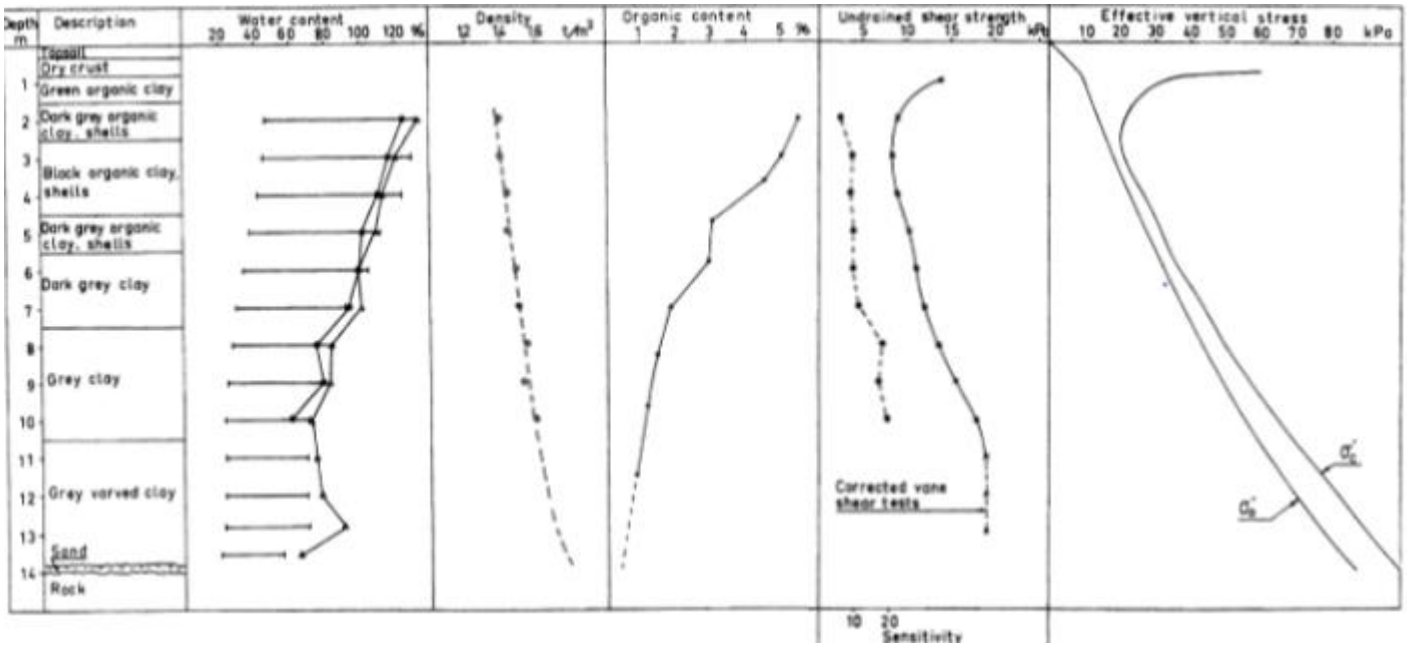
Denna rapport har endast fokuserat på odränerade provfyllning.



Figur 4.1: Platsbeskrivning för Lilla Mellösa

4.2 Jordförhållanden i Lilla Mellösa

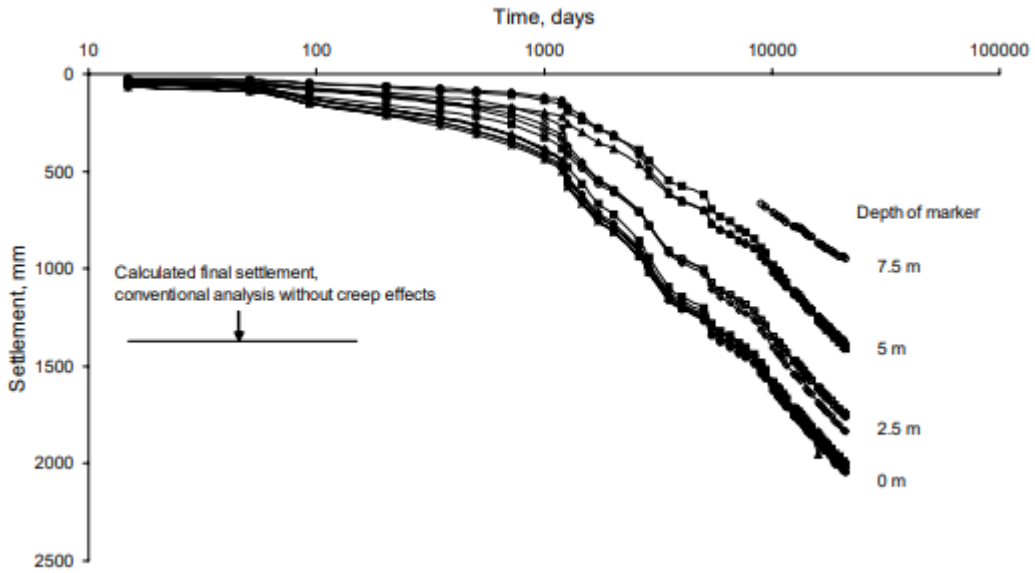
Jordförhållanden under den odränerade provfyllningen i Lilla Mellösa är relativt homogen.
Jorden består av cirka 0,3 m tjockt lager av Mulljord och organisk jord, därefter följer 0,5 m tjockt lager av torrskorpa som överlagrar lös lera. Från 0,8 m fram till cirka 13,8 m har vi organisk lera som varierar i färg, direkt under torrskorpa har leran den gröna färgen, några meter djupet skiftar den till svart för att sen i slutet skifta till grå/brun som visas i figuren nedan. Från djup 10 m och neråt börjar leran bli varvig och varven börjar bli mer markant mot djupet. Under leran förekommer ett tunt sandlager, cirka 0,2 m tjockt som ligger ovanpå berget. Vattenkvot i toppen ligger på cirka 130% och minskar med djupet, 13 m under markytan når vattenkvoten 70% som sin lägsta punkt. Densiteten varierar lite beroende på vad jordlagren består av och leran har för färg, den ökar från 1,3 t/m^3 till cirka 1,8 t/m^3. Den organiska halten minskar med djupet, den börjar med 5 % i den första lerlagret och minskat tills det blir 1% i sista lerlagret. Den odränerade skjuvhållfastheten når sitt minimum 8 kPa vid djup 3 m och sen fortsätter den att öka mot djupet tills den når cirka 20 kPa. Grundvattenytan ligger på cirka 0,8 m under markytan och porvattentrycket antas vara hydrostatisk i marken. Torrskorpans effekter i de första 2 meterna gör att jorden där blir överkonsoliderat. Resten av profilen är svagt överkonsoliderat med överkonsolideringsgraden som ligger på cirka 1,15 (Larsson, 2007).



Figur 4.2: Jordlagerföljden för Lilla Mellösa (Larsson, 2007)

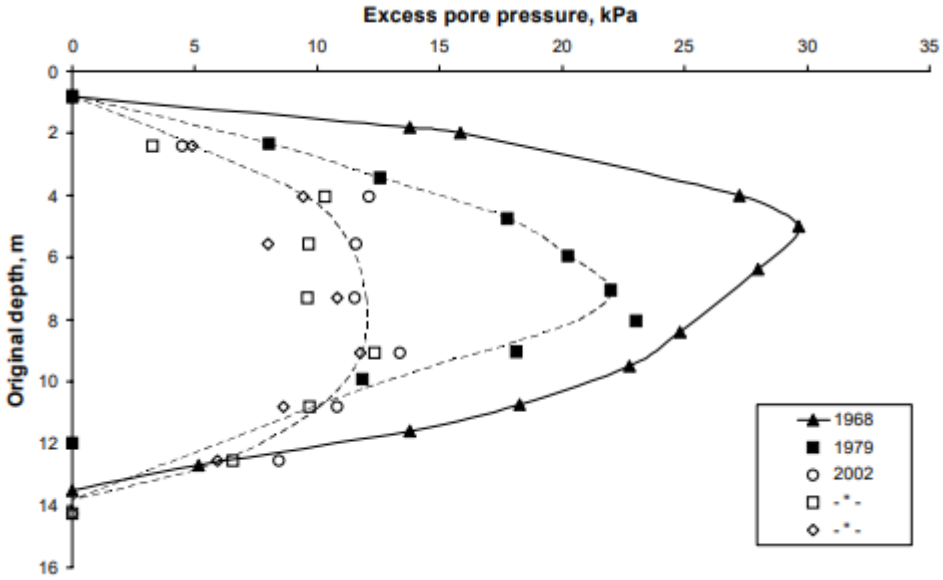
4.3 Uppmätta porövertryck och sättningar för den odränerade fyllningen

I Figur 4.3 kan man se resultatet för de uppmätta sättningarna vid olika djup samt hur de utvecklas över tid under den odränerade provfyllning.



Figur 4.3: Uppmätta sättningar mot tid för olika djup i Lilla Mellösa (Larsson, 2007)

I Figur 4.4 kan man se resultatet för de uppmätta porövertrycken för olika tider samt hur de utvecklas med djupet under den odränerade provfyllning.



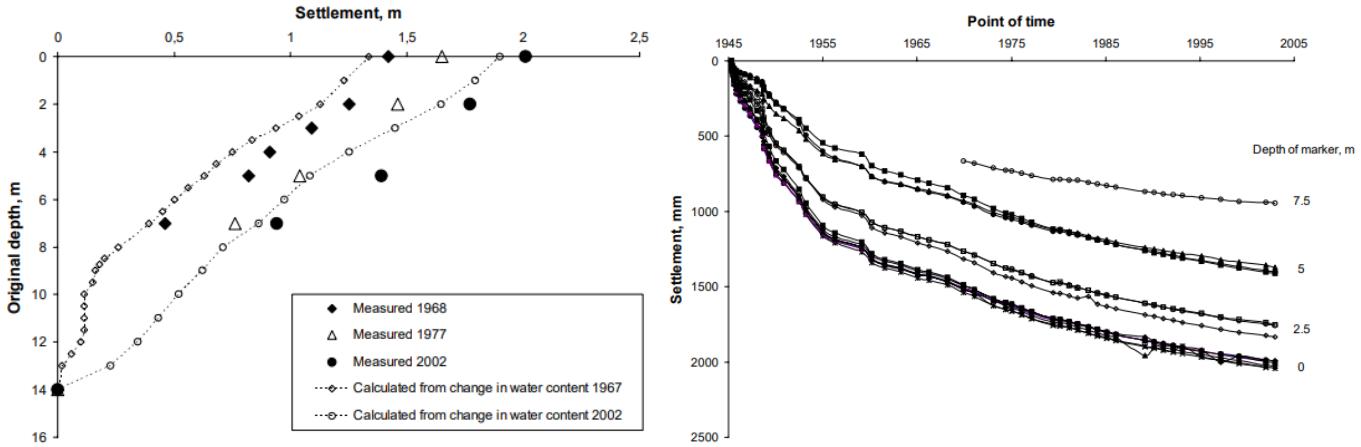
Figur 4.4: Uppmätta porövertryck i variation med djupet för olika årtal i Lilla Mellösa. (Larsson, 2007)

Sättnings-och portryck fältmätningar har utförts under 57 år, från 1945 till 2002, vilket har genererat mycket värdefulla data för att studera långtidseffekter av krypning i mjuka lera. (Claesson, 2003).

För att bestämma sättningsfördelningen över djupet i området, användes förändringen i vattenhalten i olika jordlager. Lateral deformationen, enligt den metoden, är försumbar i förhållande till konsolideringssättningar (Larsson 1986).

Under byggperioden uppmättes den initiala sättningen till 0,065 m. efter 21 år blev sättningen 1,40 m och portrycket uppmättes till 30 kPa. Det tyder på att vissa delar av lerlagret har inte haft någon ökning i effektivspänning (Larsson, 1986).

13 år senare hade sättningarna ökat till 1,65 m och porvattentryck låg på 20kPa. Den totala sättningen år 2002 blev 2,0 m med ett vatten portryck på 10kPa (Claesson, 2003). Sättningsfördelningen mot djupet under provfyllningen vid de olika tidpunkter presenteras i figur 4.5.



Figur (4.5) : a) uppmätta vertikala sättningar i Lilla Mellösa under olika tidperioder, b) totala sättningar i området mot tiden. (Larsson,2007).

5 Parametrar för Sättningsberäkningar

5.1 Inledning

Det finns olika försökmetoder för att bestämma parametrarna som behövs för sättningsberäkningar enligt den svenska metoden, som till exempel bestämning av förkonsolideringstrycket. I denna rapport används CRS-försök för att kunna beräkna förkonsolideringstrycket, kompression och permeabilitet.

5.2 Modellparametrar

5.2.1 Jordens Tunghet

För att kunna beräkna jordens in-situ spänningar i Lilla Mellösa behöver tungheten identifieras för varje jordlager, dessa tungheter är utvärderade av (Larsson, 2007).

I tabell 5.1 nedan kan man se tungheter mot djupet som utvärderades av (Larsson, 2007), dessa tungheter har valts för detta arbete.

Lager	Djup [m]	Tunghet [kN/m^3]
I	0,8	14
II	1,5	14
III	2,5	14
IIIV	4,5	14
V	5,5	15
VI	7,5	15
VII	10,5	16
VIII	13,8	17
IX	14	18

Tabell 5.1: Tungheter för olika djup i Lilla Mellösa. (Larsson, 2007)

5.2.2 Tillskottsspänningen

Vid provfältet i Lilla Mellösa används två provfyllningar som hade dimensioner 30x30 m med en höjd på 2,5m. Under fyllningarna placerades mätutrustning för at beräkna portryck och sättningar, dessa fyllningsmassor bestod av grus som lede till en lastökning i marken som beräknades till 40,6 kPa (Larsson, 2007). För att kunna beräkna sättningar för området måste man inkludera lastökningen i beräkningen, I denna rapport har 2:1 metoden använts för att beräkna den långsträckta belastningen.

5.2.3 Permeabilitet

Permeabilitet har utvärderats med hjälp av CRS-försök som (Larsson, 1986) genomförde, han har även redovisat de i form av graf i sin rapport. I detta arbete kommer dessa utvärderade parametrar att användas. I tabell 5.2 kan man se parametrarnas anpassning till lagerindelning.

Lager	Djup [m]	K [m/år]
I	0–0,5	0,0220
II	0,5–1,5	0,0250
III	1,5–2,5	0,0285
IIIV	2,5–4,5	0,0250
V	4,5–5,5	0,0220
VI	5,5–7,5	0,0285
VII	7,5–10,5	0,0320
VIII	10,5–13,8	0,0320
IX	13,8–14	0,0320

Tabell 5.2: Permeabilitet för olika djup i Lilla Mellösa. (Larsson, 1986)

5.2.4 Portryck

Det är viktigt att bestämma portrycket och grundvattenytan för att kunna genomföra sättningsberäkningar, eftersom dessa värde har stort betydelse vid beräkningar av effektivspänningar. Då vattnets tillstånd är hydrostatisk väljs tungheten 10 kN/m^3 och portrycket antas vara noll vid torrskorpan. Randvillkoret dubbelsidigdränering väljs vilket innebär att porvattentrycket tillåts att dränera uppåt och neråt. Detta påskyndar konsolideringsprocessen och förkortar tiden för sättningar. Anledningen dubbelsidigdränering valdes är att det finns fyllningslager med hög permeabilitet ovanpå ett tjock organiskt lerlager som har låg permeabilitet, och i botten finns det även ett sandlager som fungerar som ett naturligt dräneringsskikt. Den underliggande berget kan vara sprucken, där sprickorna kan innehålla vatten eller luft.

5.3 CRS-Försök

5.3.1 Förkonsolideringstrycket i Lilla Mellösa

För bestämning av förkonsolideringstrycket användes CRS-försök som utvärderades av Larsson (1986). Han utvärderade förkonsolideringstrycket för olika djup genom att hitta krökpunkten, vid den punkten skiftar kurvan från linjär relation till kurvformad ökning vilket innebär att jorden inte har belastats med mer tryck tidigare än detta tryck. Man ritar en likbent triangel som följer den linjära relationen och kurvan som kommer efter, sedan kan man bara läsa av förkonsolideringstrycket.

Med hjälp av CRS-försök beräknades förkonsolideringstrycket för olika djup, de presenteras i tabellen nedan. Dessa värden har tagits fram genom uppskattning och utvärderingar som Larsson (1986) genomförde.

Djup [m]	Förkonsolideringstrycket ($\sigma_c^{'}$) [kPa]
0	100
0,5	30
1,5	20
3	25
5	33
7	50
9	65
11	83
13	100

Tabell 5.3: Förkonsolideringsstryck för olika djup i Lilla Mellösa. (Larsson, 1986)

5.3.2 kompressionsmodul i Lilla Mellösa

I detta arbete kommer kompressionsmoduler M_o och M_L hämtas från Larsson (1986) där han har utvärderat dessa värden.
M_o och M_L moduler har utvärderad utifrån CRS-försöken, Dessa värden är justerade genom uppskattning, i tabellen nedan kan man se kompressionsmoduler presenterade mot djupet.

Djup [m]	Mo [kPa]	ML [kPa]
0,8	6000	200
2	5000	190
3	5000	190
4	5000	200
6	6000	200
8	7000	200
10	8400	260
12	9500	320
14	10 800	380

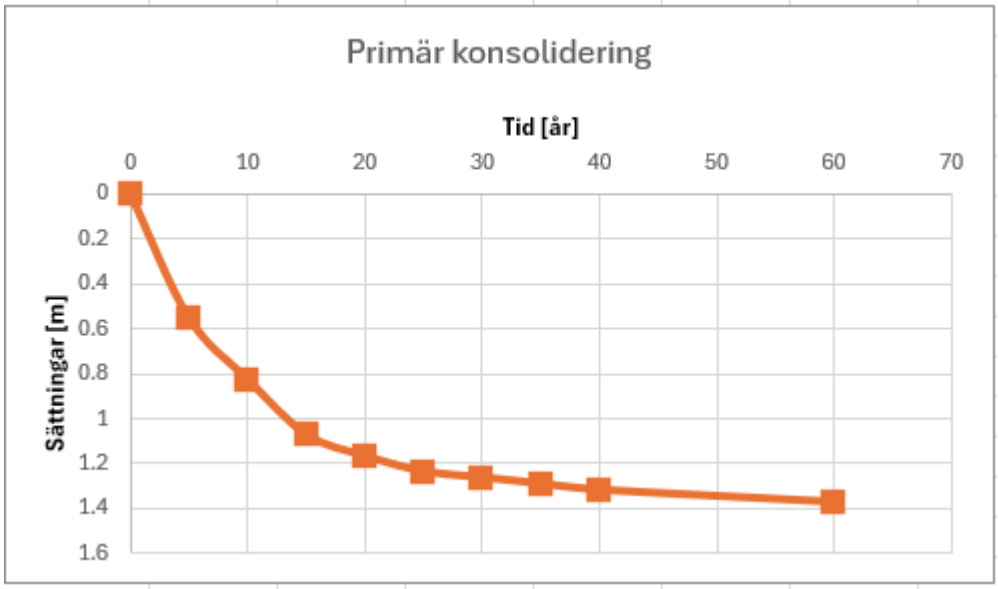
Tabell 5.4: Kompressionsmoduler Mo och ML för olika djup i Lilla Mellösa. (Larsson, 1986)

5.3.3 Krypparametrar i Lilla Mellösa

Krypning beräknades med hjälp av formel (3.12), där första två summor representera den elastisk deformation medan sista summan presenterar visko-plastisk krypsättning. För att beräkna visko-plastiska krypsättning har vi använt formel (5.1):

$$C \cdot \ln\left(1 + \frac{t'}{\tau c}\right) \cdot tjockleken \quad (5.1)$$

Vid beräkning av visko-plastiska krypsättning antog att primär konsolidering bör avslutats år 15, alltså τ_c= 15. Anledningen är att mellan år 15–20 ökar sättningen med ca 0,09 m, vilket betyder att sättningen började öka långsamt efter 15 år. Uv värdet efter 15 år börjar närma sig 1 vilket betyder att konsolidering börjar ta slut, detta är ett tecken på att krypning börjar efter 15 år.



Figur 5.1: Totalsättning med hänsyn till primär konsolidering och utan hänsyn till krypning i Lilla Mellösa .

Figur 5.1 visar kurvan till den totala sättningen utan hänsyn till krypning. Man kan se i figur 5.1 att förändringen i kurvans lutning uppstår först efter 15 år.

5.4 Materialparametrar för Soft Soil Creep-modellen

De parametrar som behövs som indata i SSC-modellen sorteras i följande kategorier:

Brottparametrar enligt Mohr-Coulomb-modellen:

- c'_{ref} = Effektiv kohesion [kN/m²]
- φ′= Friktionsvinkel [°]
- ψ = Dilatansvinkel [°]

Grundläggande styvhetsparametrar:

- κ* = Modifierat svällningsindex [-]
- λ*= Modifierat kompressionsindex [-]
- μ* = Modifierat krypindex [-]

Avancerade parametrar:

- v_{ur} = Poissonstal för avlastning–pålastning (standardvärde 0.15) [-]
- K_0^{nc} = Spänningskvot $\frac{\sigma'_{xx}}{\sigma'_{yy}}$ vid normalt konsoliderat tillstånd [-]
- M = Parameter relaterad till K_0^{nc} enligt ekvation (8.10) [-]

$$M = \sqrt{\frac{(1-K_0^{nc})^2}{(1+2K_0^{nc})^2} + \frac{(1-K_0^{nc})(1-2v_{ur})(\frac{\lambda^*}{k^*}-1)}{(1-2K_0^{nc})(1-2v_{ur})\frac{\lambda^*}{k^*}-(1-K_0^{nc})(1+v_{ur})}} \quad (5.2)$$

5.5 Styvhetsparametrar

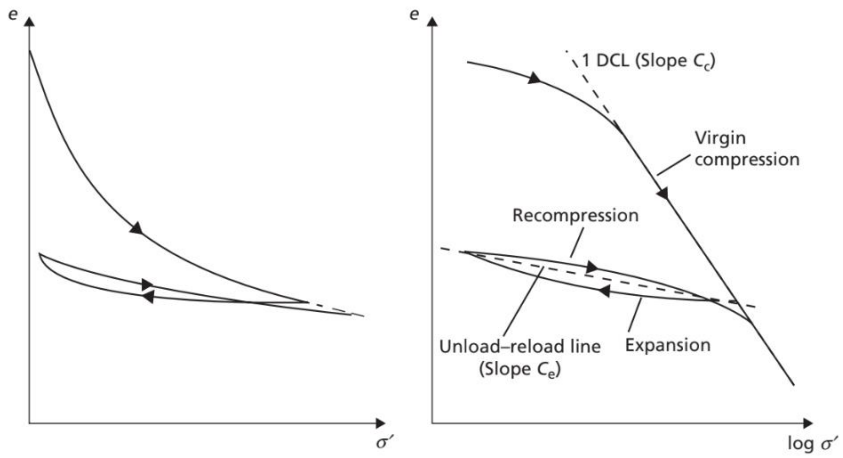
5.5.1 Kompressionsindex Cc och svällningsindex Cs

Förhållandet mellan den logaritmiska effektivspänningen och portal i vattenmättad jord illustreras i figur 5.2. Diagrammet i figuren visar hur jorden komprimeras vid pålastning, avlastning och omlastning (Knappett & Craig, 2012). När den effektivspänningen, som jorden utsätts för efter pålastning, överskrider förkonsolideringstrycket blir sambandet mellan logσ′ och e linjärt. Detta representeras av linjen 1DCL (virgin one-dimensional compression line) i figuren. Lutningen på denna linje definieras som kompressionsindex Cc och beräknas med formel (5.3), där punkterna (e_0, logσ'_0) och (e_1, logσ'_1) är två punkter som ligger på linjen 1DCL (Knappett & Craig, 2012).

$$C_C = \frac{e_0 - e_1}{\log(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_0})} \quad (5.3)$$

Vid avlastning ökar portal igen och den överkonsoliderat jorden sväller. Denna del av diagrammet som representerar svällningen approximeras till en rak linje som kallas för Unload-reload line, som figuren 5.2 visar. Lutningen på denna linje kallas för svällningsindex Cs och beräknas med formel (5.4) där punkterna 0 och 1 ligger på unload-reload linjen (Knappett & Craig, 2012).

$$C_S = \frac{e_0 - e_1}{\log(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_0})} \quad (5.4)$$



Figur 5.2 Sambandet mellan portal och effektivspänning i vattenmättad jord (Knappett & Craig, 2012).

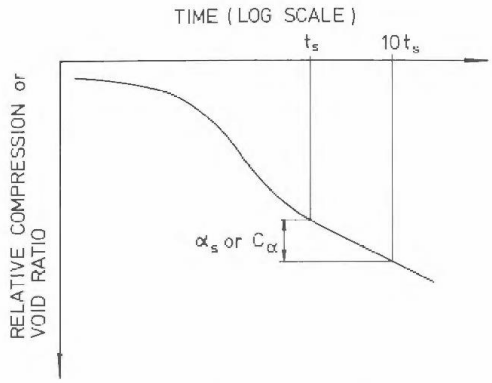
5.5.2 sekundärt kompressionsindex $C_\propto$

Efter att den primära konsolideringen är avslutad börjar den sekundära konsolideringen, som sker över tid med en konstant avtagande deformationstakt. Krypsättningarna antas ha ett linjärt samband med logaritmen av tiden. Detta illustreras i figur 5.3 nedan, där deformationen plottas mot logaritmisk tid (Larsson, 1986).

Lutningen på den linjära delen av kurvan representerar hastigheten för sekundär konsolidering, som kan uttryckas på två sätt. Det första sättet är med det sekundära kompressionsindexet $C_\propto$, vilket definieras som töjnings hastighet per logaritmisk tid. Det andra sättet är med koefficienten för sekundär kompression $\propto_s$ som är förändring i portal per logaritmiska tid (Larsson, 1986).

$$\propto_s = \frac{d\varepsilon}{dlog(t)} \quad (5.5)$$

$$C_\propto = \frac{de}{dlog(t)} \quad (5.5)$$



Figur 5.3 Sambandet mellan deformationer och logaritmisk tid vid konstant last (Larsson, 1986).

6 Parameterjusteringar

6.1 Allmänt

Parametrarna som användes vid beräkningen av totalasättningar med och utan hänsyn till kryp var uppskattade med en viss osäkerhet då flera av de parametrarna togs fram genom avläsningen från grafer. Denna metod kan ge osäkra värde på parametrar vilken i sin tur påverkar tillförlitligheten i resultatet. För att få bättre överensstämmelse med verkliga resultat kan det vara rimligt att göre vissa parametersjusteringar.

Anledningen till att parametersjusteringar ska genomföras i detta fall är att den beräknande sättningen utan kryp uppgick till ca 1,37 m, den totala sättningen med hänsyn till kryp gav 1,58 m, medan de uppmätta sättningarna uppgick till ca 2 m. Genom att till exempel justera tungheter kan resultatet förändras vilket i sin tur ger större förståelse för vilka parametrar som har störst inverkan på sättningsförloppet.

6.2 Parametrar som ska justeras

Tanken här är att justera de geotekniska parametrar som påverkar markens deformationsegenskaper och sättningsförlopp. Nedan beskriv de parametrar som ska justeras:

- Tungheter (γ)
- Förkonsolideringsstryck ($\sigma_c^{'}$)

6.2.1 Tungheter

Materialets tunghet kan ha stor påverkan på spänningar, högra tungheter innebär större belastning vilket i sin tur innebär större sättningar, därför är det relevant att justera tungheter genom att höja de. Nedan visas de nya värdarna för tungheter för varje djup.

Lager	Djup [m]	Tunghet [kN/m^3]
I	0,5	14
II	1,5	15
III	2,5	15
IIIV	4,5	16
V	5,5	16
VI	7,5	16
VII	10,5	17
VIII	13,8	17
IX	14	18

Tabell 6.1: Tungheter för varje djup efter parametersjusteringar i Lilla Mellösa.

6.2.2 Förkonsolideringsstryck

Förkonsolideringsstryck är en central parameter i sättningsberäkningar, den avgör om jorden befinner sig i överkonsoliderat eller normalkonsoliderat fas vid belastningen. Om förkonsolideringstrycket sänks leder det till högre sättning, därför är det relevant att justera förkonsolideringstrycket genom att sänka den. Nedan visas de nya värdarna för förkonsolideringstrycket för varje djup.

Djup [m]	Förkonsolideringstrycket ($\sigma_c^{'}$) [kPa]
0	90
0,5	20
1,5	20
3	24
5	33
7	47
9	60
11	75
13	90

Tabell 6.2: Förkonsolideringstrycket för varje djup efter parametersjusteringar i Lilla Mellösa.

7 Plaxis

7.1 Allmänt

Plaxis 2D är ett beräkningsprogram som utvecklats av Bentley Systems för att analysera och simulera geotekniska problem i två dimensioner. Det bygger på finita elementmetoden för att analysera stabilitet och deformationer i jord och berg (Bentley Systems, u.å.). Programmet innehåller flera olika materialmodeller, såsom Soft Soil och Soft Soil Creep, vilka används för att studera jordens beteende under olika belastningsförhållanden (Bentley Systems, u.å.). I detta kandidatarbete används jordmodellerna Soft Soil och Soft Soil Creep för att analysera och beräkna de sättningar som uppstår i jorden till följd av den odränerade fyllningen i Lilla Mellösa.

7.2 simulering av CRS-försök i Plaxis

För att uppfatta jordens sättningsbeteende på ett verkligt sätt, genomfördes simuleringar av CRS-försök i Plaxis-2D. CRS är en av de vanligaste laboratorieförsök i Sverige, vilket används för att beräkna kompressionsmodul, permeabilitet och förkonsolideringsstryck i mjuk jord (Larsson, 1986).
CRS-försök rekommenderas även av SGI:s normsystem, för att det tar en kontinuerlig notering av deformation, portryck och belastning under ett bestämt lastförlopp (Claesson, 2003).
Med hjälp av soil test i Plaxis bestämdes krypparametrarna som användes i Plaxis, genom att utvärdera kompressionsmodul värden i Plaxis som sedan jämförs med uppmätta kompressionsmodul hämtad från (Larsson 1986).

7.3 Uppbyggnad av Plaxis-modellen

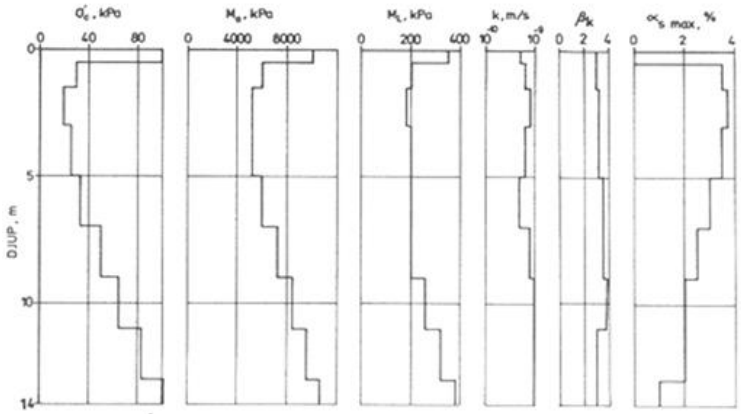
Under detta avsnitt dokumenteras modellens uppbyggnad, laststeg, och de olika beräkningstider och faser, i detalj.

7.3.1 modellgeometri och randvillkor

Modellen byggdes i en axi-symmetrisk geometri, där modellen sträcker sig 65 m horisontellt och 14 m vertikalt. Provfyllningen sträcker sig 15 m horisontellt, 2,5 meter vertikalt och placerades längst modellens vänstra kant. Modellens randvillkor valdes som standard fixity, dvs att modellens sidor fixerades horisontellt och botten fixerades horisontellt och vertikalt, medan toppen lämnades fri. Grundvattenytan antogs ligga 0,9 meter under markytan och direkt ovan på den första lerlagret.

7.3.2 skiktindelningen och materialegenskaper

För att kunna utföra simulationen för SSC bestämdes olika parametrar som presenteras i tabell 7.1 med hjälp av kompressionsmodulen och den sekundära krypkoefficienten som presenteras i figur 7.1



Figur 7.1: förkonsolideringsstryck. Kompressionsmodul, permeabilitet och sekundär krypkoefficient (Larsson 1986)

Figur 7.1 visar att kompressionsmodulen i jordprofilen i Lilla Mellösa varierar med djupet. Genom att läsa av värden får man att M0 ligger i intervall [5000–6000 kPa] i de första 5 m av jordlagret, därefter ökar värdet till 10 000 kPa vid djup 14 m. ML ligger i intervallet [190–200 kPa] i de första 8 m av jordlagret, därefter ökar det till 380 kPa vid djup 14 m. Den sekundära krypkoefficienten varierar också med djupet, där visar den höga värden i den första halvan av jordlagret, därefter minskar det gradvist till 0.01 vid djup 14 m.
Genom att använda kompressionsmodulen och den sekundära krypkoefficienten utvärderades krypparametrarna som användes för Plaxis simulationen.

Jordprofilen uppdelades i 8 olika skikt enligt de geotekniska data från Lilla Mellösa (Larsson, 2007). Torrskorpan som är den översta lagret modellerades som linjärt elastisk med en Youngsmodul på 11MPa och en tunghet på 20 kN/m^3. Själva provfyllningen modellerades i Plaxis med Mohr-Coulomb-materialmodell, med en Youngsmodul på 40Mpa och en tunghet på 16 kN/m^3. Alla lerlager modellerades med både Soft soil-materialmodellen (SS) och Soft soil creep-materialmodellen (SSC). Detta tillåter simulationen av både primär och sekundärkonsolidering. Parametrarna som användes vid simulationen beräknades och uppskattades med hjälp av fältdata och laboratorieresultat och redovisas i tabell 7.1.

Skiktindelning (m)	$\gamma(\frac{kN}{m^3})$	W_n %	M_0 (kPa)	M_L(kPa)	K (m/år)	a_s (-)	e_{init}	c_k
0,8–1,5	14	125	5000	200	0,0250	0,035	0,5	3
1,5–2,5	14	125	5000	190	0,0285	0,035	0,5	3
2,5–4,5	14	110	5000	200	0,0250	0,035	0,5	3
4,5–5,5	15	100	5500	200	0,0220	0,030	0,5	3
5,5–7,5	15	85	6500	200	0,0285	0,028	0,5	3
7,5–10,5	16	75	8500	230	0,0320	0,02	0,5	3
10,5–13,8	17	80	10 000	340	0,0320	0,019	0,5	3
13,8–14	18	70	10 800	380	0,0320	0,01	0,5	3

Tabell 7.1: De grundläggande parametrar för jorden i området Lilla Mellösa

Dessa parametrar användes för att få fram initiala indata som användes för SSC-modellen och SS-modellen i Plaxis. Parametrarna som beräknades med hjälp av tabell 7.1 redovisas i tabell 7.2

Skiktindelning (m)	k (m/år)	κ *	λ *	μ *	φ'	c'	v_{ur}	OCR
0,8–1,5	0,0250	0,002	0.18	0,006	30	1	0,15	16
1,5–2,5	0,0285	0,002	0.18	0,006	30	1	0,15	4
2,5–4,5	0,0250	0,0033	0.22	0,008	30	1	0,15	3
4,5–5,5	0,0220	0,0033	0.21	0,007	30	1	0,15	2
5,5–7,5	0,0285	0,0038	0.29	0.01	30	1	0,15	1.2
7,5–10,5	0,0320	0,005	0.31	0.01	30	1	0,15	1.2
10,5–13,8	0,0320	0,006	0.31	0.01	30	1	0,15	1.2
13,8–14	0,0320	-	-	-	40	1	0,15	-

Tabell 7.2: parametrarna som används för SSC/SS modellen i Plaxis

Parametrarna i tabell 7.2 kalibrerades iterativt efter jämförelsen med verkliga sättningar och kompressionsmodulen, vilket redovisas i tabell 7.3.

Skiktindelning (m)	γ (kN/m^3)	k (m/år)	κ *	λ *	μ *	φ'	c'	Ψ (psi)	v_{ur}	OCR	POP
0,8–1,5	14	0,0250	0,006	0.18	0,001	30	1	0	0,15	1	16
1,5–2,5	14	0,0285	0,006	0.18	0,001	30	1	0	0,15	1	16
2,5–4,5	16	0,0250	0,007	0.22	0,009	30	1	0	0,15	3	-
4,5–5,5	16	0,0220	0,007	0.22	0,009	30	1	0	0,15	2	-
5,5–7,5	16	0,0285	0,007	0.22	0,009	30	1	0	0,15	1.2	-
7,5–10,5	17	0,0320	0,001	0.29	0,007	30	1	0	0,15	1.2	-
10,5–13,8	17	0,0320	0,001	0.29	0,007	30	1	0	0,15	1.2	-
13,8–14	19	0,0620	-	-	-	40	0,05	10	0,2	-	-

Tabell 7.3: Parametrarna efter kalibreringen som användes för SSC- och SS-modellerna.

Parametrarna i tabell 7.3 justerades efter att SSC-modellens resultat jämförts med verkliga fältmätningar. Skikt 13,8–14 är sandlagret där E_{50}^{ref} sätts till 25 000 kN/m^3. Dessa nya och kalibrerade indata användes för att beräkna sättningar för 21 och 57 år för SSC- modellen samt SS-modellen i Plaxis-2D. resultatet redovisas i kapital 8.2.

7.3.3 konstruktionsfaser

Simuleringen genomfördes i flera faser för att spegla lastens påförande och konsolideringen som efterföljer konstruktionen.

- **Initial fas:** för att skapa den Initialspänningstillståndet för modellen användes en initial K0-procedure.

- **Byggfasen:** provfyllningen läggs på efter initialfasen som en 2,5 m hög last och en tunghet på 16 kN/m^3. Som är en 25 dagars konstruktionsfas.

- **fas 1:** en tidsberoende analys med 21 års tid påbörjas där hydrauliska randvillkor bestämdes som stängda på sidorna och öppet i toppen och botten för att simulera dubbeldränering. Det hydrauliska lyftet som uppstår på grund av sättningar under provfyllningen, simulerades med hjälp av konsolideringsanalysen.

- **fas 2:** konsolideringsfas 2 bygger på fas 1, där konsolideringen för fas 2 beräknas för 57 års tid. I fas 2 minskas Provfyllningens last från 40,6 kN i fas 1 till 27 kN i fas 2 då fyllningen befinner sig under grundvattenytan efter 20 år, som har skapat den hydrauliska upplyfte som i sin tur ha minskat lasten till 27 kPa (Chang, 1981).

Resultatet för de olika faserna jämfördes med fältdata från området, därefter kalibrerades krypparametrarna (λ *,κ * och μ *) iterativt med hjälp av uppmätta kompressionsmoduler för att matcha den uppmätta sättningskurvan.

7.3.4 Mesh och inställning

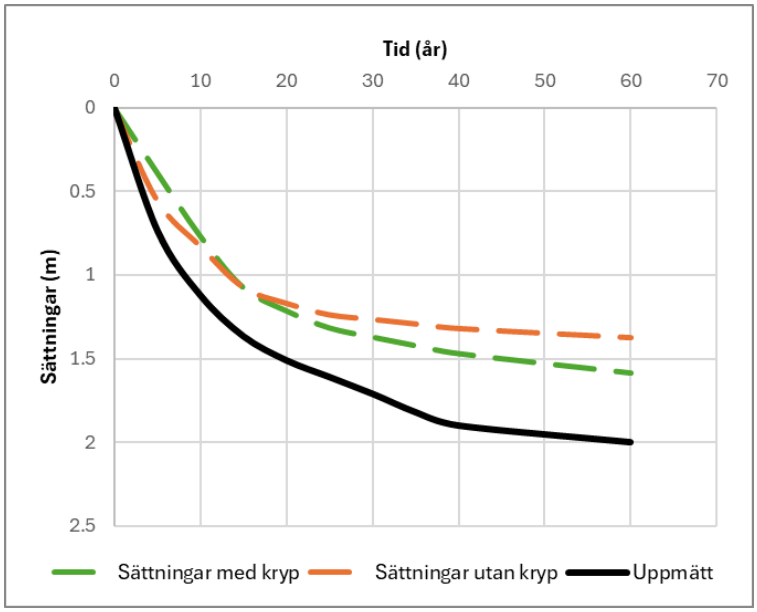
Mesh sätts till medium och bestod av 15-nods triangulära element. Beräkningen genomfördes i småsteg med automatisk steglängdanpassning för att fånga utvecklingen av sättningarna över tiden.

8 Resultat

8.1 Resultat för handberäkningar

Figur 8.1 nedan visar sättningsförloppet i Lilla Mellösa, där jämfördes beräkningar med och utan hänsyn till kryp med de uppmätta sättningarna.
Resultaten för både modellerna med och utan hänsyn till kryp visar en snabb sättning under de första åren, följd av en långsam deformation övertid. Skillnaden är att modellen med hänsyn till kryp leder till större sättningar än modellen utan kryp, speciellt efter 15 år, vilket bekräftar idén då kryp har en betydande effekt på långsiktiga deformationer i lera. Den totala sättningar med hänsyn till kryp gav ett resultat på 1,58 m, medan den totala sättningar utan hänsyn till kryp gav ett resultat på 1,37 m.

Figur 8.1 nedan visar de uppmätta sättningar och de beräknade sättningarna med och utan hänsyn till kryp. I figur 8.1 representeras de uppmätta sättningar som en svart kurva, den gröna kurvan representerar sättningarna med hänsyn till kryp och den orange kurvan visar sättningarna utan hänsyn till kryp.



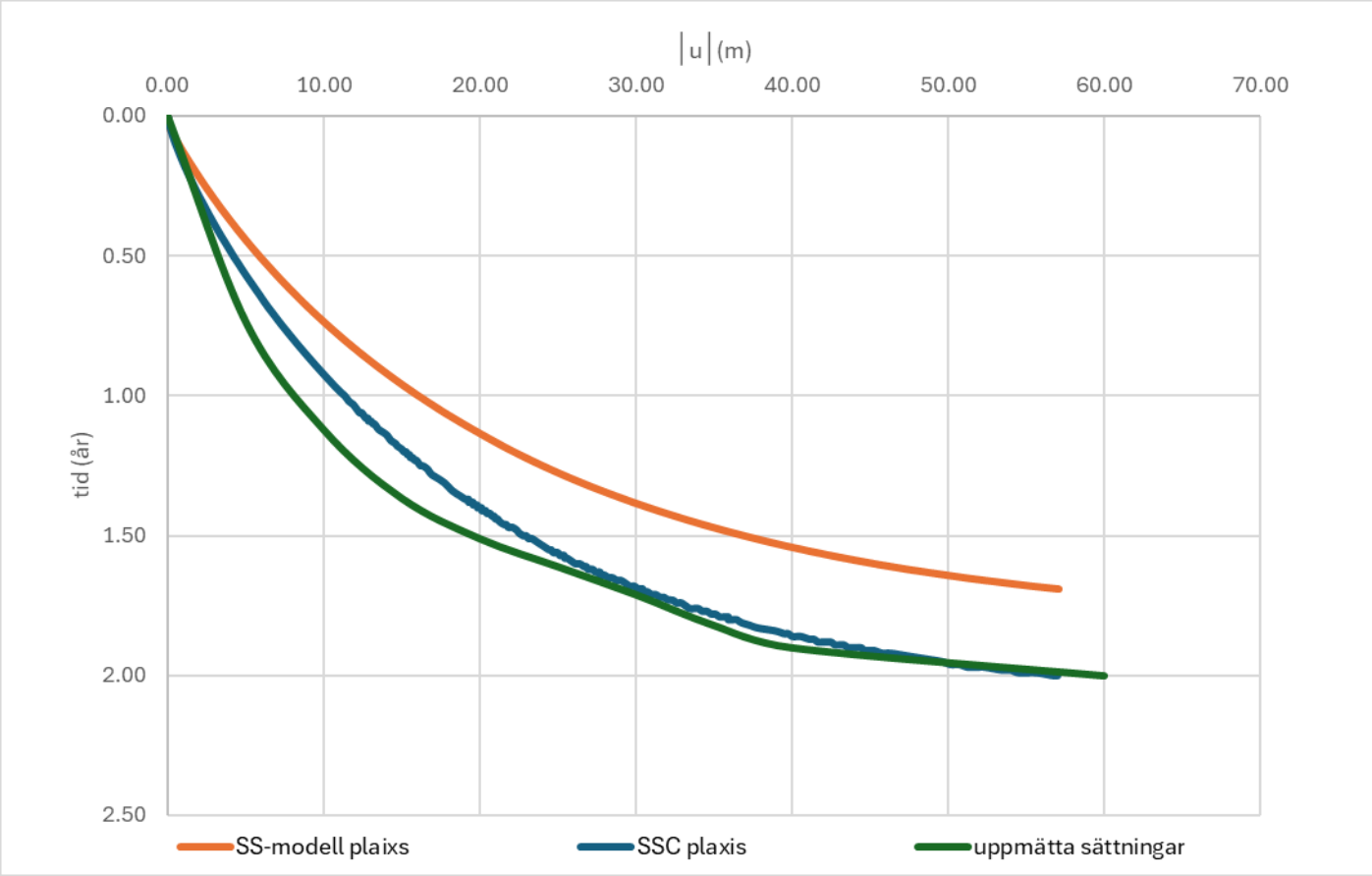
Figur 8.1: Jämförelse mellan sättningar med och utan kryp samt de uppmätta sättningarna i Lilla Mellösa.

Man kan se att de uppmätta sättningar var lite högre än totalasättningar som beräknades i denna rapport, detta kan tyda på mätosäkerhet och uppskattningsfel av grafer vid tolkning av CRS-försök. Eftersom de uppmätta sättningarna redovisades av Larsson år 2008 kan det finnas historiska orsaker, till exempel kan variationer i lagerföljd och grundvattennivå ha bidragit till större sättningar i verkligheten.
Det är dock viktigt att notera att de uppmätta värdarna är baserade på äldre mätdata Larsson (2008), vilket kan leda till osäkerhet i mätmetoder. Dessa faktorer kan påverka tillförlitligheten i jämförelse mellan beräknade och verkliga sättningar.

8.2 Resultat för Plaxis

Resultat för de totala sättningar efter 57 år, och 21 år, som beräknas med Soft Soil Creep-modellen i PLAXIS, visas i figur (8.3). Medan resultatet för de totala sättningarna efter 20 år visas i figur (8.4).
Enligt figurerna (8.3) och (8.4) uppgår de totala sättningar till cirka 1,4 m efter 20 år respektive 2 m efter 57 år.

En jämförelse mellan de erhållna resultaten i PLAXIS och de verkliga uppmätta värdena illustreras i figur (8.2). där syns det en avvikelse mellan de två diagrammen under de förstå 25 år, men efter denna tidpunkt stämmer resultaten väl överens.

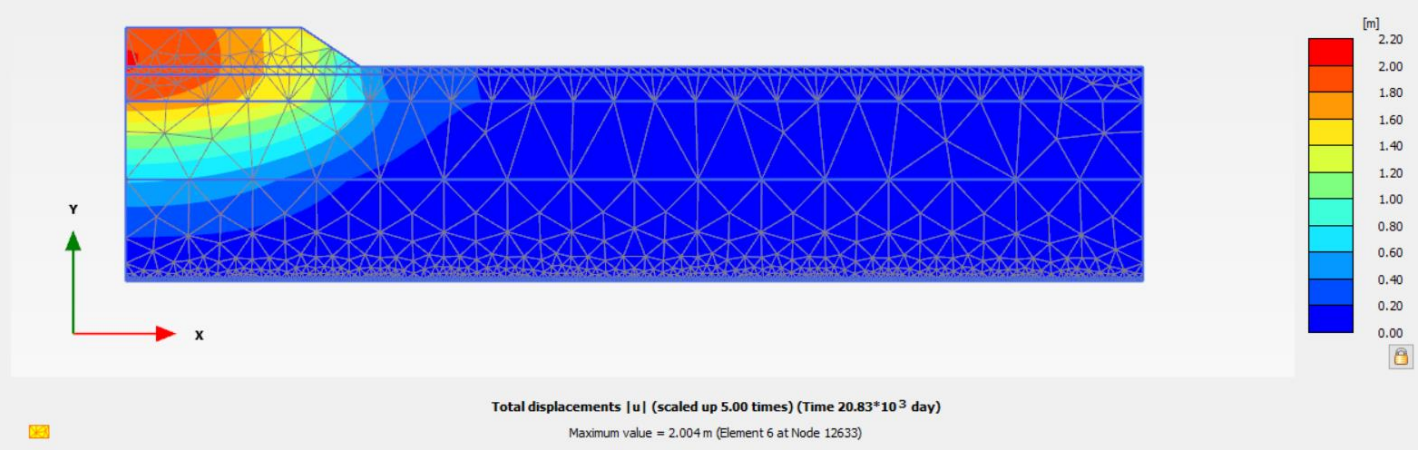


figur (8.2) Jämförelse mellan de beräknade deformationerna med SSC-modell och SS-modell i PLAXIS och de uppmätta deformationerna för den odränerade provfyllningen i Lilla Mellösa.

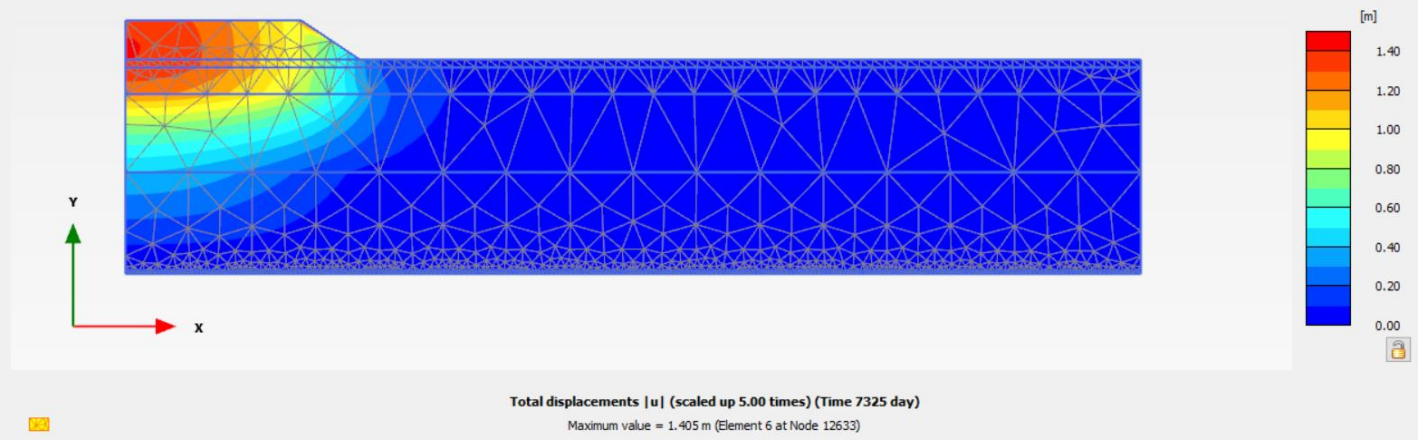
Efter att provfyllningen byggdes, beräknades sättningen till 0,062 m SSC-modellen och till 0,05 m med SS-modellen. Som figur 8.9 visar så visar att SSC-modellen visar en bra förmåga att fånga långtidsberoendesättningar. Medan SS-modellen avviker något av de uppmätta sättningarna. Sättningarna för 21 år och 57 år blev 1,4 m och 2 m respektive med SSC-modellen. Medan sättningarna med SS-modellen beräknades till 1,3 m och 1,6 m för 21 år och 57 år respektive. Jämförelsen mellan Plaxis resultaten och uppmätta sättningar visar att SSC-modellen fångar långtidsberoendesättningar med mer noggrannhet än SS-

modellen. Detta beror på att SSC-modellen tar hänsyn till sekundär konsolidering medan SS-modellen beräknar sättningarna utan att ta hänsyn till sekundärkonsolidering.

Efter att alla indata och parametrar justerades och beräknades med SSC-modellen i Plaxis hämtades totalsättningen för området, som visas i figur 8.3 efter 57 år och i figur 8.4 efter 20 år.



Figur 8.3 Totala sättningar simulerade med SSC-modellen i PLAXIS för den odränerade provfyllningen i Lilla Mellösa efter 57 år.



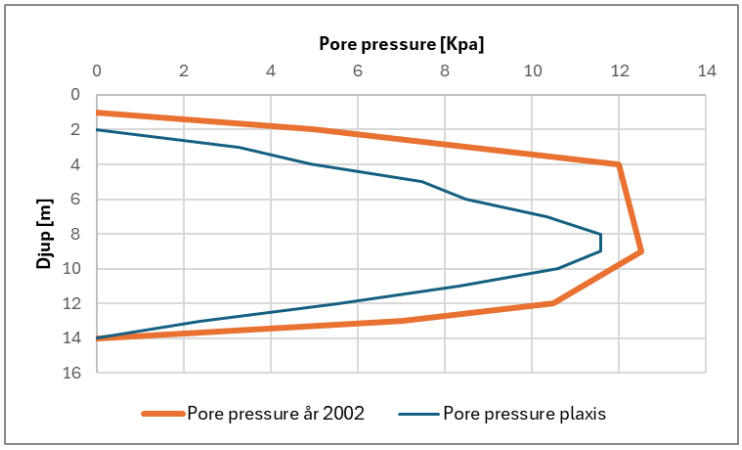
Figur 8.4 Totala sättningar simulerade med SSC-modellen i PLAXIS för den odränerade provfyllningen i Lilla Mellösa efter 20 år.

Det röda området i provfyllningen representerar det högsta värdet för sättningen i området. Alla indata för sättningen i området kalibrerades iterativt för att försöka fånga kompressionskurvan så bra som möjligt. Resultaten från Plaxis som visas i figur 8.3 och 8.4 representerar hur sättningen fördelar sig i jordlagret i området. Sättningen som beräknades i Plaxis med SSC-modellen och SS-modellen fördelars jämnt under provfyllningen i området.

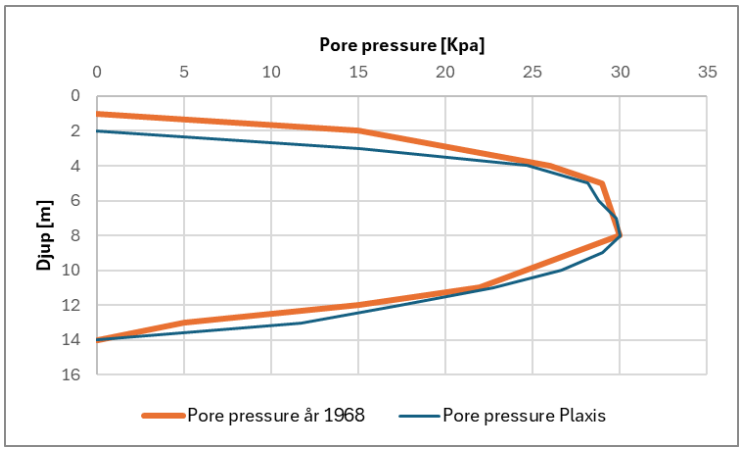
8.2.1 Porövertrycks jämförelse Plaxis

I figur 7.5 och 7.6 kan man se de uppmätta samt de beräknade porövertruck efter 21 år respektive 57 år, där de beräknade porövertryck togs fram med hjälp av Plaxis 2D. I både figurerna kan man se att de högsta porövertryck uppstår i de mellersta jordlagren.

I figur 8.5 redovisas porövertryck efter 57 år. Man kan se skillnad mellan modellensresultat och mätningar från 2002, modellresultaten visar ha mindre porövertryck än de uppmätta. Plaxis modellen underskattar porövertrycket i de mellersta lagren men den lyckas med att fånga upp formeln av tryckfördelningen. Anledningen till att Plaxis modellen visar mindre porövertryck än de uppmätta kan bero på att permabilitetren som användes i Plaxis inte är helt korrekta då värden för permeabilitet togs fram genom avläsning av grafer vilket kan vara en felkälla.



Figur 8.5: excess pore pressure mot djupet efter 57 år

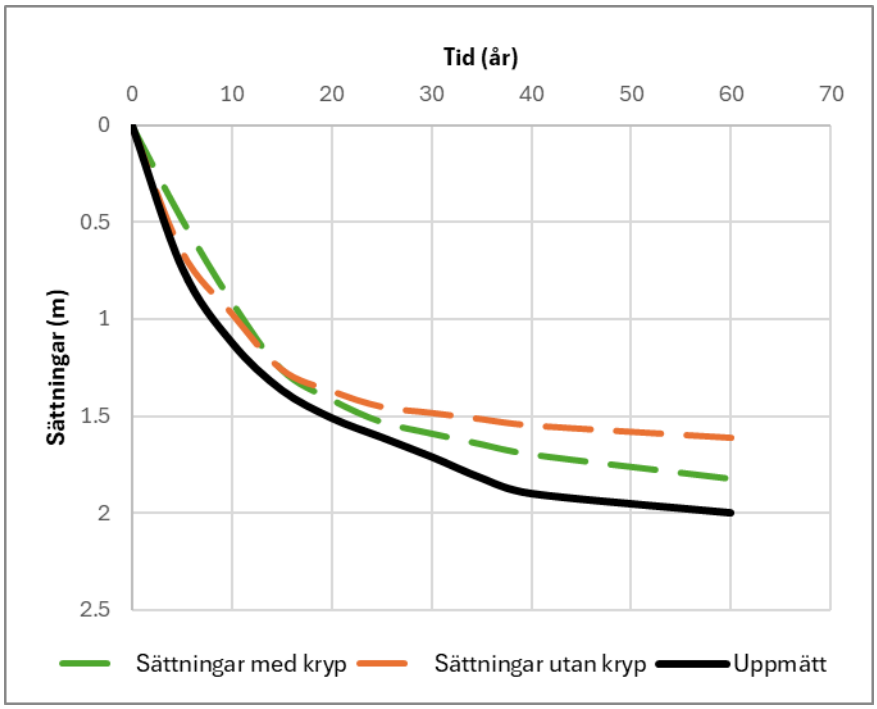


Figur 8.6: excess pore pressure mot djupet efter 21 år

I figur 8.6 visar Plaxis modellen en god överstämmelse med de uppmätta porövertrycken från 1968, speciellt i de mellersta jordlagren. Vissa avvikelse förekommer i de första och sista lagren men de kan också bero på läsningsfel av permeabilitet.

8.3 Resultat - handberäkning

I figur 8.7 nedan visas resultat för totalsättning med och utan hänsyn till kryp, samt de uppmätta sättningarna, efter att tungheter och förkonsolideringstrycket justerats. Man kan se att resultatet nu efter justeringen börjar närma sig de verkliga resultaten, vilket tyder på att justeringen av parametrarna har bidragit till en mer realistisk uppskattning av sättningen. Efter justeringen med de nya parametrarna uppnåddes en sättning på ca 1,61 m utan hänsyn till kryp, och 1,82 m med hänsyn till kryp, vilket närmar sig det uppmätta värdet.



Figur 8.7: Jämförelse mellan sättningar med och utan kryp samt de uppmätta sättningarna i Lilla Mellösa.

9 Diskussion

Detta arbete har jämfört handberäkningar och numeriska modellering i Plaxis 2D för att analysera sättningar i lös lera med fokus på krypning. Alla beräkningar som utförts baseras på geotekniska data från SGI:s fältförsök i området Lilla Mellösa. Beräkningarna utfördes först med initiala parametrar, därpå kalibrerades värden för både tungheter och förkonsolideringsstryck. Resultatet jämförs därefter med uppmätta sättningar från långtidsobservationer.

9.1 modellernas noggrannhet

Handberäkningar och Plaxis resultat initialt visade, utan hänsyn till krypning, en underskattning av verkliga sättningar. Den totala sättningen i handberäkningen beräknades till 1,37m utan kryp och 1,58 m med kryp. Plaxis simulations resultatet med soft soil creep (SSC) uppmätts till 1,4 m efter 21 år och till 2 m efter 57 år, vilket tyder på att sekundär konsolidering haft en stor påverkan på långtidssättningar.

Efter justeringen av parametrar, öka tungheter och sänka förkonsolideringsstryck, förbättrades noggrannheten av handberäkningar. Efter parameterjustering blev den totala sättningen med hänsyn till kryp 1,82 m för handberäkningen, som visar att modellens känslighet för parametrar är hög. Resultaten för handberäkningarna ligger inom 10% från de uppmätta sättningarna, som anses vara acceptabelt inom geotekniska modellering.

De två parametrarna som haft största påverkan på sättningarna var tunghet och förkonsolideringsstryck.

- Tunghet: en ökning i tunghet resulterade i högre spänningspåverkan och därpå större sättningar, både i Plaxis och handberäkningarna.
- Förkonsolideringsstryck: en sänkning i förkonsolideringsstryck resulterade i en ökning av den aktiva deformationen, som observerades genom att jorden gick från ett överkonsoliderat tillstånd till ett normalkonsoliderat tillstånd.

Parametrar som har haft en stor inverkan på Plaxis SSC-modellen är Ml, M0 och krypparametrar ($C\alpha$, μ *). Påverkan av dessa parametrar är mer komplex än tunghet och förkonsolideringsstryck. Dessa parametrar kalibrerades mot laboratoriedata från området kalibreringen utfördes med hjälp av kompressions modul och CRS-försök i Plaxis, där kalibrerades krypparametrarna iterativt för att överensstämma med uppmätta kompressions modul.

SSC-modellen visar bättre korrelation till den uppmätta sättningen, särskilt över längre tidsperioder. Det stämmer överens med de tidigare studier som visat att SSC-modellen är mer pålitlig vid långtidssimuleringar än modeller som inte tar hänsyn till krypning.

9.2 Handberäkning jämförts med numeriska modellering

Att utföra handberäkningarna enligt den svenska metoden är pedagogiskt och tydlig, däremot så bygger den starkt på antaganden som enbart vertikal belastning och 2:1 spänningsspridning. Det är en bra beräkningsmodell för översiktliga analyser, dock underskattar den effekterna av krypning.

Att beräkna genom att göra simulationer i Plaxis-2D med SSC-modellen ger en mer realistisk bild av markens beteende. Plaxis-2D programvaran är kapabel att hantera spänningsberoende krypning, den tar hänsyn till olika randvillkor och tillåter analyser av olika dräneringsförhållanden.

Däremot så kräver Plaxis en djup och avancerat förståelse av användaren, speciellt kring val och tolkning av parametrar. Det finns alltid risk med Plaxis gällande numeriska fel om modellen inte kalibreras korrekt.

9.3 modellbegränsningar

Plaxis SSC-modellen, SS-modellen samt handberäkningsmodellen bygger på vissa antaganden. Ett antagande är materialets isotropi, som är ofta en förenkling, speciellt i naturliga sedimenterade leror som visar strukturella effekter och anisotropi. ACM och n-SAK-modellerna tar det i hänsyn, dock kräver det mer komplex parameterisering. Permeabilitetens osäkerheter kan vara en annan begränsning. I arbetet bestämdes k-värden genom avläsning av CRS-data, vilket är en förenklad approximation. Permeabilitetsosäkerheter kan ha påverkat att SSC-modellen underskattade porövertryck i beräkningarna efter 57 år.

Dessa kan påverka resultatet av beräknade sättningar i modellerna jämförts med uppmätta sättningar, speciellt vid längre konsolideringstider.

9.4 bedömning av mätdata

Alla uppmätta värden baserades på flera olika mätningar från 1945 till 2002. Vissa mätpunkter kan ha varit inaktiva delar av tiden (Larsson, 1986), och variationer i de olika vattennivåer, fuktinnehåll och klimatförhållanden kan ha haft en påverkan på de uppmätta data. Det finns också vissa osäkerheter i tolkningen och avläsningen av CRS-kurvor.

10 slutsatser

Kandidatarbetet syftar till att öka förståelsen för sättningar i lös lera med hänsyn till krypning, och att jämföra beräknade resultat från handberäkningar och numeriska modellering i Plaxis-2D med verkliga mätdata från provfyllningen i området. Genom att utföra en litteraturstudie och att analysera och kalibrerar parametrarna har följande slutsatser uppnåtts

Resultaten som uppnås i modellerna som tar hänsyn till sekundärkonsolidering såsom SSC-modellen, återger de långtidsberoendesättningarna bättre än modeller som endast bygger på primärkonsolidering. Detta visas genom att SSC-modellen haft sättningar nära 2 meter efter 57 år som stämmer överens med den uppmätta sättningen i samma tidsförlopp, däremot så har handberäkningen underskattat den totala deformationen.

Sättningsresultaten är känslig för förändringar i de geotekniska parametrarna, som tungheter, förkonsolideringsstryck och krypparametrar. Dessa parametrar har en stor påverkan på resultatets noggrannhet.

Genom att använda Axi-symmetrisk geometri i Plaxis-2D utfördes en mer realistisk simulation av spänningsfördelningen samt deformationen, jämfört med plan-Strain-modeller.

Handberäkningen är användbar för de initiala uppskattningarna, däremot så underskattar den sättningarna, särskilt efter längre tid. Det beror huvudsakligen på att sekundärkonsolidering inte beaktas och att det finns mer förenklade antaganden om materialbeteende och spänningsspridning.

Resultaten pekar på att SSC-modellen i Plaxis är den mest lämpliga metoden för att beräkna och simulera sättningar i lös lera, dock måste indata och parametrar justeras och kalibreras korrekt mot laborations och fältförsök för att modellen ska anses pålitlig för långtidsberoendesättningar i lös lera.

Referenser

Bentley Systems. (2024). *PLAXIS 2D 2024.1 Material Models Manual*.

Bentley Systems. (u.å.). *PLAXIS 2D*. [Produktdatablad].

Chang, Y.C.E. (1981): Long term consolidation beneath the test fills at Väsby, Sweden. Swedish Geotechnical Institute Report 13, Linköping, Sweden.

Claesson, P. (2003): Long term settlements in soft clays. Ph.D. thesis, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

Craig, R.F. (2004): Craig's Soil Mechanics. Spon Press, Great Britain.

Knappett, JA. Craig, RF. (2012). Craig´s soil mechaniks , New York

Larsson, R. (1986). Consolidation of soft soils, Rapport 29, SGI – Statens geotekniska institut, Linköping.

Larsson, R. (2008). Jords egenskaper, Information 1, SGI – Statens geotekniska institut, Linköping.

Larsson, R. (2007). Långtidsobservationer av konsolideringsprocesser, Rapport 70, SGI – Statens geotekniska institut, Linköping.

Larsson, R. och Åhnberg, H. (1986). Utvärdering av skjuvhållfasthet och förkonsolideringsstryck från vingförsök, CPT-sondering och dilatometerförsök, SGI – Statens geotekniska institut, Linköping.

Olsson, Mats. (2010). Calculating long-term settlement in soft clays – with special focus on the Gothenburg region, Rapport 74, SGI - Statens geotekniska institut, Linköping.

Plaxis bv., 2012b, PLAXIS 2D 2012 - Reference Manual, The Netherlands

Plaxis version 8 , Material Model Manual

SGU. (2020a). *Från istid till nutid*.

SGU. (2020b). *Inlandsisen*.

SGU. (2020c). *Glaciala finkorniga sediment*.