



CHALMERS

Massundanträngningens tillbakagång

En FE-analys av primär konsolidering till följd av pålning i lera

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik

HENRIK LANDERGEN
JON WEIHARD

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Examensarbete ACEx20-19-42
Göteborg 2019

EXAMENSARBETE ACEX2019:42

Massundanträngningens tillbakagång

En FE-analys av primär konsolidering till följd av pålning i lera

HENRIK LANDERGEN

JON WEIHARD



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för geologi och geoteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2019

Massundanträngningens tillbakagång
En FE-analys av primär konsolidering till följd av pålning i lera
HENRIK LANDERGREN
JON WEIHARD

© HENRIK LANDERGREN, JON WEIHARD, 2019.

Handledare/examinator: Mats Karlsson, Chalmers, Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Handledare: Leif Jendeby, Cowi.
Examensarbete ACEX20-19-42
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för geologi och geoteknik
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telephone +46 31 772 1000

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Göteborg 2019

Massundanträngningens tillbakagång
En FE-analys av primär konsolidering till följd av pålning i lera
Henrik Landergren
Jon Weihard
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnad
Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Massundanträngning är ett resultat av att stora volymer pålar trycks ned i marken vilket leder till förskjutning av jordmassor i omgivande mark. Förskjutningen innebär markrörelser, horisontellt och vertikalt, som i sin tur leder till porövertryck. Denna rapport syftar till att undersöka hur primär konsolidering leder till massundanträngningens tillbakagång. Studien utförs genom en FE-analys i Plaxis 2D. Initialt genomförs en förbestämd linjeförskjutning, motsvarande den teoretiska pålvolymer, enligt Cavity expansion method (CEM), varefter konsolidering tillåts tills att porövertrycket understiger 1 kPa. Jordmodellerna som används i Plaxis 2D är Soft soil och Modified cam clay (MCC). För att värdera rimligheten ur FE-analysens resultat genomförs även analytiska beräkningar av den initiala massundanträngningen med Sagasetas samt Hellman/Rehnmans metoder. Studien visar att sidorörelserna är större än hävningen. Den slutgiltiga konsolideringen beräknas ta över 60 år, på grund av den mäktiga lerans låga permeabilitet. Hävningen går delvis tillbaka medan inga resultat visar på en lateral tillbakagång under konsolideringen.

Nyckelord: Massundanträngning, lera, konsolidering, hävning, FEM, Plaxis 2D, Soft soil, Modified cam clay, Sagasetametoden, Hellman/Rehman.

Reversion of the Mass Displacement
A FE-Analysis of Primary Consolidation due to Piling in Clay
Henrik Landergren
Jon Weihard
Division of Geology and Geotechnics
Chalmers University of Technology

Abstract

Mass displacement is a result of the added volume due to piling in clay, which leads to vertical and horizontal movements that also induces excess pore water pressure. This report aims to evaluate how primary consolidation leads to a reversion of mass displacement. A finite element analysis is executed in Plaxis 2D. Initially a line displacement is prescribed according to Cavity Expansion Method (CEM) which is based on the theoretical volume of piles. Lastly consolidation phases are carried out until the excess pore water pressure is below 1 kPa. The soil models applied in Plaxis is the Soft soil model and Modified cam clay (MCC). To assess the validity of the FE analysis the results are compared with analytic results by Sagaseta and Hellman/Rehman methods. The study displays that the initial lateral movements are greater than the vertical. The final consolidation is expected to proceed for about 60 years, due to the low permeability of the clay. The consolidation makes the heave reverse for some extent while the lateral movement is not affected much by the primary consolidation.

The report is written in Swedish.

Keywords: Mass displacement, clay, consolidation, heave, FEM, Plaxis 2D, Soft soil, Modified cam clay.

Förord

Denna rapport är en del av författarnas examensarbete om 15 högskolepoäng på Samhällsbyggnadsteknik (180 hp). Arbetet har utförts vid institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, avdelningen för geologi och geoteknik. Idén för examensarbetet utvecklades tillsammans med Leif Jendeby på COWI som också har varit handledande under arbetets process. Från Chalmers sida har Mats Karlsson varit handledare och examinator. Vi vill tacka våra handledare Leif Jendeby och Mats Karlsson för hjälpen under arbetets gång samt COWI för möjligheten att skriva vårt examensarbete i samarbete med dem.

Göteborg, Juni 2019
Henrik Landergren
Jon Weihard

Innehåll

Figurer	xi
Tabeller	xiii
1 Introduktion	1
1.1 Syfte	2
1.2 Mål	2
1.3 Begränsningar	2
2 Teori	3
2.1 Pålår	3
2.1.1 Massundanträngande pålår	3
2.2 Massundanträngning vid pålning	3
2.3 Konsolidering	4
2.4 Hellman/Rehnman	4
2.5 Strain path method (SPM)	5
2.6 Finita Elementmetoden (FEM)	6
2.6.1 Plane strain	6
2.6.2 Axisymmetrisk	6
2.6.3 Cavity expansion method (CEM)	7
2.7 Tidigare studier	7
3 Metod	9
3.1 Område och påltyp	9
3.2 Hellman/Rehnman	10
3.3 Strain path method (SPM)	10
3.4 Plaxis 2D	11
3.4.1 Jordmodeller	11
3.4.2 Plaxismodell	13
3.4.3 Jordegenskaper	14
3.4.4 Beräkningar	15
3.5 Undanträngd volym	15
4 Resultat och diskussion	17
4.1 Hävning	19
4.2 Sidorörelser	22
4.3 Känslighetsanalys	25

4.4	Jämförelse med förskjutning av Götaälvsbron	28
4.5	Hävningen och sidorörelsernas samband med undanträngd volym	29
4.6	Svagheter	29
5	Slutsatser och vidare undersökningar	31
	Referenser	32
A	Appendix	I

Figurer

2.1	Geometri, Sagasetametoden	6
2.2	Geometrier för 2D-modellering	7
3.1	Planvy över teoretiskt pålområde.	10
3.2	Flytytan för MCC i p'-q-planet	12
3.3	Modell i Plaxis 2D.	13
3.4	Modell med mesh	14
3.5	Hävningsvolym	16
3.6	Sidoförskjuten volym	16
4.1	Hävning vid markytan efter initiala förskjutningar.	18
4.2	Hävning vid markytan efter initiala förskjutningar, avstånd normaliserat mot pållängd.	18
4.3	Hävning vid markytan enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D.	19
4.4	Hävning vid markytan enligt Soft soil-modell, avstånd normaliserat mot pållängd.	20
4.5	Hävning vid markytan över tid enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D.	21
4.6	Hävning vid markytan över tid, logaritmisk skala, enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D.	21
4.7	Förskjutning i horisontalld, 20 meter från pålområdet, enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D.	23
4.8	Förskjutning i horisontalld, 40 meter från pålområdet, enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D.	24
4.9	Förskjutning i horisontalld, 60 meter från pålområdet, enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D.	24
4.10	Hävning vid markytan enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D . Beräknat med dubblerad permeabilitet.	26
4.11	Förskjutning i horisontalld, 40 meter ifrån pålområdet enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D. Beräknat med dubblerad permeabilitet.	26
4.12	Hävning vid markytan enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D. Beräknat med dubbel styvhet.	27
4.13	Förskjutning i horisontalld, 40 meter ifrån pålområdet enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D. Beräknat med dubbel styvhet.	27
4.14	Horisontalförskjutningar i mm uppmätta vid Götaälvbron stöd 27	28
A.1	Hävning vid markytan enligt MCC-modell i Plaxis 2D.	II

A.2	Förskjutning i horisontalled, 20 meter ifrån pålområdet, enligt MCC-modell i Plaxis 2D.	III
A.3	Förskjutning i horisontalled, 40 meter ifrån pålområdet, enligt MCC-modell i Plaxis 2D.	IV
A.4	Förskjutning i horisontalled, 60 meter ifrån pålområdet, enligt MCC-modell i Plaxis 2D.	V
A.5	Portryck över tid i nod (20,-20) enligt Soft-soil modell i Plaxis 2D.	VI

Tabeller

3.1	Indata, Sagasetametoden	11
3.2	Basparametrar för MCC i Plaxis 2D (Brinkgreve et al., 2019a).	12
3.3	Basparametrar för Soft soil i Plaxis 2D (Brinkgreve et al., 2019a).	12
3.4	Jordegenskaper för Soft soil-modell i Plaxis 2D (T. Wood, 2014).	14
3.5	Beräkningsfaser i Plaxis 2D	15
4.1	Undanträngda volymer	29

Beteckningar

Teori

σ	Totalspänning
σ'	Effektivspänning
u	Portryck
SP2	Standardpåle 2
SP3	Standardpåle 3

Hellman/Rehman

x	Hävningen inom pålningsområdet
η	Hävningfaktor
$V_{\text{pålar}}$	Volymen av nedslagna pålar
$V_{\text{lerproppar}}$	Volymen av proppdragen lera
αx	Hävningen närmast pålområdet med mothållande faktorer
βx	Hävningen närmast pålområdet med mothållande faktorer
γx	Hävningen närmast pålområdet med mothållande faktorer
δx	Hävningen närmast pålområdet med mothållande faktorer
d	Pållängden
b	Pålningsområdets bredd
l	Pålningsområdets längd

Sagaseta

SPM	Strain path method
δ_x	Sidoförskjutning
δ_r	Sidoförskjutning, radiell markrörelse
δ_z	Hävning
δ_x	Sidoförskjutning
$2W$	Väggens tjocklek
R	Superpålens radie
r	Radiella avståndet från pålen
L	Pålens längd

Plaxis

FEM	Finita elementmetoden
CEM	Cavity expansion method
r	Resulterande massundanträngning i horisontalled
a_0	Initial förskjutning
a_f	Slutgiltig förskjutning
q	Deviatorspänning
M	Kritiska brottlinjens tangent
p'	Medeleffektivspänning
f	Flyta
p_p	Förkonsolideringstryck
φ'	Friktionsvinkel
ν_{ur}	Poissons tal
κ	Cam-Clay swelling index
λ	Cam-Clay kompressionsindex
e_{init}	Initiell porvolym
λ'	Modifierat kompressionsindex
κ'	Modifierat swelling index
c	Effektiv kohesion
Φ	Friktionsvinkel
Ψ	Dilationsvinkel
γ_{unsat}	Tunghet
γ_{sat}	Tunghet
$K0_x$	Jordtryckskoefficient
$K0_z$	Jordtryckskoefficient
k_x	Horisontell permeabilitet
k_y	Vertikal permeabilitet
x_{max}	Plaxismodellens maximalla x-värde
x_{min}	Plaxismodellens minsta x-värde
y_{max}	Plaxismodellens maximalla y-värde
y_{min}	Plaxismodellens minsta y-värde

1

Introduktion

Men ökad urbanisering följer en förtätning av dagens städer. Nya platser, som tidigare har bedömts som för svåra att bygga på, blir plötsligt aktuella för bostäder och affärslokaler. I en önskan att få ut så mycket användbar bo- eller lokalyta per markyta som möjligt siktar beslutsfattarna mot stjärnorna och låter nya byggnader sträcka sig allt högre. I städer som till exempel Göteborg är det vanligt att stora konstruktioner placeras på ett mäktigt lager med lös lera.

För att undvika sättningar och säkra stabiliteten används stora mängder pålar. En lösning som, i vissa fall, leder till svåra och dyra följdproblem. Den nedtryckta pålvolymer ger motsvarande massundanträngningar, i form av hävning och sidorörelser, av omkringliggande lera. Fenomenet har behandlats i många rapporter tidigare (bl.a. Edstam, 2011; C. Sagaseta, Whittle, & Santagata, 1997; César Sagaseta & Whittle, 2001) Men färre har närmare undersökt konsolideringsförloppet.

Det här examensarbetet fokuserar på ut hur massundanträngningens eventuella tillbakagång kan simuleras i det finita elementprogrammet Plaxis 2D. Genom att simulera pålningsförloppet följt av en konsolidering är förhoppningen att kunna klargöra hur stor del av massundanträngningen som går tillbaka. En viktig fråga är också i vilken riktning tillbakagång sker – är det endast den vertikala hävningen som återgår eller kommer jorden även röra sig tillbaka lateralt mot pålen?

En djupare kunskap om massundanträngningens eventuella tillbakagång skulle vara till stor nytta vid beslutsfattande om till exempel planering av pålning och skyddsåtgärder för omkringliggande infrastruktur.

1.1 Syfte

Det här examensarbetets syfte är att undersöka om, när och i vilken utsträckning massundanträngningen återgår efter pålning i lösa och mäktiga leror, liknande de som finns i stor utsträckning inom Göteborgsområdet.

1.2 Mål

För att uppnå examensarbetets syfte krävs att följande mål uppfylls:

1. Modellera en initiell massundanträngning.
2. Analysera hur primär konsolidering påverkar markrörelser i riktning, storlek och tid.

För att uppnå dessa mål krävs det att examensarbetet:

- Gör relevanta kopplingar mellan teori, modell och verklighet.
- Väljer en lämplig beräkningsmodell som kan appliceras i Plaxis 2D och som fångar massundanträngningens samt konsolideringens viktigaste drag på ett tillfredsställande sätt.

1.3 Begränsningar

Det här examensarbetet begränsas till att undersöka massundanträngningen och dess tillbakagång i lera som är typisk för Göteborgsområdet. Rapporten fokuserar på trenden för i vilken riktning och utsträckning tillbakagången sker snarare än massundanträngningens storlek. Eftersom rapporten handlar om att fånga förloppets karaktäristik genomförs flera generaliseringar och det exakta resultatet valideras inte resultatet från FE-analysen med några fältmätningar från pålområden.

2

Teori

Inledningen av det här kapitlet avhandlar grundläggande teori om pålning, dess påverkan på omgivningen och konsolideringsteori. I avsnitt 2.4, 2.5 och 2.6 presenteras olika beräkningsmetoder, både analytiska och numeriska, för att förutse massundanträngningen som sker vid pålning. För att förenkla beräkningarna kan en superpåle representera de pålar som finns i det område som är intressant, där tvärsnittsarean av superpålen ska motsvara summan av tvärsnittsareorna på de pålar superpålen ska representera (Edstam, 2011). Avslutningsvis återfinns en kort genomgång av tidigare studier med fokus på massundanträngningens tillbakagång.

2.1 Pålar

Pålning är en grundläggningsmetod som används i lösa jordar för att fördela lasten till ett djupare lager eller fördela lasten genom hela pålens längd till jorden. Det sistnämnda är så kallade mantelburna friktions eller kohesionspålar, i lera bildas kohesion mellan pålen och leran som bildar en motstående kraft mot pålens kraft nedåt i marken. Pålar som fördelar lasten på ett mer bärighetskraftigt material såsom sand eller berg kallas ändbärande pålar.

2.1.1 Massundanträngande pålar

Massundanträngande pålar förskjuter jorden lateralt när pålen drivs ner i marken (Azizi, 2000). Storleken på pålens tvärsektionsarea är betydande för hur stor förskjutning som sker, eftersom det är pålens adderade volym till marken som påverkar massundanträngningen. Av det totala antalet meter pålar som installerades i Sverige 2017 var 54 % gjorda i betong (Pålkommissionen, 2018). Av dessa var 58 % av typ SP2 eller SP3 vilka är kvadratiska och har sidorna 270-275 mm.

2.2 Massundanträngning vid pålning

Vid extensiv pålning så sker en betydande tillförsel av volym i jorden vilket kan leda till att marken förflyttas lateralt och vertikalt (Edstam, 2012). I denna rapport benämns den laterala förskjutningen som sidorörelse och den vertikala som hävning. Då jorden har en så låg permeabilitet att odränerade förhållanden gäller skapas en portrycksökning av att totalspänningen förändras vid påslagning (Johansson & Jendeby, 1998). En portrycksökning lika stor som ökningen av totalspänningen ger att effektivspänningen förblir oför-

ändrad enligt Terzaghis ekvation (2.1).

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.1)$$

Där σ' är effektivspänningen, σ totalspänningen och u portrycket.

2.3 Konsolidering

Konsolidering kallas den volymminskning som beror på vattenavgång (Sällfors, 2013). Den kan ske momentant men om jordens permeabilitet är låg så fördröjs förloppet. Vattenavgången sker när det uppstår ett porövertryck i jorden. När porvattnet dräneras går porövertrycket mot noll. Avgörande för hur lång tid utjämningen av porövertrycket tar är mängden vatten som ska dräneras, avståndet till dränerande lager, jordens permeabilitet och den hydrauliska gradienten som kan härledas till Darcys lag. Det innebär att om övriga faktorer är lika förväntas det scenario med högst porövertrycksskillnad konsolidera snabbare. Enligt Terzaghis ekvation (2.1) leder det minskade portrycket till en högre effektivspänning och jorden deformeras.

Utöver den primära konsolideringen, som beskrivs ovan, finns två effekter som kan leda till jorddeformationer efter pålning. Sekundär konsolidering eller krypning kallas volymminskningen som fortsätter efter att porövertrycket utjämnats, den beror på omjustering av jordens kornstruktur. Under pålning kommer skjuvhållfastheten närmast pålningområdet minska på grund av den störning och omformning som sker av jorden (Abu-Farsakh, Rosti, & Souri, 2015). Efter avslutad pålning återgår, oberoende av vattenkvot och porositet, jordens skjuvhållfasthet mot den ursprungliga. Den geokemiska processen kallas tixotropi och är oberoende av eventuell konsolidering.

2.4 Hellman/Rehman

Hellman/Rehman metoden är en handberäkningsmetod som används i Sverige för att beräkna hävningar och horisontella rörelser i jorden. Metoden begränsar det påverkade området till att sträcka sig en pållängd horisontellt ifrån pålen. Hävningen beräknas enligt ekvation (2.2) och kan även användas för att beräkna sidorörelsen.

$$x = \frac{\eta(V_{plar} - V_{lerproppar})}{d \left[(\alpha + \beta) \left(\frac{l}{2} + \frac{d}{3} \right) + (\gamma + \delta) \left(\frac{b}{2} + \frac{d}{3} \right) + \frac{b \cdot l}{d} \right]} \quad (2.2)$$

Där:

x	=	Hävningen inom pålområdet
η	=	Hävningfaktor
$V_{\text{pålar}}$	=	Volymen av nedslagna pålar
$V_{\text{lerproppar}}$	=	Volymen av proppdragen lera
αx	=	Hävningen närmast pålområdet med mothållande faktorer
βx	=	Hävningen närmast pålområdet med mothållande faktorer
γx	=	Hävningen närmast pålområdet med mothållande faktorer
δx	=	Hävningen närmast pålområdet med mothållande faktorer
d	=	Pållängden
b	=	Pålningens bredd
l	=	Pålningens längd

2.5 Strain path method (SPM)

Strain path method (SPM) är en analytisk metod som används för att förutse deformationer i jorden vid djupa installationer i marken (Baligh, 2008). Den bygger på att jordens deformationer och töjningar är oberoende av skjuvhållfastheten. Spänningar och portryck kan sedan approximeras med lämplig jordrespons och jämviktsekvationer. En metod för att beräkna massundanträngningens påverkan i jorden är Sagasetas metod som baseras på SPM (C. Sagaset et al., 1997). Sagaset et al. (1997) presenterar beräkningsgångar för olika geometrier enligt Figur 2.1. För Simple wall-geometrin förenklas beräkningen vid markytan för sidorörelse respektive hävning enligt ekvation (2.3) och (2.4). För Simple pile-geometrin visar ekvation (2.5) och (2.6) beräkningsgång för radiell förskjutning vid markytan respektive hävning vid markytan.

$$\delta_x = 2 \frac{W}{\pi} \arctan \left(\frac{L}{x} \right) \quad (2.3)$$

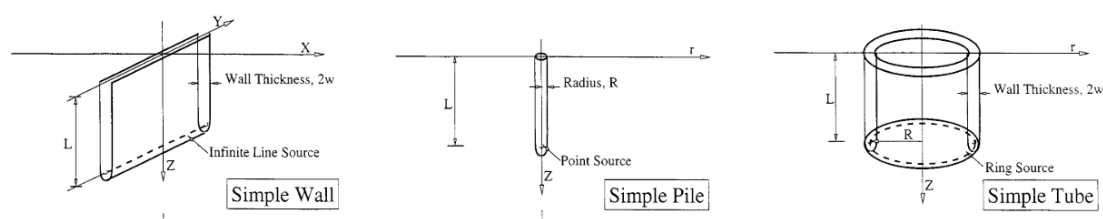
$$\delta_z = -\frac{W}{\pi} \ln \left(1 + \frac{L}{x^2} \right) \quad (2.4)$$

$$\delta_r = \frac{R^2}{2} \frac{L}{r \sqrt{r^2 + L^2}} \quad (2.5)$$

$$\delta_z = -\frac{R^2}{2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + L^2}} \right) \quad (2.6)$$

Där:

δ_x	=	Sidoförskjutning
δ_r	=	Sidoförskjutning (radiell markrörelse)
δ_z	=	Hävning (vertikal markrörelse)
$2W$	=	Väggens tjocklek.
R	=	Superpålens radie
r	=	Radiella avståndet från pålen
L	=	Pålens längd
x	=	Horisontella avståndet från pålområdet



Figur 2.1: Geometri (Modifierad från Sagaseta et al., 1997).

2.6 Finita Elementmetoden (FEM)

Finita elementmetoden (FEM) är ett mycket kraftfullt sätt att lösa komplexa problem, som till exempel lokalt varierande spännings-töjningsförhållanden, inom geotekniken (Azizi, 2000). Jordmodellen delas upp i olika finita element som knyts samman med noder. Sedan sker beräkningarna elementvis samtidigt som den interpolära påverkan tas i beaktning. Med hjälp av globala randvillkor kan sedan de okända variablerna lösas med hjälp av matriser. Vid användning av FEM är det viktigt att modell och randvillkor väljs med eftertanke för att kunna upptäcka eventuellt avvikande resultat. Resultatet från en FE-analys blir aldrig bättre än kvaliteten på parametrarna och modellen som den byggs på. Ofta måste en avvägning göras mellan beräkningstid och vikten av exakta resultat.

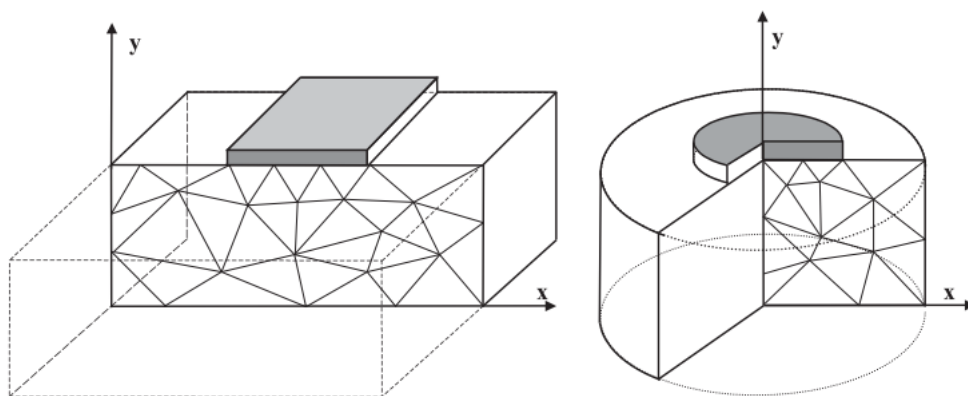
För en FE-analys kan fallet antingen modelleras i 2D eller 3D. Arbetet som krävs för att skapa en 3D modell är ofta mångdubbelt större (Lees, 2016). För att spara tid kan 2D-modellering med fördel användas om förenklingen inte har för stor påverkan på resultaten. Två vanliga FE-program som används för att lösa geotekniska problem är Plaxis 2D och Plaxis 3D. I den här rapporten används uteslutande Plaxis 2D.

2.6.1 Plane strain

För analys av modeller med en enhetlig vertikal tvärsnitt så lämpar sig plane strain antagandet väl. Då skapas ett plan ur den vertikala tvärsnittet. Dimensionen rätvinkligt ifrån planet i antas inte ha töjningar eller deformationer och därför heller inga spänningar. 2D plane strain simulerar 3D genom att helt enkelt förlänga sektionen rätvinkligt mot planet som de två dimensionerna bygger upp, se Figur 2.2. En förutsättning för att Plane strain ska lämpa sig väl, är att geometrin av det modellerade området är enhetligt i längsriktning samt sträcka sig så långt att ändarna inte har för stor påverkan på modellen. Det är inte bara konstruktionen som måste vara enhetlig i längsriktning utan även jordegenskaperna måste vara det.

2.6.2 Axisymmetrisk

En axisymmetrisk modell bygger också den upp ett plan i 2 dimensioner, men där tvärsnittet ska vara symmetriskt mot en horisontell axel som sektionen kan rotera 360° för att visualisera den tredimensionella form som antagandet simulerar, se Figur 2.2. Töjningar och deformationer rätvinkligt mot planet förmodas även i en axisymmetrisk modell vara noll.



Figur 2.2: Plane strain modell till vänster, axisymmetrisk modell till höger (Brinkgreve, Kumarawamy, Swolfs, Zampich, & Manoj, 2019c)

2.6.3 Cavity expansion method (CEM)

En lämplig metod att använda för att simulera påldrivning och massundanträngningen som följer är Cavity expansion method (CEM) (Abu-Farsakh et al., 2015; Carter, Randolph, & Wroth, 1979; Castro & Karstunen, 2010). Det verkliga pålningsförloppet kan liknas vid att en hålighet med radien noll som utvidgas till radien r , motsvarande den tillförda pålvolumen. Men för att kunna genomföra beräkningarna med finita elementmetoden krävs en initial hålighet med radien a_0 som beräknas enligt ekvation (2.7) (Carter et al., 1979).

$$r = a_0 \cdot \sqrt{3} \quad (2.7)$$

Carter et al. (1979) visar att en fördubbling av a_0 ger ett scenario som i det närmaste uppfyller den verkliga spänningsökning som sker vid pålning, se ekvation (3.7). Något som senare har bekräftats av flera numeriska studier (bl.a. Shien, 2013). Shiens studie visar även på vikten av att avståndet till randgränserna är väl tilltagna för att inte få ett förvrängt resultat. Det betonas även av bland annat Castro och Karstunen (2010). I Plaxis kan CEM genomföras med hjälp av en förbestämmd linjeförskjutning, vilket Castro och Karstunen pekar ut som överlägset framför andra möjligheter som till exempel en procentuell volymökning, i x-led av storleken a_0 för att uppnå en slutgiltig hålighet med radien a_f .

$$a_f = 2 \cdot a_0 \quad (2.8)$$

2.7 Tidigare studier

Genom åren har en rad forskare försökt fånga och beskriva effekterna vid pålning i lera. Tidigare i den rapport har ett par analytiska metoder för att förutse massundanträngning vid pålning i lera beskrivits. I takt med kraftigare datorer och förfinad mjukvara har FE-analyser blivit allt vanligare. I Göteborg genomförde Edstam (2011, 2012) jämförande

studier mellan analytiska metoder och FE-analyser i Plaxis 3D. Hans slutsats är att FE-analys är överlägset för att träffsäkert förutse både hävning och sidorörelser men att Sagasetametoden (Sagaseta et al., 1997) med fördel kan användas för en överslagsberäkning i fall där trenden är viktigare än den exakta precisionen. Framför allt överskattar Sagasetametoden och Hellman/Rehman-metoden kraftigt hävningen nära påloområdet.

Även om massundanträngning vid pålning i lera är ett relativt välutforskat område är rapporterna som fokuserar på konsolideringen efter betydligt färre. Abu-Farsakh et al. (2015) har genomfört en numerisk modellering av påldrivning i FE-mjukvaran Abaqus. Med en initial volymetrisk CEM som följs av vertikal skjuvning uppnås ett resultat som beskriver det verkliga förloppet efter pålning på ett träffsäkert sätt. Författarna konstaterar dock att tixotropiska effekter också måste ta i beaktning för att fånga hela konsolideringsförloppet. Flera publicerade artiklar (bl.a. Castro & Karstunen, 2010; Sexton & McCabe, 2014) presenterar metoder för att fånga konsolideringen och dess effekter efter installation av stenpelare, ett förlopp som kan liknas vid pålning bortsett från den tydliga dräneringseffekten som inte finns vid massundanträngande pålning. Sammanfattningsvis visar studierna att pålningen kan simuleras med CEM-metoden genom en linjeförskjutning. Resultatet av konsolideringen är svårare att värdera på grund av de skilda dräneringsförutsättningarna.

Konsolideringen efter pålning är ofta tidskrävande och de långtgående studierna i fält med fokus på ämnet är få. Pestana, Hunt, & Bray (2002) har tagit fram mätresultat på hur portrycket och de radiella sidorörelserna påverkas efter pålning i normalkonsoliderad lera vid San Franciscobukten. Studien visar att de med inklinometer uppmätta initiala sidoförskjutningarna stämmer väl överens med CEM-beräkningarna. Sedan sker en viss tillbakagång av de laterala förskjutningarna i takt med att porövertrycket minskar. Som mest är tillbakagången, på vissa djup i mätpunkten närmast pålen, cirka 25 %. (Pestana et al., 2002).

3

Metod

I detta kapitel redovisas vilka förutsättningar som gäller och de antaganden som har gjorts för att kunna utföra beräkningar samt jämförelser mellan resultat. Det presenteras en representativ modell och tillvägagångssätt för analytiska samt numeriska metoder. Även en metod för att utvärdera kontinuiteten av resultaten i Plaxis 2D läggs fram.

Av de metoder som används är det endast den numeriska analysen med hjälp av Plaxis 2D som kan beräkna massundanträngningens tillbakagång till följd av konsolidering. De två analytiska metoderna, Hellman/Rehman och Sagasetta ger den momentana massundanträngningen till följd av pålning. Dessa resultat används för att kunna jämföra och värdera resultaten ur Plaxisberäkningarna.

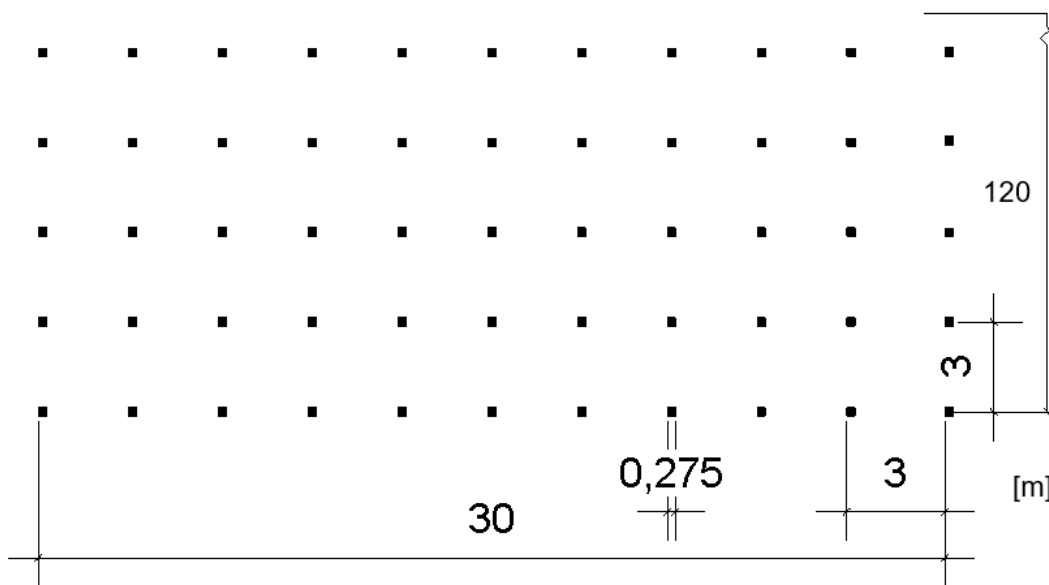
3.1 Område och påltyp

Området som används ska efterlikna en typisk situation med pålning i Göteborgslera. Det består av rader med elva 65 meter långa pålar av typen SP2 eller SP3 med centrumavstånd 3 meter, se Figur (3.1). Tvärsnittsarean på pålarna är då $275 \times 275 \text{ mm}^2$.

Eftersom modellen är symmetrisk så bidrar hälften av pålarna till massundanträngningen i varje riktning, därför divideras totala arean med 2 och dividerat med 3 för att ta hänsyn till radavståndet. Därför blir den resulterande massundanträngningen i horisontalled enligt ekvation (3.1).

$$\frac{11 \cdot 0,275^2}{2 \cdot 3} = 0,1386 [m] \quad (3.1)$$

Det pålade området storlek uppgår till 120x30 m. Att området sträcker sig så långt jämfört med dess bredd innebär att de mesta töjningar och deformationer sker i xy-planet (enligt Figur 2.2). Därför kan Plane strain-antagandet anses riktigt för denna geometri.



Figur 3.1: Planvy över teoretiskt pålområde.

3.2 Hellman/Rehman

Då leran antas vara inkompressibel och inga mothållande faktorer i marken så ansätts $\alpha=\beta=\gamma=\delta=1$, $\eta=1$. Vilket innebär att ekvation (2.2) kan förenklas till ekvation (3.2).

$$x = \frac{V_{\text{pålar}}}{\frac{4 \cdot d^2}{3} + b \cdot l + b \cdot d + l \cdot d} \quad (3.2)$$

Där:

$$\begin{aligned} V_{\text{pålar}} &= 2216,9 \quad [m^3] \\ d &= 65 \quad [m] \\ b &= 30 \quad [m] \\ l &= 120 \quad [m] \end{aligned}$$

3.3 Strain path method (SPM)

För beräkning av sidorörelser och hävning enligt Simple wall- och Simple pile-geometri används ekvation (2.3) och (2.4) respektive (2.5) och (2.6). Tabell 3.1 visar indata för Sagasetametoden. För Simple wall beräknas halva väggens tjocklek, W , med ekvation (3.1). För simple pile antagandet beräknas superpålens radie även den enligt (3.1) men med antalet pålar i hela pålområdet (451 st) istället för antalet per meter.

Tabell 3.1: Indata, Sagasetametoden

$2W$	=	0,2772 [m]
R	=	3,29 [m]
r	=	Radiella avståndet från pålen
L	=	65 [m]
x	=	Horisontella avståndet från pålområdet

3.4 Plaxis 2D

Den numeriska analysen utförs med Plaxis 2D som är ett program som tillämpar FEM för två-dimensionell analys av geotekniska problem.

3.4.1 Jordmodeller

Eftersom ingen av dagens grundläggande jordmodeller ger en komplett bild av det verkliga skeendet är det viktigt att veta hur valet av modell kommer att påverka beräkningsresultatet (T. Wood, 2014). I den här rapporten används två olika grundmodeller, Modified cam clay och Soft soil, för beräkningarna i Plaxis 2D.

Modified Cam Clay (MCC) lanserades först av Burland och Roscoe (1968). Sedan dess har en rad numeriska beräkningsmodeller i försök att beskriva spänningsförändringar i lera baserats på varianter av jordmodellen (bl.a. Abu-Farsakh et al., 2015; Castro & Karstunen, 2010; Sheil, McCabe, Hunt, & Pestana, 2015).

MCC är en elasto-plastisk jordmodell som bygger på teorin om att en kritisk brottlinje där brott kan uppstå till följd av skjuvspänning utan att effektivspänningen ökar. Brottenvelopen beskrivs i p' - q -spänningsplanet, se Figur 3.2. Brottlinjen beskrivs av ekvation (3.3).

$$q = Mp' \quad (3.3)$$

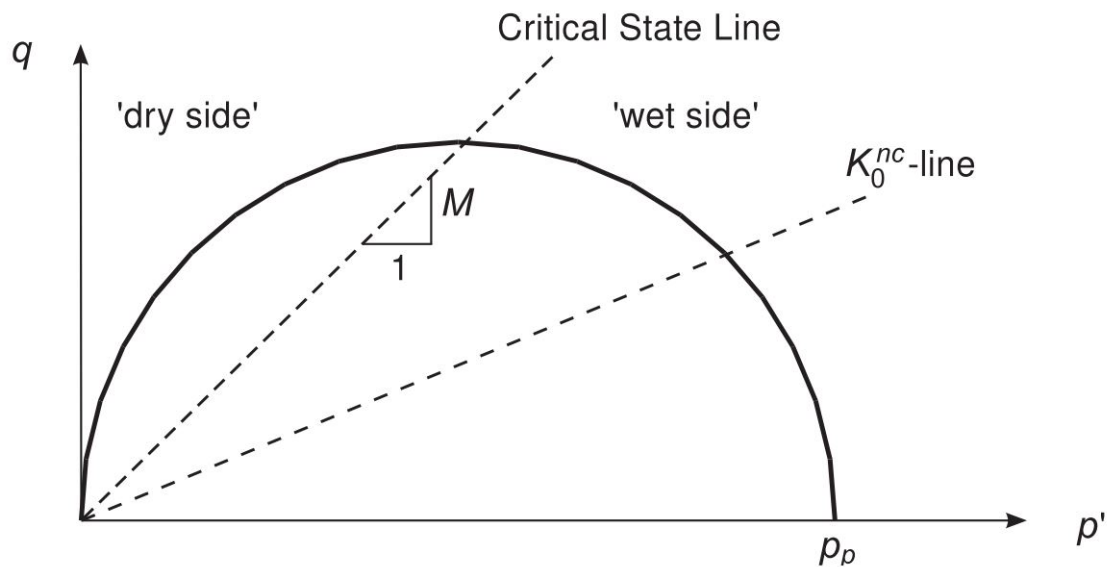
Flytytan beskrivs enligt ekvation (3.4).

$$f = q^2/M^2 + p'(p' - p_p) \quad (3.4)$$

Den kritiska brottlinjens tangent M baseras på friktionsvinkel och erhålls, under kompression, enligt ekvation .

$$M = (6\sin\Phi')/(3 - \sin\Phi') \quad (3.5)$$

Även om MCC-modellen är en förenkling av jordens verkliga spänningstillstånd, till exempel riskerar den att överskatta förmåga att klara stora skjuvningar på flytytans torra sida, fångar den de flesta kritiska aspekterna av spänningstillförsel i lera på ett relativt träffsäkert sätt (D. M. Wood, 2019). Basparametrarna som krävs för MCC i Plaxis redovisas i Tabell 3.2.



Figur 3.2: Flytytan för MCC i p' - q -planet (Brinkgreve, Kumarswamy, Swolfs, Zampich, & Manoj, 2019a).

Tabell 3.2: Basparametrar för MCC i Plaxis 2D (Brinkgreve et al., 2019a).

ν_{ur}	=	Poissons tal
κ	=	Cam-Clay swelling index
λ	=	Cam-Clay kompressionsindex
M	=	Kritiska brottlinjens tangent
e_{init}	=	Initial porvolym

Soft soil-modellen är också baserad på Cam clay-metoden och är väl lämpad för jord med hög kompressibilitet, som till exempel den nära normalkonsoliderade lera som finns i stor utsträckning i Göteborgsområdet (Brinkgreve et al., 2019a). Modellen bygger på ett antagande om ett logaritmiskt samband mellan volymetrisk töjning och förändring i medeffektivspänning. Modellens brottlinje bygger på Mohr-Columbteorin och gör, precis som MCC, även skillnad på töjnings-spänningssambandet under initial belastning och avlastning samt återbelastning. Basparametrarna som krävs för Soft soil-metoden redovisas i Tabell 3.3.

Tabell 3.3: Basparametrar för Soft soil i Plaxis 2D (Brinkgreve et al., 2019a).

κ^*	=	Modifierat swelling index
λ^*	=	Modifierat kompressionsindex
c	=	Effektiv kohesion [kPa]
Φ	=	Friktionsvinkel [°]
Ψ	=	Dilationsvinkel [°]

Plaxis konsolideringsberäkningar baseras på Biots teori med antaganden som följer Darcys lag och elastiskt beteende av jordskelett (Brinkgreve et al., 2019c). De jordmodeller

som används i denna rapport tar endast hänsyn till primär konsolidering. Det vill säga att det bortses ifrån krypning och tixotropiska effekter.

3.4.2 Plaxismodell

Den 15-nodiga plane strain-modellen i Plaxis 2 D, Figur 3.4, sträcker sig i x-led från 0 till 350 meter samt i y-led 0 till -100 meter. Bredden, mer än fem gånger pållängden, har valts för att undvika att randvillkoren påverkar massundanträngningen och konsolideringen på ett oönskat sätt (McCabe och Sexton, 2014). Djupet motsvarar den mäktiga lera som återfinns i Göteborgsområdet. Ett fine mesh, se Figur 3.5, används generellt. Inom området närmast linjeförskjutningen, mellan punkterna (0,0;20,0;20,-80;0,-80), används ett extra fint mesh med en grovhet på 0,250. Totalt består modellens mesh av 1170 element med 9641 noder.

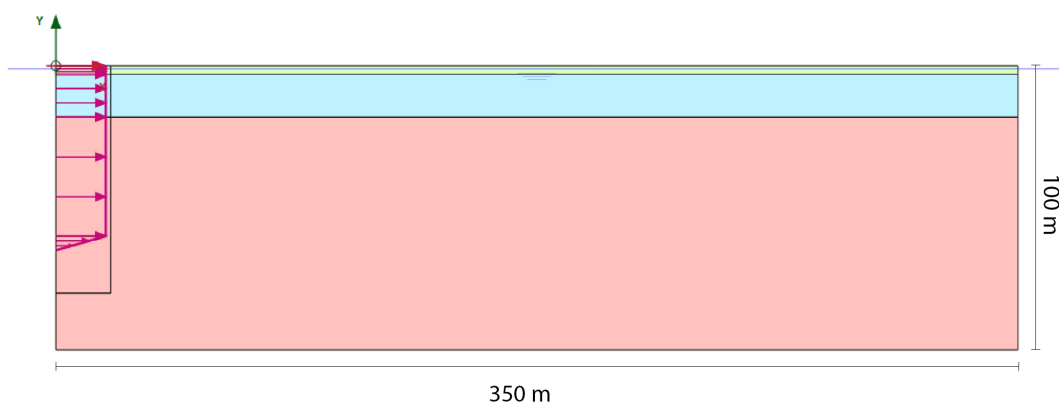
Randvillkoren är satta till att y_{min} är fixerad i båda riktningar, x_{min} respektive x_{max} fixerade horisontellt men kan röra sig vertikalt och y_{max} är helt fri. Vattnet och därmed porövertrycket kan skingras genom de horisonella ränderna men inte de vertikala.

För att simulera pålnings massundanträngning används en linjeförskjutning, som är numeriskt stabilare än en volymetrisk expansion (Castro & Karstunen, 2010). För numeriskt stabil beräkning, se avsnitt , omvandlas den ursprungliga pålvolymen r till två linjeförskjutningar a_0 samt a_0 enligt ekvationerna (3.6) respektive (3.7).

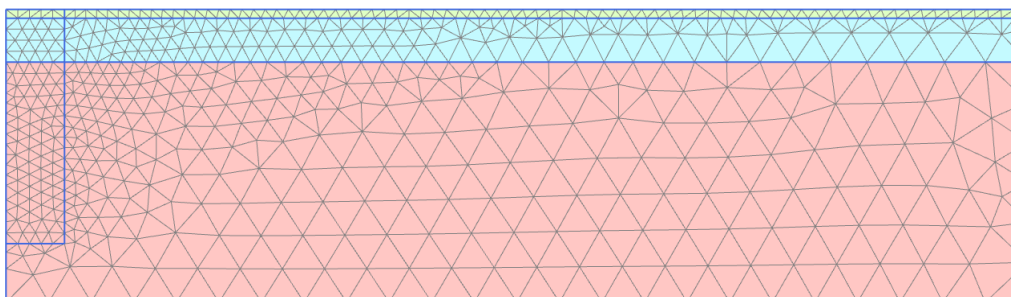
$$a_0 = \frac{r}{\sqrt{3}} = 0,0800 [m] \quad (3.6)$$

$$a_f = 2 \cdot a_0 = 0,1600 [m] \quad (3.7)$$

För att minimera problem med modellens mesh har pålens spets rundats av (Abu-Farsakh et al., 2015). Det har gjorts genom att låta linjeförskjutningen vara konstant mellan 0 och -60 meters djup, för att sedan avta linjärt mellan -60 och -65 meter.



Figur 3.3: Modell i Plaxis 2D.



Figur 3.4: Modellen har ett 15-nodigt fine mesh med ett extra tätt nät närmast linjeförskjutningen.

3.4.3 Jordegenskaper

Val av jordegenskaper, se tabell 3.4, har gjorts med målet att fånga karaktärstiken för en typisk Göteborgslera. Samtliga värden är hämtade från Woods (2014) geotekniska rapport för Regioncity och endast mindre förändringar har gjorts för att parametrarna ska kunna användas med det här examensarbetets Plaxis 2D-modell. Grundvattennivån sätts till -1 meter.

Tabell 3.4: Jordegenskaper för Soft soil-modell i Plaxis 2D (T. Wood, 2014).

Parameter	Beteckning	Enhet	Lera SS-1 (0 till -3 m)	Lera SS-2 (-3 till -18 m)	Lera SS-3 (-18 till -100 m)
Materialmodell	Model	-	Soft soil	Soft soil	Soft soil
Dräneringstyp	Type	-	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)
Tunghet	γ_{unsat}	kN/m ³	16	16	16
Tunghet	γ_{sat}	kN/m ³	16	16	16
Kompressionsindex	λ^*	-	0,1078	0,159	0,2355
Swelling index	κ^*	-	0,0118	0,014	0,0145
Friktionsvinkel	Φ	°	30	30	30
Dilationsvinkel	Ψ	°	0	0	0
Poissons tal	ν_{ur}	-	0,15	0,15	0,15
K_0 determination	-	-	Manual	Manual	Manual
Jordtrycks-koefficient	$K_{0,x} = K_{0,z}$	-	0,63	0,59	0,59
Överkonsolideringsgrad	OCR	-	1,59	1,37	1,37
Horisontell permeabilitet	k_x	m/day	8,64E-05	8,64E-05	8,64E-05
Vertikal permeabilitet	k_y	m/day	8,64E-05	8,64E-05	8,64E-05

3.4.4 Beräkningar

I Plaxis ansätts olika villkor för att avgöra hur länge modellen ska konsolidera. I den här rapportens beräkningar baseras de första faserna på bestämda tidsperioder: 0,5 år, 1 år, 2 år, 4 år och 8 år, där konsolidering tillåts. För slutkonsolidering ansätts villkoret att porövertrycket i modellens samtliga noder ska understiga 1 kPa. När det kravet har uppfyllts antas också full konsolidering ha uppnåtts (Brinkgreve, Kumarswamy, Swolfs, Zampich, & Manoj, 2019b). Plaxis delar upp beräkningen av respektive fas i olika tidssteg (time step), vilket leder till att det sista steget som går till <1 kPa kan beräknas då maximalt porövertrycket är mindre än 1 kPa. Det kan leda till att tiden till slutkonsolidering överskattas.

Tabell 3.5: Beräkningsfaser i Plaxis 2D

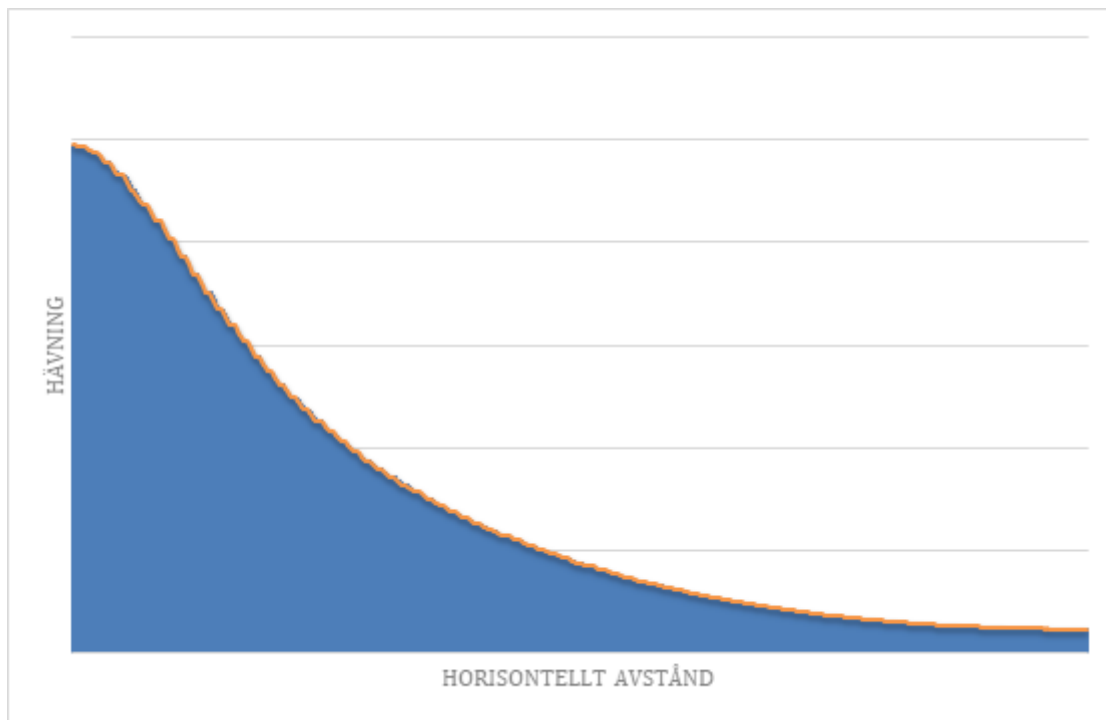
Fas	Calculation type	Tidsintervall [dagar]	Total tid [dagar]	Händelse
Initiell	K0 procedure	0	0	Initiella spänningar
a0	Consolidation	10	10	Primär linjeförskjutning
af	Consolidation	10	20	Slutgiltig linjeförskjutning
0,5 år	Consolidation	183	203	Konsolidering
1 år	Consolidation	182	385	Konsolidering
2 år	Consolidation	365	750	Konsolidering
4 år	Consolidation	730	1480	Konsolidering
8 år	Consolidation	1460	2940	Konsolidering
1 kPa	Consolidation	-	22560 (62 år)	Slutkonsolidering till porövertryck <1kPa (0,63kPa)

3.5 Undanträngd volym

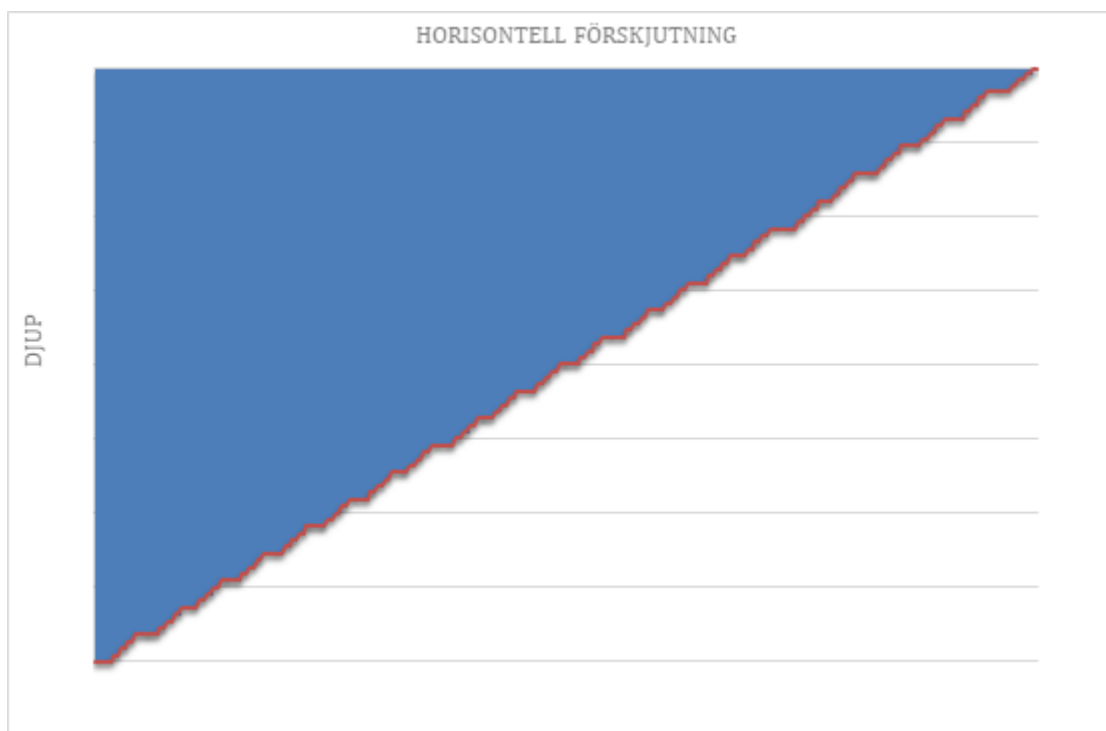
Den undanträngda jordvolymen består av en kombination av hävd jordvolym och sidoförskjutna jordvolym. Så länge ingen kompression eller konsolidering har skett ska den undanträngda volymen vara densamma på samtliga avstånd. Den hävda volymen på ett visst avstånd innefattar all hävd jordvolym mellan pålområdet och avståndet i horisontal led. Den sidoförskjutna volymen är det som på samma avstånd förskjutits i horisontal led för samtliga djup. Den hävda volymen kan visualiseras som arean under kurvan för den beräknade hävningen se Figur 3.5. Den sidoförskjutna volymen, se Figur 3.6 byggs upp av arean mellan kurvan och x- respektive y-axeln.

Den undanträngda volymen beräknas för avstånden 20, 40, 60, 200 och 350 meter genom att integrera resultaten för hävning/sidorörelse mot avståndet respektive djupet. Resultaten jämförs med den teoretiska volymen som baseras på den mängd pålar som modellen ska motsvara. Enligt ekvation (3.8) som baseras på ekvation (3.1) med pållängden (65 m) som tillägg.

$$\frac{11 \cdot 65 \cdot 0,275^2}{2 \cdot 3} = 9,0 \text{ m}^3 \quad (3.8)$$



Figur 3.5: Hävningsvolym



Figur 3.6: Sidoförskjuten volym

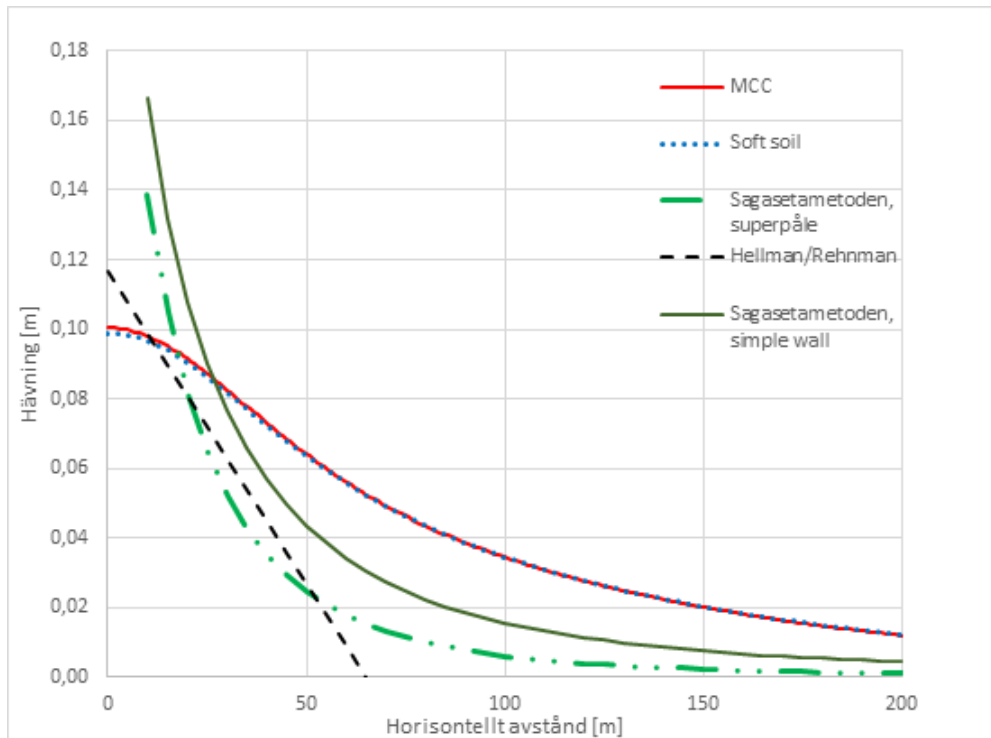
4

Resultat och diskussion

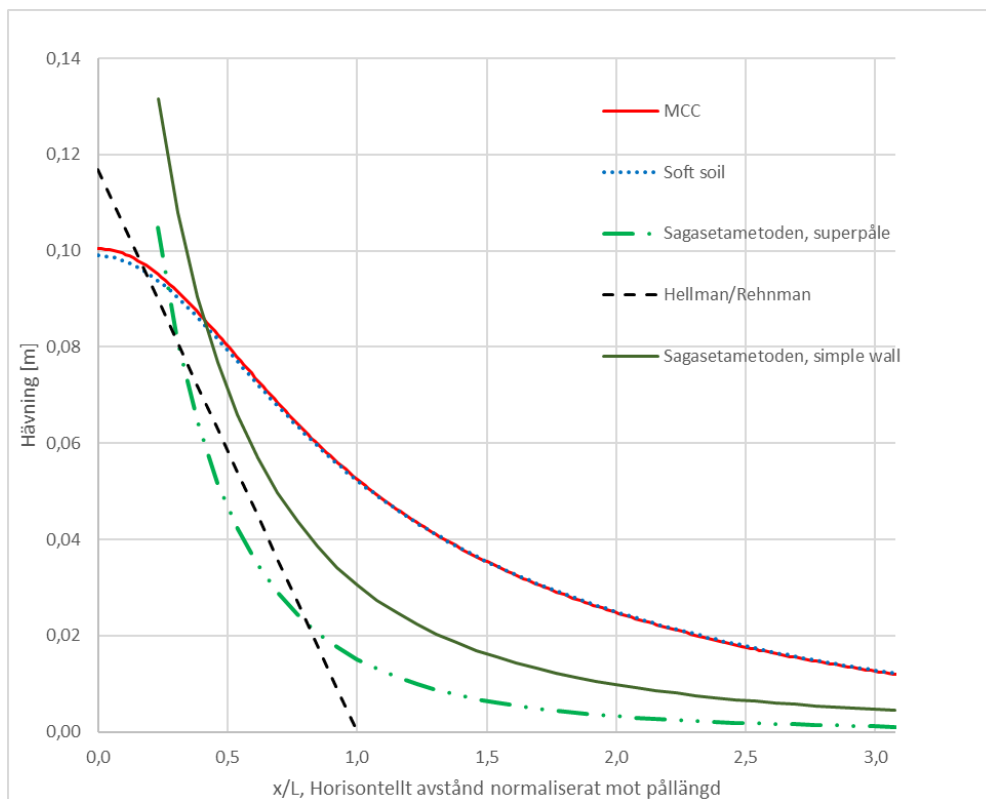
I detta kapitel behandlas beräknade massförskjutningar i Plaxis 2D och jämförs med de analytiska modellerna för massundanträngning. Det presenteras även resultat där konsolideringen är pågått under olika tidsperioder för att kunna visa på eventuell tillbakagång av massundanträngningen. Det utförs även en jämförelse med eventuell tillbakagång i ett verkligt fall. En känslighetsanalys presenteras i slutet av kapitlet. Skillnaden mellan de resultat de två olika jordmodeller som används i Plaxis (Soft soil och MCC) är obetydliga och därför utelämnas vissa resultat ifrån MCC-modellen i detta kapitel. Resultat från beräkningar med MCC i Plaxis återfinns i appendix.

De olika beräkningsfaserna i Plaxis är, som tidigare nämnt, tidsbestämda förutom den slutgiltiga fasen. Den slutgiltiga fasen pågår till att porvattenövertrycket understiger 1 kPa. I Soft soil-modellen uppfylls detta villkor 62 år efter modelleringens början och i MCC-modellen tar det 72 år. Efter 62 år är det maximala porövertrycket 0,64 kPa vilket innebär att det definierade slutkonsolideringstillståndet på 1 kPa uppfylls tidigare än 62 år. Denna differens är dock ovidkommande för detta examensarbete eftersom syftet och målet inte är att fastslå konsolideringstiden med sådan exakthet, utan att undersöka trenden på tillbakagången.

Figur 4.1 och 4.2 illustrerar hävning vid markytan efter de initiala förskjutningar när ingen konsolidering skett. Skillnaden mellan de analytiska metodernas resultat och de resultaten ifrån FE analys är påtaglig. Hävningen nära påloområdet beräknat med Sagasetametoden ser ut att överskattas, något som kan bero på att tvärsnittsareorna på varje påle adderas och används som en superpåle vid påloområdets gräns. Det innebär att den hävning som i ett verkligt fall fördelas mellan varje individuell påle summeras till en orimligt stor hävning precis intill det modellerade området. Edstam (2011) rekommenderar att superpålar endast ska användas vid beräkningar en bit ifrån pålningsområdet. Det kan antagas gälla även för beräkningar enligt simple wall-geometrin då hävningen blir oändligt stor när det horisontella avståndet går mot noll. På grund av detta redovisas endast hävningen beräknat med Sagasetas metoder från 15 meters avstånd.



Figur 4.1: Hävning vid markytan efter initiala förskjutningar.

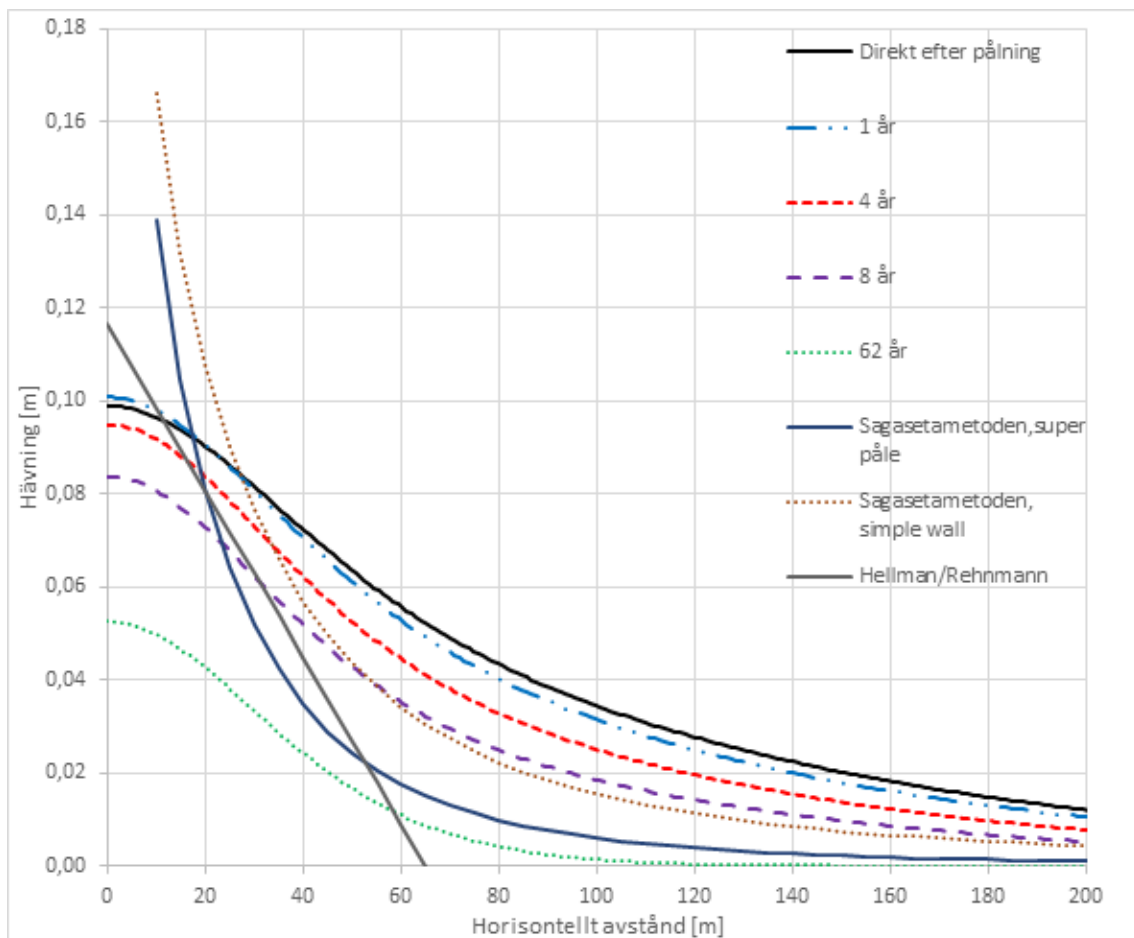


Figur 4.2: Hävning vid markytan efter initiala förskjutningar, avstånd normaliserat mot pällängd.

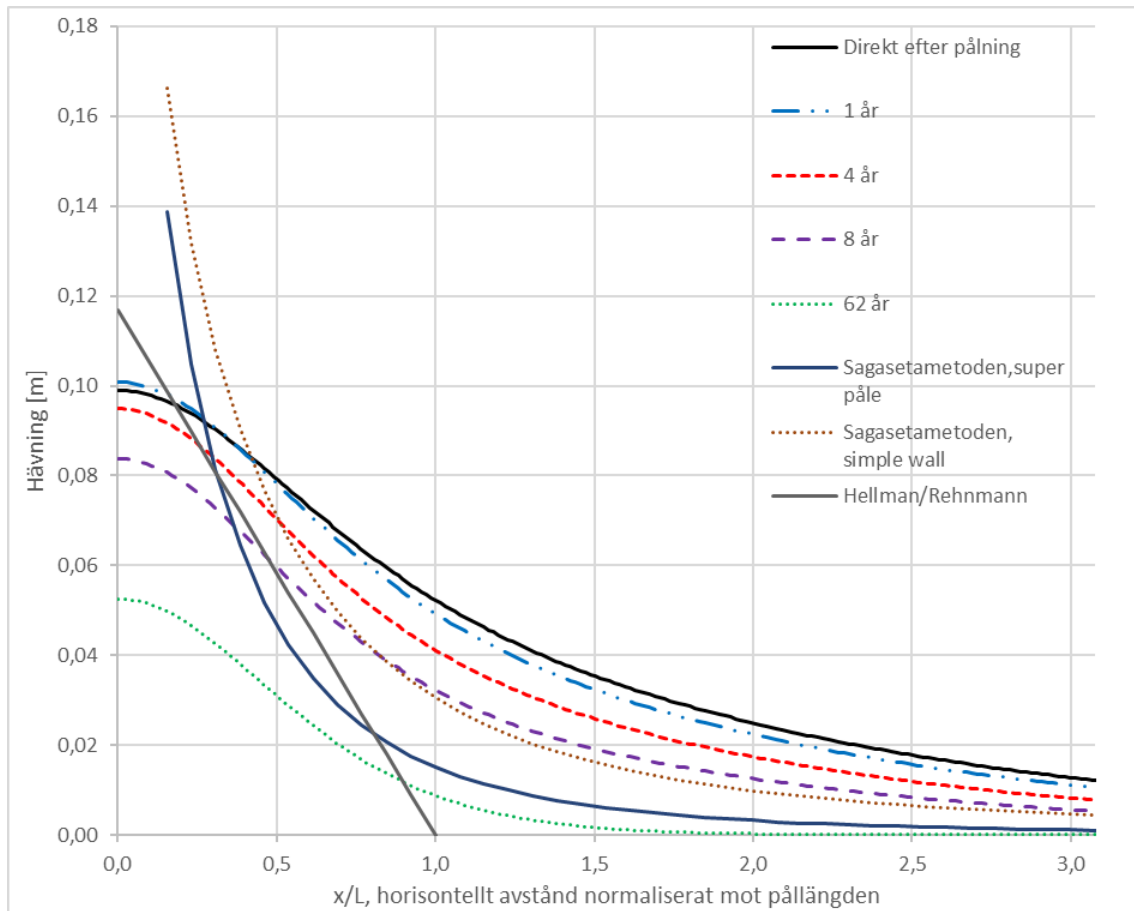
4.1 Hävning

I Figur 4.3 och 4.4 illustreras hävningen mot avståndet till påloområdet, beräknat i Plaxis 2D med Soft soil-jordmodell. Resultaten för MCC-modellen är snarlika och återfinns i appendix, A.1 Hävningen är som störst närmast påloområdet för att sedan avta till nära noll ungefär 200 meter ifrån påloområdet. Tillbakagången är tydlig men långsam. Ungefär hälften av tillbakagången sker de första åtta åren för att sedan dröja totalt 62 år till fullständig konsolidering vilket tyder på ett normalt konsolideringsförlopp. Det vill säga en högre konsolideringshastighet i början som sedan blir långsammare. Det beror på en högre potentialskillnad i porvattenövertryck i början som sedan sjunker och därmed minskar även tillbakagångens hastighet.

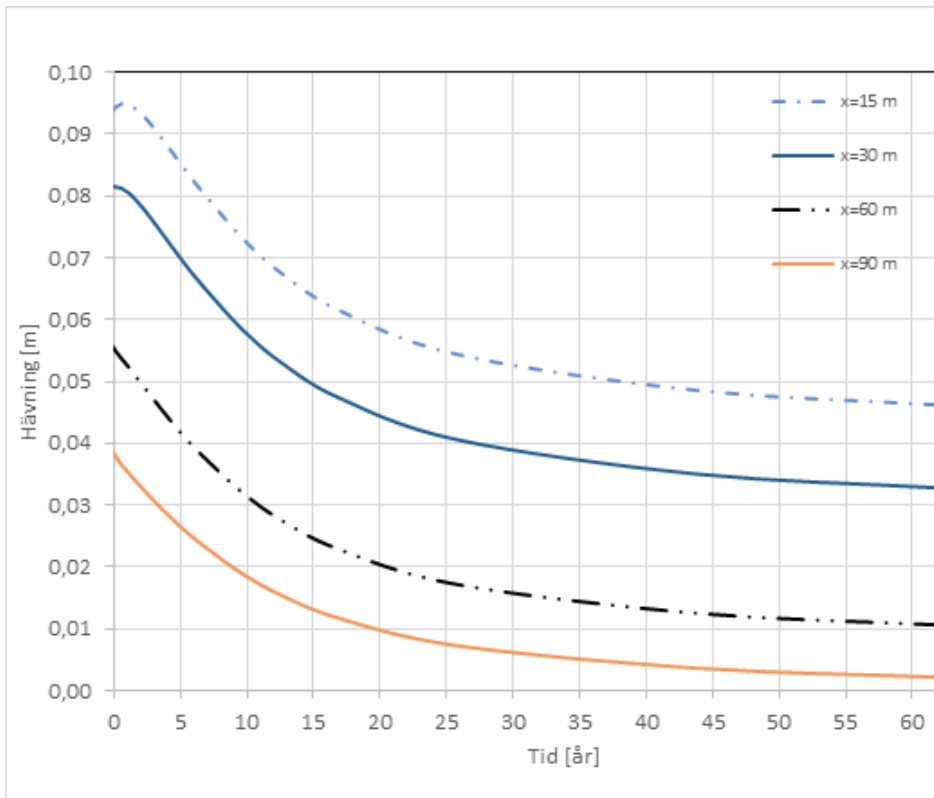
Figur (4.5) och Figur (4.6) visar fyra olika punkter vid markytan (15,0), (30,0) och (60,0) och dess tillbakagång av hävning efter tid. Figur (4.6) har en logaritmisk tidsskala och då tycks samtliga kurvor följa den typiska S-formen för en konsolideringskurva med logaritmisk tidsskala.



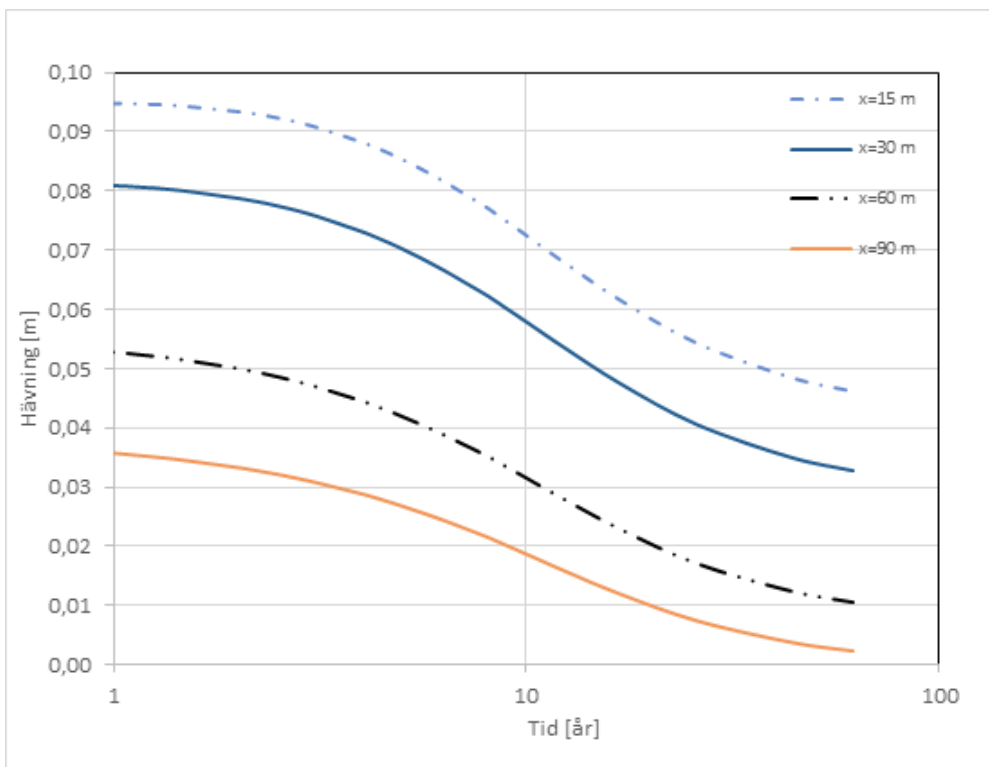
Figur 4.3: Hävning vid markytan enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D.



Figur 4.4: Hävning vid markytan enligt Soft soil-modell, avstånd normaliserat mot pällängd.



Figur 4.5: Hävning vid markytan över tid enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D.



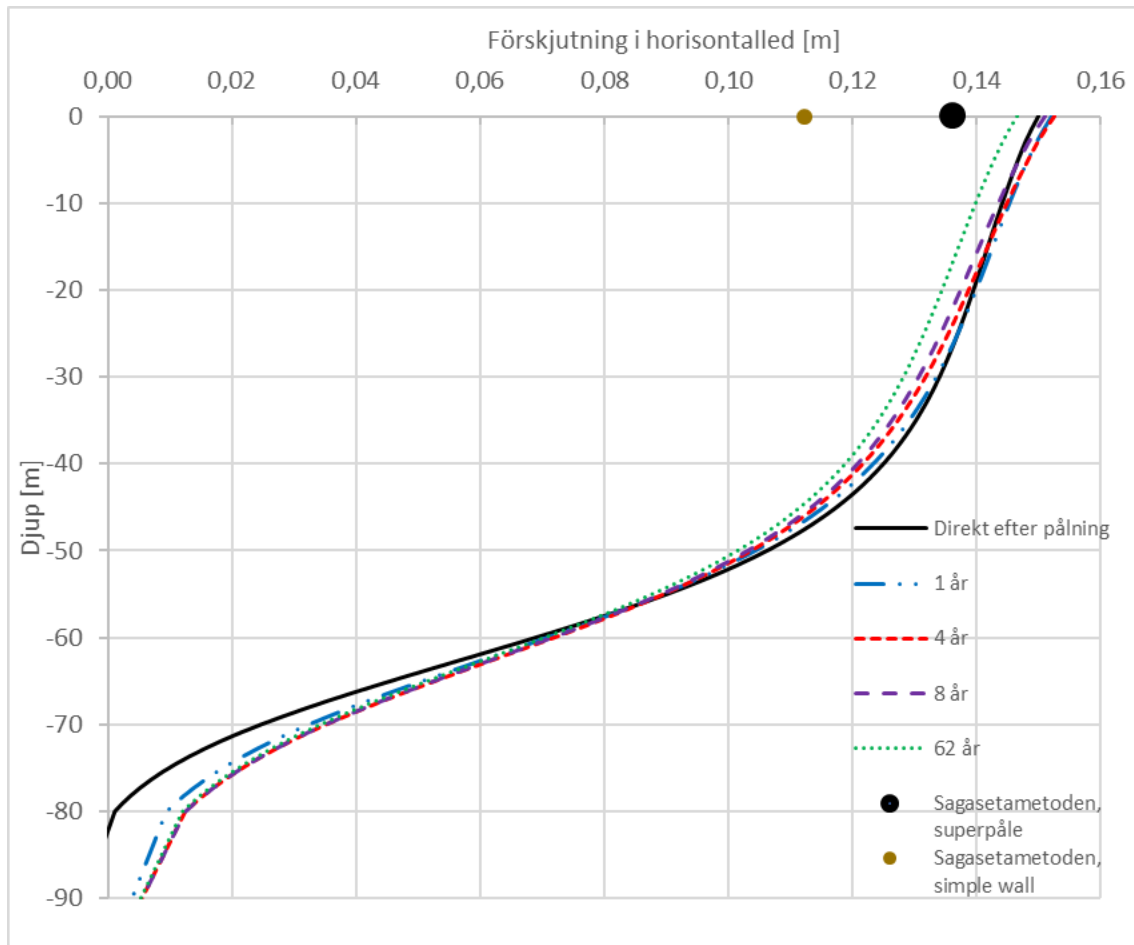
Figur 4.6: Hävning vid markytan över tid, logaritmisk skala, enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D.

4.2 Sidorörelser

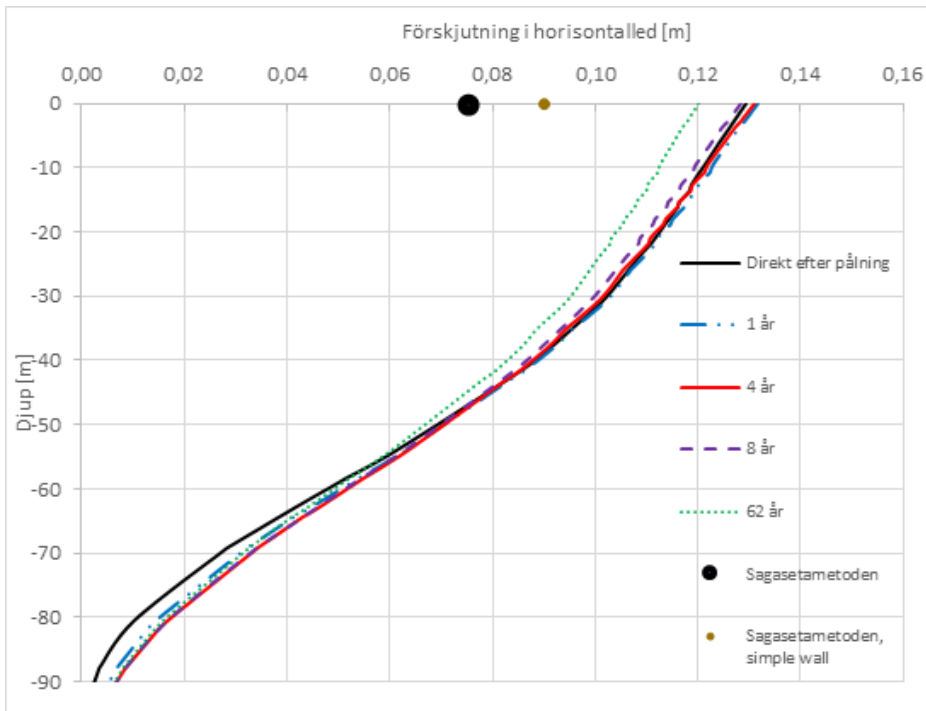
I Figur (4.7) presenteras de beräknade förskjutningarna i horisontalled vid ett avstånd på 20 meter från pålningsområdet, vid tiden direkt efter att pålningen har simulerats samt efter olika konsolideringstider. Skillnaden efter konsolidering har skett är endast ett fåtal millimeter. Sagasetas analytiska metod uppskattar endast momentana sidorörelser vid markytan vilket visas med en större och mindre prick i följande grafer. Det framgår även att beräknade förskjutningar enligt Sagasetametoden är liknande på avståndet 20 meter, dock så avtar sidorörelserna mer på avståndet med Sagasetametoden. Figur (4.8) och Figur (4.9) visar förskjutningar vid 40 respektive 60 meters avstånd från pålningsområdet. Resultaten är liknande Figur (4.7) men i lite mindre storleksordning.

Resultaten visar på en i princip obefintlig tillbakagång av sidorörelser på samtliga avstånd ifrån pålområdet. Utifrån traditionell konsolideringsteori är det ett förväntat resultat att konsolideringen i huvudsak sker vertikalt. Men det finns, som beskrivs i avsnitt 2.7, studier som visar på ett annat scenario. Pestana et al. (2002) har i en fältobservation av konsolideringsförloppet i nära normalkonsoliderad lera visat på att det även sker en lateral tillbakagång. Nedan, se avsnitt 4.4, i den här rapporten görs dock även en jämförelse med det horisontella konsolideringsförloppet efter den omfattande pålning i området kring Götaälvsbron. De mätningarna visar inte på någon märkbar lateral tillbakagång.

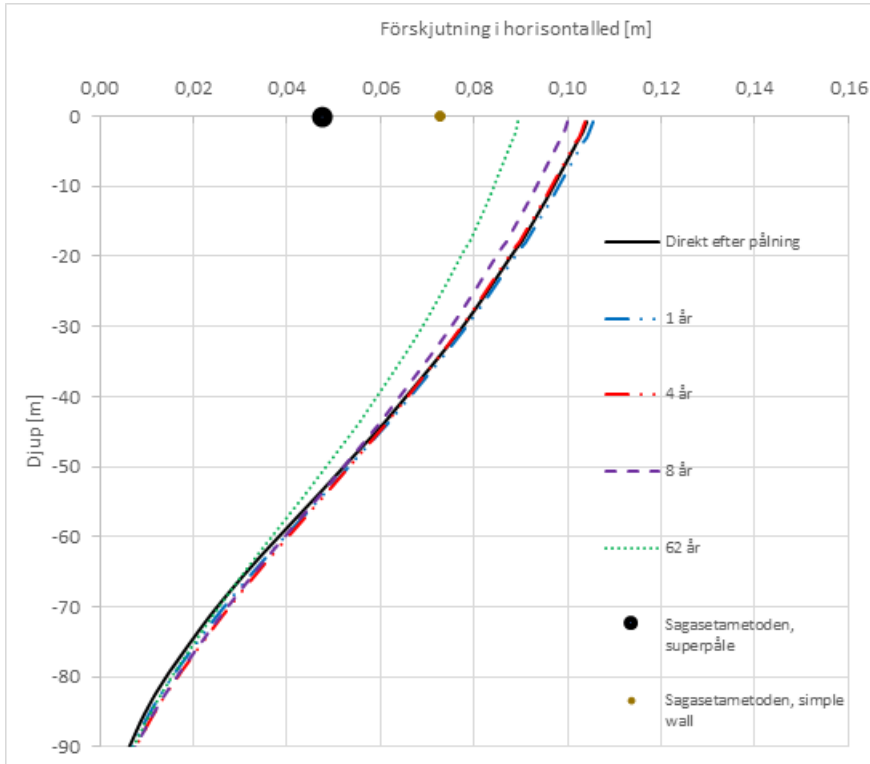
På djup under pålens längd (65 m) så fortsätter även sidorörelser ifrån pålområdet under konsolideringsfaserna, vilket kan härledas till det negativa portrycket som skapas i området i samband med linjeförskjutningen. Sagasetametoden stämmer bättre med resultatet från FEM-analysen på det kortare avståndet 20 meter men sämre på avstånden 40 och 60 meter.



Figur 4.7: Förskjutning i horisontalled, 20 meter från pålområdet, enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D.



Figur 4.8: Förskjutning i horisontalled, 40 meter från pålområdet, enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D.



Figur 4.9: Förskjutning i horisontalled, 60 meter från pålområdet, enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D.

4.3 Känslighetsanalys

I detta underkapitel presenteras alternativa analyser för att undersöka hur väl modeller-na stämmer i andra fall än det ursprungliga. Det görs för att kunna värdera modellens robusthet samt öka förståelsen för hur vissa faktorer påverkar resultatet.

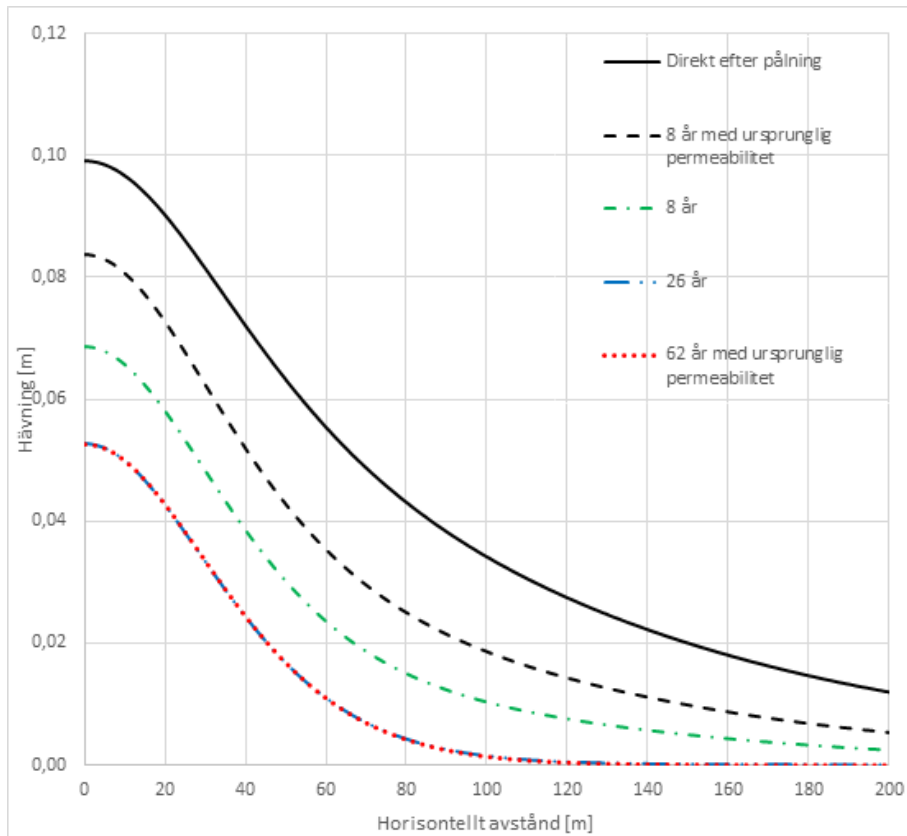
De förändringar som analyseras är:

- Dubblerad permeabilitet.
- Dubblerat kompressionsindex och swelling index.

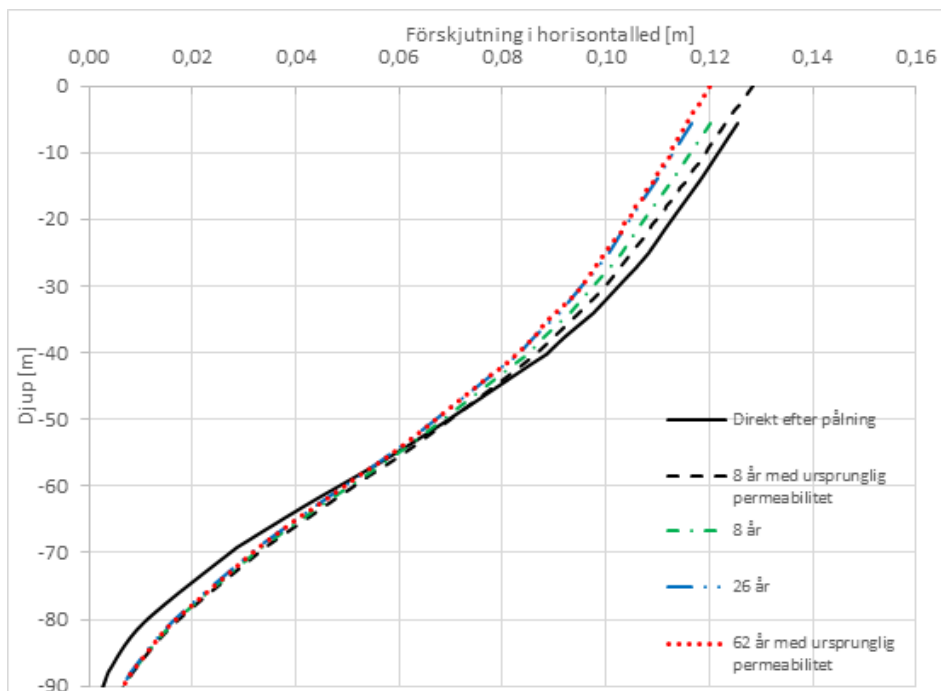
I Figur 4.10 och Figur 4.11 visas resultat då permeabiliteten har dubblerats och jämförs med resultat baserade på den ursprungliga permeabiliteten. Som väntat påverkar permeabiliteten varken förskjutningarna momentant eller förskjutningarna då konsolidering slutat. Det som ändras är hastigheten på konsolideringen. Istället för 62 år så tar det 26 år för slutkonsolidering. I och med detta är också storleken på eventuell tillbakagång större efter åtta år med den högre permeabiliteten.

En analys utfördes även med dubblerade värden för kompressions- och swelling index i samtliga jordlager, för att kunna utvärdera hur en minskad styvhet påverkar de initiala förskjutningar och dess tillbakagång. Figur 4.12 och Figur 4.13 visar att, liksom resultaten med förändrad permeabilitet, så förändras endast tiden det tar till slutkonsolidering. Det sker ingen förändring av storleken på förskjutningarna. Eftersom förskjutningen som ansätts i Plaxis-modellen är definitiv och sker oavsett jordens styvhetsmodul samtidigt som styvhetsmodulen är isotropisk är det inte särskilt oväntat. Massan måste förskjutas i någon riktning och relationen mellan de olika modulerna (kompression respektive swelling) och dess storlek i x respektive y-riktning är oförändrad jämfört med den ursprungliga modellen.

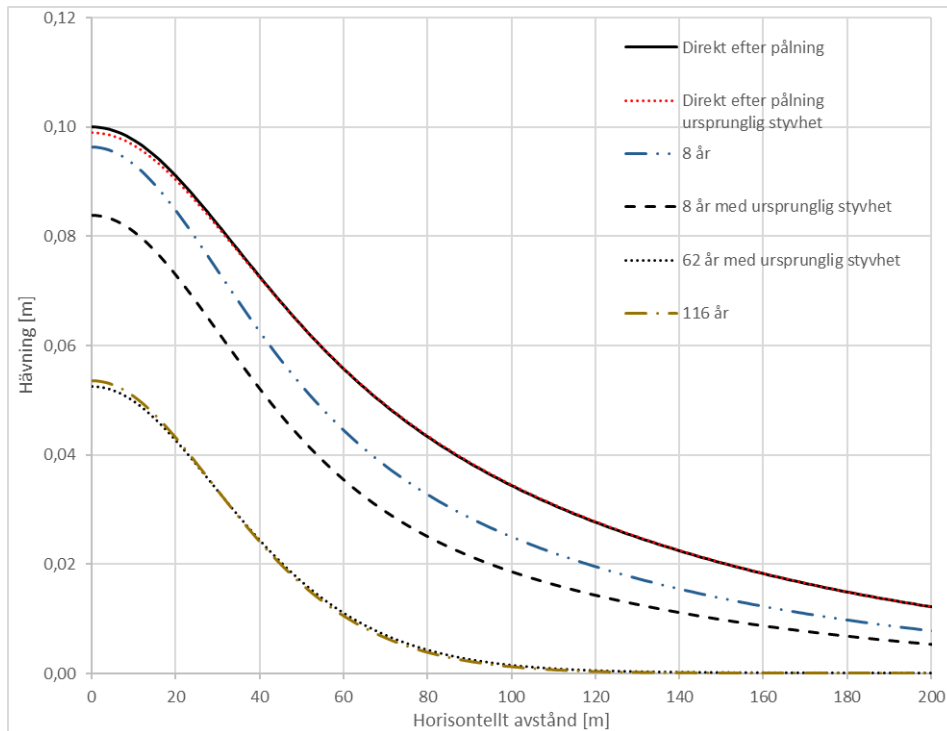
De initiala förskjutningarna ger upphov till ett porvattenövertryck som är mindre än i den ursprungliga modellen, något som kan förklaras av att en bestämd deformation utförs och att sambandet med en lägre styvhetsmodul ger en lägre spänning. Den minskade spänningen leder i sin tur till ett lägre porvattenövertryck. Det är också den rimliga förklaringen till den ökade konsolideringstiden. Ett lägre porövertryck ger en lägre gradient som leder till en lägre konsolideringshastighet. Samtidigt är mängden vatten som ska skingras densamma, eftersom den beror på deformationens storlek. Därmed blir också slutkonsolideringstiden längre.



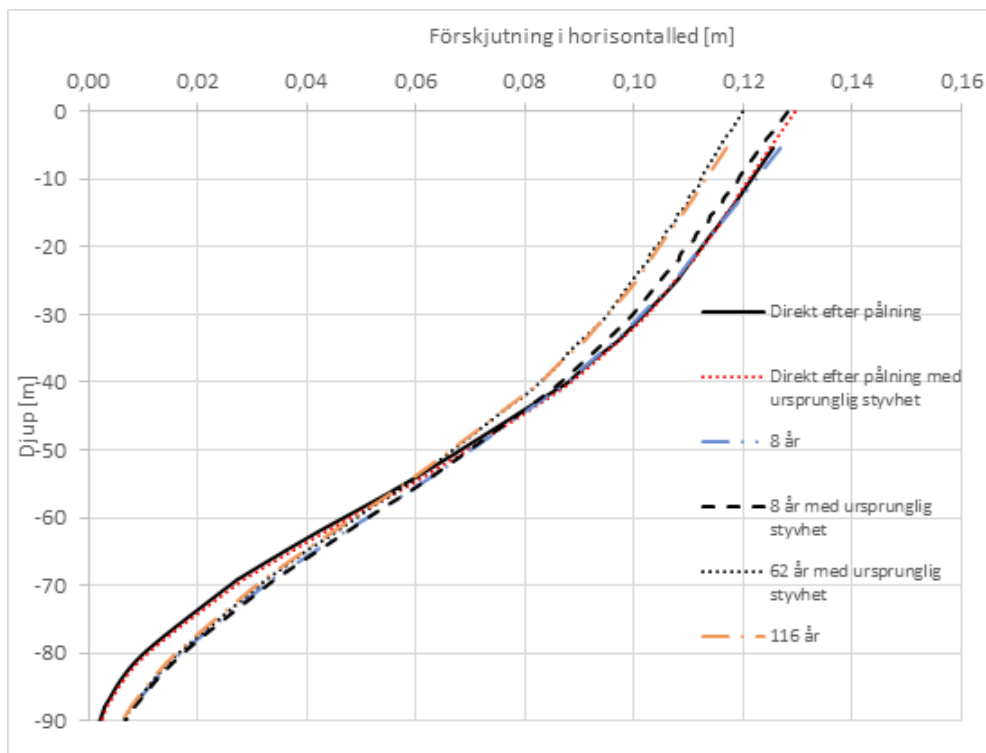
Figur 4.10: Hävning vid markytan enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D . Beräknat med dubblerad permeabilitet.



Figur 4.11: Förskjutning i horisontalld, 40 meter ifrån pålområdet enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D. Beräknat med dubblerad permeabilitet.



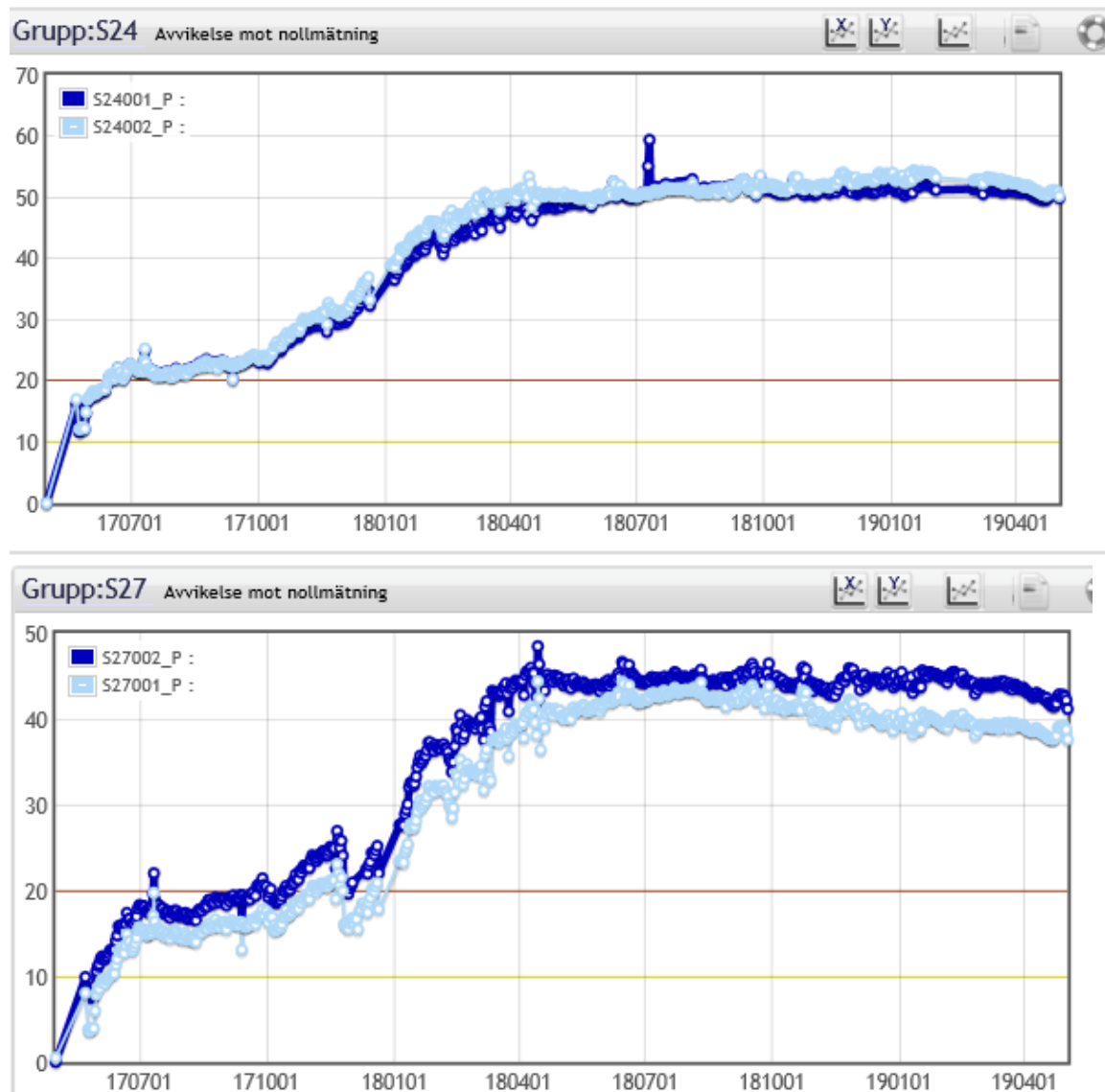
Figur 4.12: Hävning vid markytan enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D. Beräknat med dubbel styvhet.



Figur 4.13: Förskjutning i horisontalled, 40 meter ifrån pålområdet enligt Soft soil-modell i Plaxis 2D. Beräknat med dubbel styvhet.

4.4 Jämförelse med förskjutning av Götaälvbron

På grund av den extensiva pålningsverksamhet som sker i Götaälvbrons närhet utförs mätningar av brostödens rörelser. De jordegenskaper som används i denna rapport kommer ifrån området RegionCity som ligger endast ett fåtal hundra meter ifrån Götaälvbron. Därför kan jordegenskaperna i detta område antas vara liknande de använda i denna rapport. Figur 4.14 visar mätningar av horisontalrörelser för brostöd 24 och 27 från våren 2017 till våren 2019. Pålning utfördes till och med mars 2018 på avstånd mellan noll och 200 meter ifrån brostöden. Mätningarna visar inte på någon signifikant tillbakagång av sidoförskjutningen cirka ett år efter pålningens slut. I detta verkliga fall är det viktigt att påpeka att många faktorer som kan ha påverkan på resultatet saknas. Närliggande byggnader och pålar kan ha inverkan på skillnader mellan teori och praktik.



Figur 4.14: Horisontalförskjutningar i mm uppmätta vid Götaälvbron stöd 24 respektive 27 (Göteborgs stad - trafikkontorets mätdata, 2019).

4.5 Hävningen och sidorörelsernas samband med undanträngd volym

I detta avsnitt undersöks sambandet mellan den teoretisk undanträngda jordvolymen och de volymer som kan härledas genom resultaten från FE-analysen. Tabell 4.1 visar resultat av beräkningar från de undanträngda volymerna baserat på Soft soil-modellen i Plaxis 2D.

Modellens yttre gräns sträcker sig till avståndet 350 meter och därmed sker inga sidorörelser på det avståndet. Vid avstånden <350 så är summan av den undanträngda volymen en kombination av den hävda volymen och den sidoförskjutna volymen. Att skillnaden mellan den hävda volymen inom 350 och 200 meter tyder på att modellen ger en relativt stor (>10% av total volym) hävning på stora avstånd ifrån påloområdet. Det beror troligtvis på att de valda jordmodellerna i Plaxis 2D inte tar hänsyn till sambandet mellan små töjningar och högre styvhet. Sammantaget visar resultaten på en något större modellerad undanträngd volym jämfört med den teoretiska adderade volymen. Att resultaten ur Plaxisberäkningar ger en större volym kan bero på den linjeförskjutning som ansätts enligt avsnitt 2.6.3, då den teoretisk adderade volymen i Plaxismodellen har större storlek än i den ursprungliga teorin. Edstam (2011) analyserar fältmätningar efter pålning i Göteborgslera och jämför pålad volym med uppskattad undanträngd volym ifrån fältmätningar. Även den jämförelsen ger en liten högre undanträngd volym än pålad volym.

Tabell 4.1: Undanträngda volymer

Avstånd [m]	Hävd volym [m^3]	Sidoförskjutna volym [m^3]	Summa undanträngd volym [m^3]
350	9,70	0	9,70
200	8,67	1,25	9,92
60	4,82	4,66	9,48
40	3,56	6,01	9,57
20	1,91	8,25	10,16
Teoretisk	-	9,0	9,0

4.6 Svagheter

Geoteknisk modellering innebär alltid en förenkling av verkligheten. I arbetet med den här rapporten har det krävts vissa avgränsningar av studiens omfattning. Därför är det också av största vikt att välja noggrant och vara medveten om konsekvenserna av valen. En av de största förenklingarna som har gjorts i samband med den här studien är att jorden antas vara isotropisk eftersom ingen av jordmodellerna som har använts i Plaxis 2D tar hänsyn till anisotropi. I verkligheten skiljer sig ofta till exempel lerans styvhet och hållfasthet i olika riktningar (Clarke, 2017) och den horisontella permeabiliteten kan vara tre gånger så hög som den vertikala (Azizi, 2000). Som ett exempel skriver Castro & Karstunen (2010) att det är rimligt att anta att anta att Bothkennarlerans permeabilitet antas vara dubbelt så stor horisontellt som vertikalt. En modell med anisotrop styvhet kan förändra förhållandet mellan vertikala och laterala massförskjutningar. En högre horisontell permeabilitet kan

förkorta det totala konsolideringsförloppet då porövertrycket utjämnas snabbare (Azizi, 2000).

Varken Soft soil eller MCC tar hänsyn till tixotropi, anisotropi eller krypning. Som tidigare nämnt, se avsnitt 2.7, har Abu-Farsakh et al. (2015) konstaterat att endast konsolideringen inte fångar hela bilden av förloppet efter pålningen. Enligt studien måste jordmodellen ta hänsyn till störningen av jorden och den återvunna styrkan över tid för att undvika för stora skillnader mellan FE-analysen och det verkliga scenariot. En annan nackdel med de valda jordmodellerna är att ingen tar hänsyn till ökad styvhet vid små töjningar vilket kan vara en förklaring till att en liten hävning sker även långt utanför två pållängders radie från pålområdet.

Eftersom verkligheten är tredimensionell innebär det naturligtvis en förenkling att modellera pålning i Plaxis 2D. Men eftersom en simulering i Plaxis 3D innebär ett mångdubbelt större arbete, se avsnitt 2.6, och inte förväntas ge ett betydligt mer precist förlopp i FE-analysen bedöms en 2D-simulering som fullt tillräcklig.

I samband med pålning är det vanligt att använda sig av lerproppsdragning för att minska massundanträngningen. I den här studien har ingen simulering av effekterna vid lerproppsdragningen genomförts. Det beror på att fokus har varit på att fånga trenden för tillbakagången av massundanträngningen, inte med exakthet slå fast hur stora de initiala rörelserna blir vertikalt respektive horisontellt. Dessutom bedöms lerproppsdragningen endast påverka området närmast pålväggen.

5

Slutsatser och vidare undersökningar

En finita element-analys i Plaxis 2D har använts för att simulera massundanträngning i samband med pålning i Göteborgslera. Pålningen har simulerats genom en kombination av Cavity expansion method och två olika jordmodeller, Soft soil och Modified cam clay. Nödvändiga jämförelser, bland annat med analytiska beräkningsmetoder, har också utförts för att kunna validera de initiala vertikala och horisontella rörelserna. Efter en bestämd linjeförskjutning har massundanträngningens tillbakagång undersökts genom konsolidering då porövertrycket utjämnas.

FE-analysen har givit resultat som i stort överensstämmer med tidigare studier och teori. För den initiala massundanträngningen kan följande slutsatser dras:

- Både hävning och sidorörelser sker på avstånd längre än en pållängd. Påverkansområdet begränsas alltså inte till en pållängd.
- Sidorörelsen är större än hävningen vid samma avstånd från pålområdet.
- Resultatet från de analytiska metoderna skiljer sig från det i FE-analysen. För Sagasetametoden är differensen som störst nära pålområdet medan trenden och storleksordningen på ett längre avstånd liknar den i FE-analysen.

Angående examensarbetets huvudsakliga fokus att undersöka tillbakagång av massundanträngning kan, utifrån det modellerade konsolideringsförloppet i Plaxis 2D, följande slutsatser dras:

- Hävningen går delvis tillbaka. Närmast pålområdet sker en tillbakagång på cirka 50 % av initiell hävning. Från ungefär 100 meter och utåt går all hävning tillbaka.
- Inga resultat visar på tillbakagång av sidorörelser.
- Generellt gäller att konsolideringen tar lång tid. Enligt beräkningarna tar det över 60 år innan porövertrycket har utjämnats. Konsolideringshastigheten är som störst de första 15 åren för att sedan avta, enligt ett typiskt konsolideringsförlopp.

Slutligen kan det konstateras att en FE-analys med aktuella jordmodeller i Plaxis 2D fångar den del av tillbakagången som beror på primär konsolidering. Därmed anses den här rapporten ha fångat de viktigaste dragen för massundanträngningens tillbakagång. Samtidigt bör det betonas att studien är genomförd med en förenklad modellering av de verkliga förhållandena och att fenomen som krypning, tixotropi samt anisotropi inte beaktas. För att få en fullständig bild krävs en mer avancerad jordmodell.

Fortsatta studier kan lämpligen undersöka vilka alternativa jordmodeller som kan beskriva tillbakagången på ett mer adekvat sätt. Även vidare undersökningar av permeabilitetens och anisotropins påverkan och en jämförelse mellan olika geometrier samt dess effekter i 2D- respektive 3D-modellering kan bidra med viktig kunskap om massundanträngningens tillbakagång.

Litteraturförteckning

Abu-Farsakh, M., Rosti, F., & Souri, A. (2015). Evaluating pile installation and subsequent thixotropic and consolidation effects on setup by numerical simulation for full-scale pile load tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(11), 1734–1746. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0470>

Azizi, F. (2000). *Applied analyses in geotechnics* (1st ed.). Abingdon: Taylor & Francis.

Baligh, M. M. (2008). Strain Path Method. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(9), 1108–1136. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1985\)111:9\(1108\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1985)111:9(1108))

Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Zampich, L., & Manoj, N. R. (2019a). *Material Models Manual - Plaxis*.

Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Zampich, L., & Manoj, N. R. (2019b). *Plaxis 2D - Tutorial Manual*. Plaxis.

Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Zampich, L., & Manoj, N. R. (2019c). *Plaxis 2D Reference Manual 2019*. Rotterdam, Netherlands, Balkema.

Burland, J. B., & Roscoe, K. H. (1968). On the generalized stress-strain behavior of “wet” clay. *Journal of Terramechanics*, 7(2), 107–108. [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(70\)90160-6](https://doi.org/10.1016/0022-4898(70)90160-6)

Carter, J. P., Randolph, M. F., & Wroth, C. P. (1979). Stress and pore pressure changes in clay during and after the expansion of a cylindrical cavity. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 3(4), 305–322. <https://doi.org/10.1002/nag.1610030402>

Castro, J., & Karstunen, M. (2010). Numerical simulations of stone column installation. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(10), 1127–1138. <https://doi.org/10.1139/t10-019>

Clarke, B. G. (2017). *Engineering of Glacial Deposits* (1st ed.). New York: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315149356>

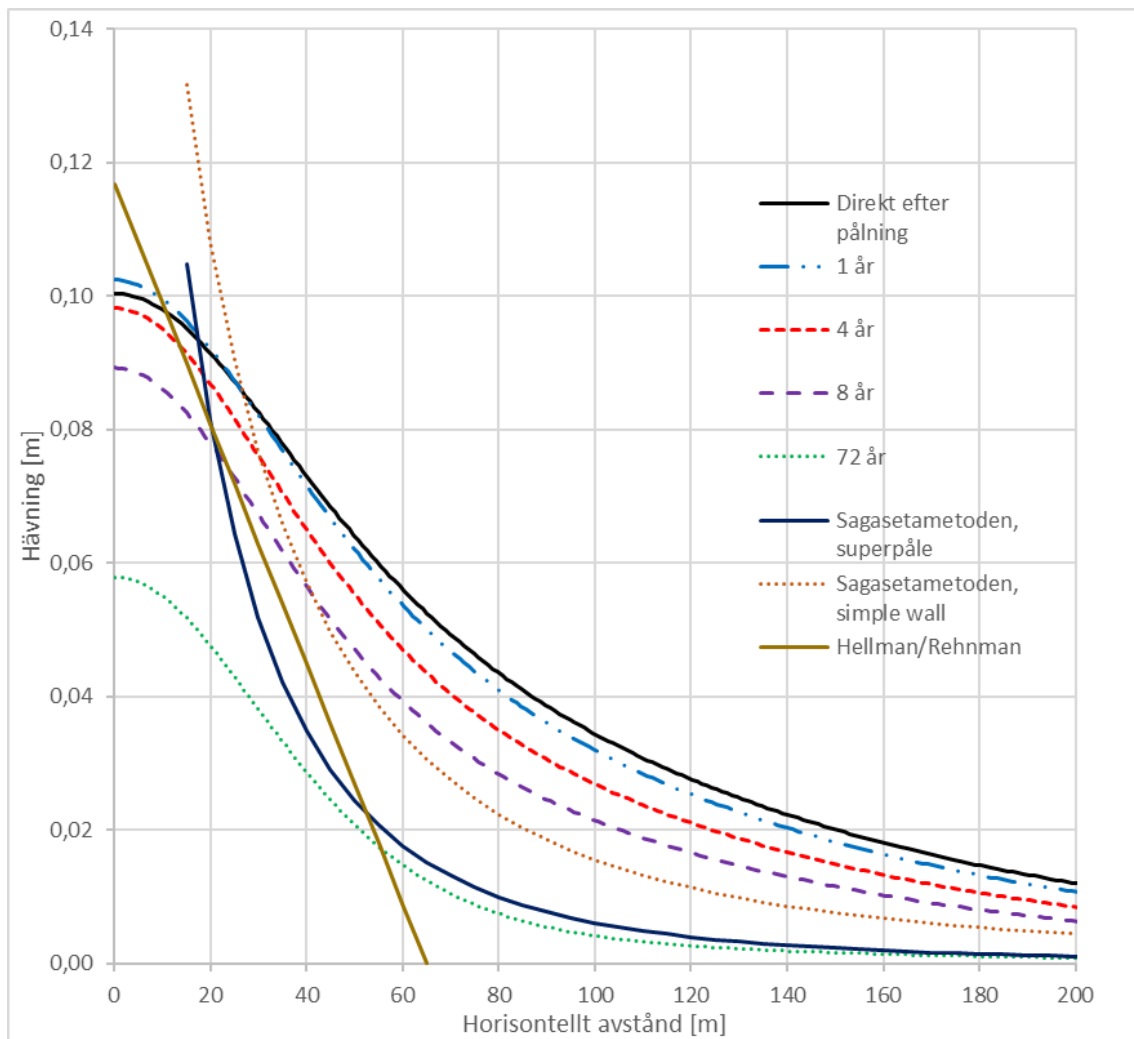
- Edstam, T. (2011). *MASSUNDANTRÄNGNING I SAMBAND MED PÅLSLAGNING I LERA*. Göteborg.
- Edstam, T. (2012). *Skäranbrons rörelser vid pålslagning för den närliggande Partihallsbron*. Göteborg.
- Johansson, B., & Jendeby, L. (1998). *Portrycksökningar till följd av påslagning och dess betydelse för stabiliteten*. Göteborg.
- Lees, A. (2016). *Geotechnical Finite Element Analysis - a practical guide* (1st ed.). London: ICE publishing. <https://doi.org/10.1680/gfea.60876.001>
- Pålkommissionen. (2018). *Pålstatistik för Sverige 2017*. Stockholm.
- Pestana, J. M., Hunt, C. E., Bray, J. D. (2002). Soil Deformation and Excess Pore Pressure Field around a Closed-Ended Pile. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(1), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:1(1))
- Sagaseta, C., Whittle, A. J., & Santagata, M. (1997). Deformation analysis of shallow penetration in clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 21(10), 687–719. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9853\(199710\)21:10<687::AID-NAG897>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9853(199710)21:10<687::AID-NAG897>3.0.CO;2-3)
- Sagaseta, C., & Whittle, A. J. (2001). PREDICTION OF GROUND MOVEMENTS DUE TO PILE DRIVING IN CLAY. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(January), 55–66.
- Sällfors, G. (2013). *Geoteknik - Jordmateriallära, jordmekanik* (5th ed.). Göteborg: Cremona Förlag.
- Sexton, B. G., & McCabe, B. A. (2014). Modeling stone column installation in an elasto-viscoplastic soil. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 9(5), 500–512. <https://doi.org/10.1179/1939787914y.0000000090>
- Sheil, B. B., McCabe, B. A., Hunt, C. E., & Pestana, J. M. (2015). A practical approach for the consideration of single pile and pile group installation effects in clay: Numerical modelling. *Journal of Geo-Engineering Sciences*, 2(3,4), 119–142. <https://doi.org/10.3233/jgs-140027>
- Shien, N. K. (2013). Cavity Expansion Approach In Modelling Stone Column Installation Effect. *International Journal of Advances in Engineering Science and Technology*, (2), 252–260. <https://doi.org/10.13140/2.1.4240.8649>
- Wood, D. M. (2019). *A particular elastic—plastic model: Cam clay*. In *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics* (pp. 112–138). Cambridge: Cambridge University Press.

bridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878272.006>

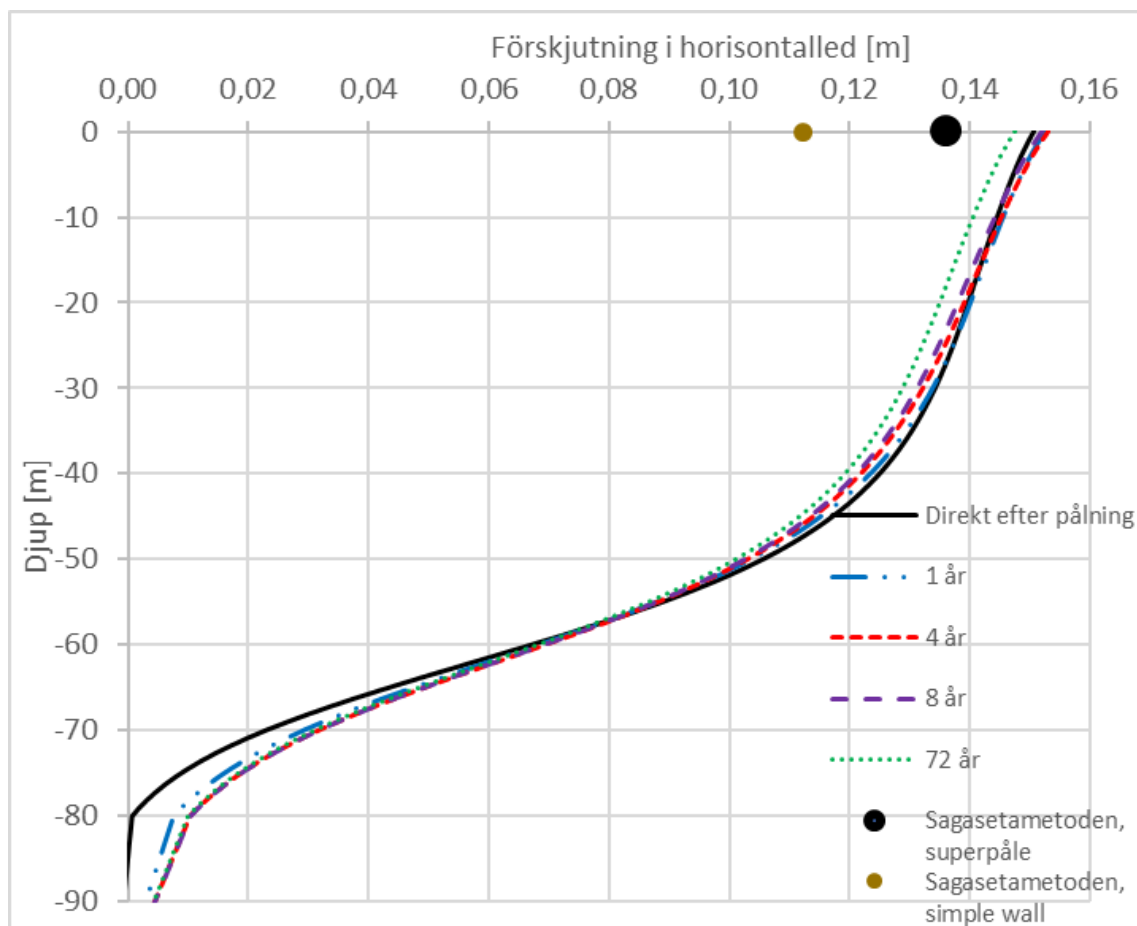
Wood, T. (2014). Phase 3 – *Site Characterization and Sensitivity Analysis RegionCity*.

A

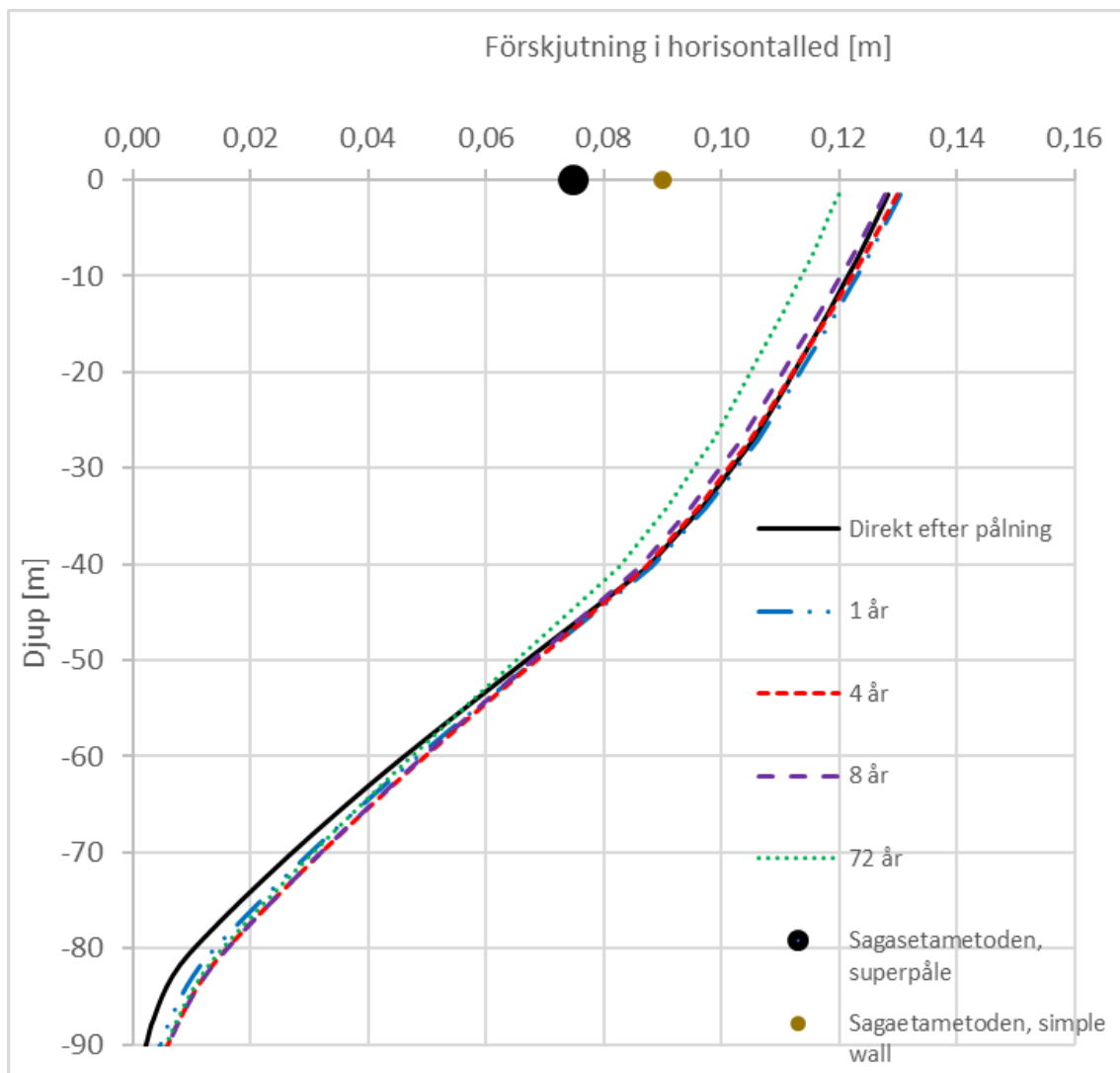
Appendix



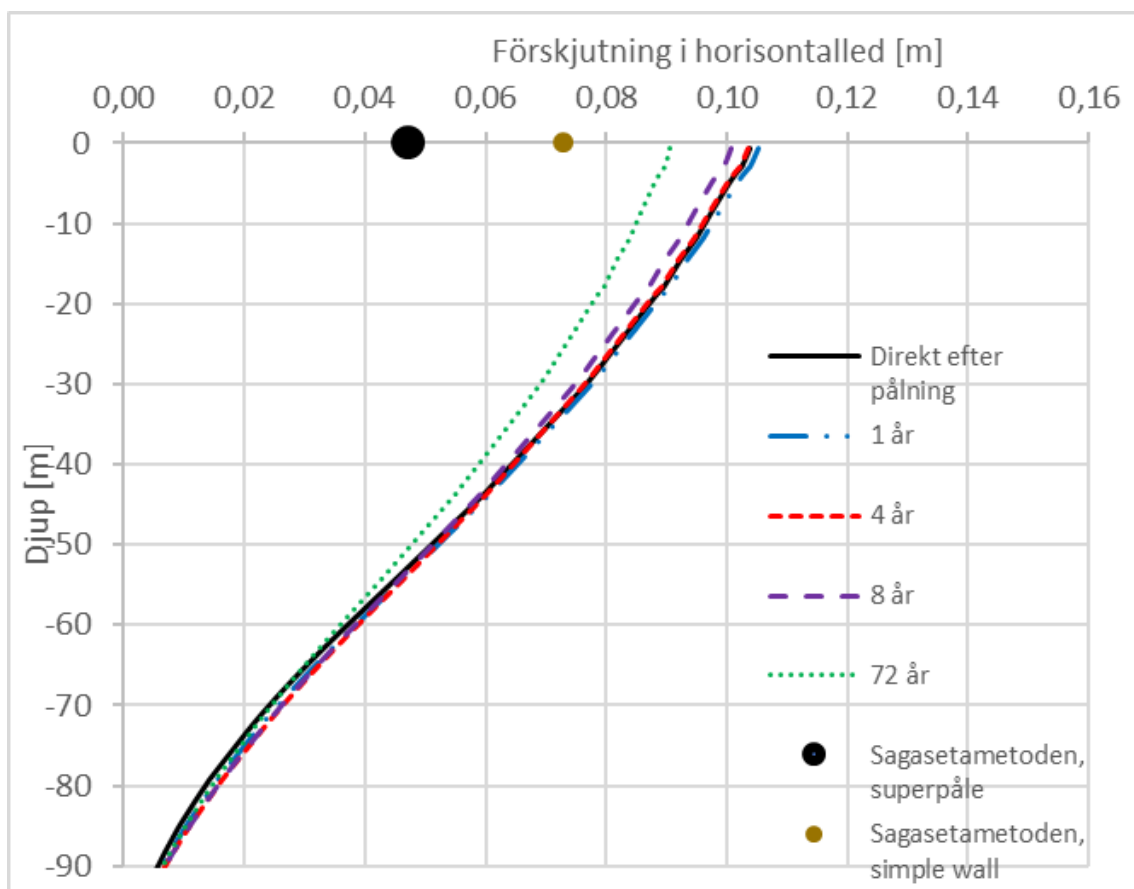
Figur A.1: Hävning vid markytan enligt MCC-modell i Plaxis 2D.



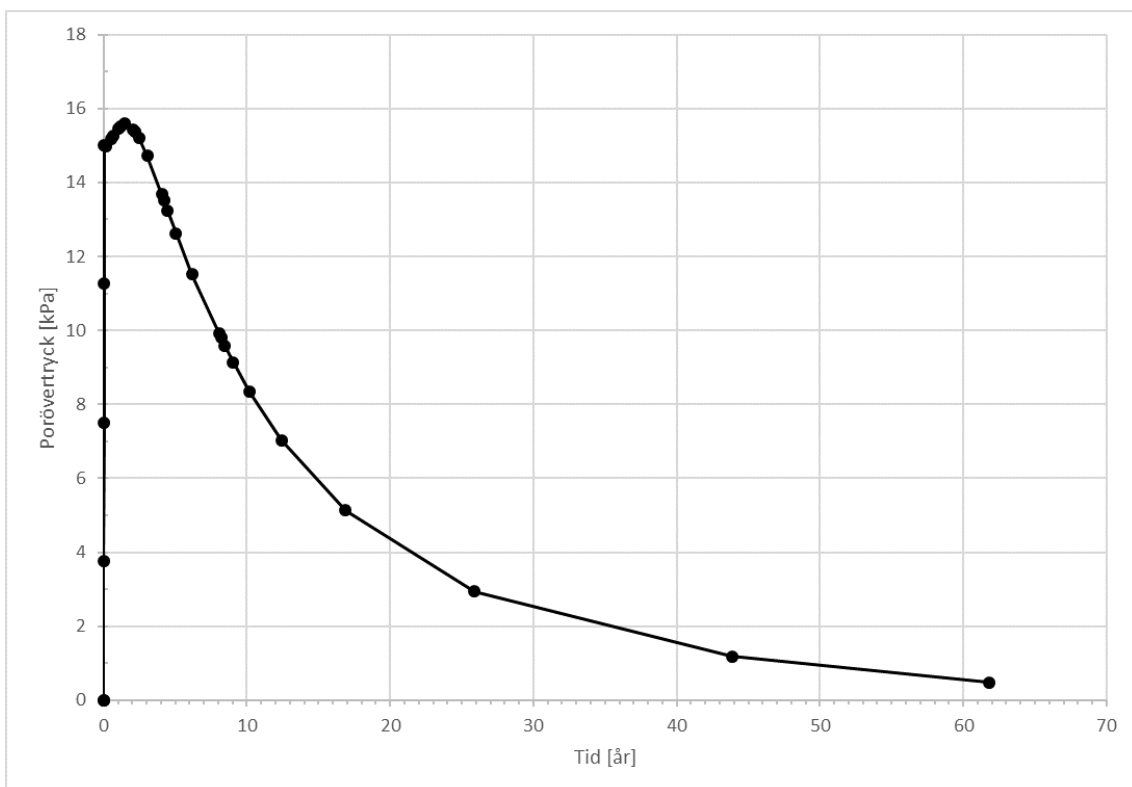
Figur A.2: Förskjutning i horisontalled, 20 meter ifrån pålområdet, enligt MCC-modell i Plaxis 2D.



Figur A.3: Förskjutning i horisontalled, 40 meter ifrån påloområdet, enligt MCC-modell i Plaxis 2D.



Figur A.4: Förskjutning i horisontalled, 60 meter ifrån pålområdet, enligt MCC-modell i Plaxis 2D.



Figur A.5: Poröverttryck över tid i nod (20,-20) enligt Soft-soil modell i Plaxis 2D.