

CHALMERS



Dimensionering av en betongplatta på lös undergrund

En jämförelse mellan tre beräkningsprogram

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad

CHRISTINA EDSTRÖM

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
Forskargrupp Geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2006
Examensarbete 2006:116

EXAMENSARBETE 2006:116

Dimensionering av en betongplatta på lös undergrund

En jämförelse mellan tre beräkningsprogram

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och Vatten

CHRISTINA EDSTRÖM

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för Geologi och Geoteknik

Forskargrupp Geoteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2006

Dimensionering av betongplatta på lös undergrund
En jämförelse mellan tre beräkningsprogram
Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och Vatten
CHRISTINA EDSTRÖM

© CHRISTINA EDSTRÖM, 2006

Examensarbete 2006:116
Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för *Geologi och Geoteknik*
Forskargrupp Geoteknik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Chalmers Reproservice
Göteborg 2006

Design of a Concrete Plate on Soft Clay
A Study of Three Computer Programs
Master's Thesis in the Master Degree Programme Civil Engineering
CHRISTINA EDSTRÖM
Department of Civil and Environmental Engineering
Division of GeoEngineering
Geotechnical Engineering Research Group
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Today more effective computer programs are in use, regarding design of geotechnical constructions. There is a risk that the theoretical background of the computer programs, its limitations and the signification of the choice of soil parameter is forgotten when the computer programs become more user-friendly.

This Master thesis deals with simulation and analysis regarding three computer programs, FEM-design, with the addition Raft, Plaxis and BE-slab. Comparisons are made for settlement and maximum moment in a concrete-plate. FEM-design is a three dimensional FEM-program, foremost created for design engineers. Plaxis is a two dimensional FEM-program, intended for geotechnical engineers while BE-Slab is a Boundary elements program in two dimensions that is mainly used by design engineers. Apart from the theoretical computer programs' models of calculation, some material models and their soil parameter are discussed in this Master thesis.

The area treated in this Masters thesis is located in Älvsborgs harbor in Gothenburg. The bed sequence of the soil contains of fill with underlying clay, moraine and bedrock. Four cases of calculations regarding the bed sequence of the soil are being used when simulating. These cases prove the significance of the soil thickness and the thoroughness of soil parameter determination. This Master thesis discusses how the soil parameters for fill and clay are being obtained and which characteristics give the greatest effects on the settlement and maximum moment.

Since the soil parameters of the fill often are inhomogeneous with a large variation over a small area, they are the hardest to estimate. For clay, on the other hand, the investigation methods and possibilities to determine the material characteristics are good. Variations in the clay parameters give a big effect on the resulting settlement and maximum moment. The fill, on the other hand, has a much lesser effect on the settlement and the maximum moment. Beside the soil parameters, it is foremost the theoretical computer programs' models of calculation that effect the resulting settlement and maximum moment. There is a relatively big difference between the three computer programs, which can be due to the models of calculation. Because of that it is very important to be aware of the theoretical computer programs' models of calculation, and if the computer program see the concrete plate as a part of a bigger plate or not.

Key words; Fill, soft clay, soil parameters, settlement, maximum moment, material models, computer programs, comparison

Dimensionering av betongplatta på lös undergrund
En jämförelse mellan tre beräkningsprogram
Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och Vatten
CHRISTINA EDSTRÖM
Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
Forskargrupp Geoteknik
Chalmers Tekniska Högskola

SAMMANFATTNING

Vid dimensionering av geokonstruktioner används idag allt mer effektiva datorprogram. Det finns dock en risk att datorprogrammets teoretiska bakgrund, begränsningar samt betydelsen av valet av jordmaterialparametrar glöms bort när beräkningsprogrammen blir allt mer användarvänliga.

Det här examensarbetet behandlar simulering och analys i tre olika datorprogram, FEM-design bottenplatta med tilläggsmodulen Raft, ett FEM-program i tre dimensioner främst utarbetat för konstruktörer, Plaxis, ett FEM-program i två dimensioner utarbetat för geokonstruktioner samt BE-slab ett Boundary elements program i två dimensioner utarbetat främst för konstruktörer. Jämförelse sker för totalsättning samt för det maximala momentet i en överliggande betongplatta.

Förutom datorprogrammets teoretiska beräkningsmodeller diskuteras även ett par olika materialmodeller och dess ingående jordmaterialparametrar. Examensarbetet utgår från en provyta i Älvsborgshamnen i Göteborgs Hamn där geotekniska undersökningar har utförts i flera omgångar. Vetskapen om områdets jordmaterial är därför relativt goda och jordlagerföljden består av ett fyllnadsmaterial med underliggande lera, morän och berg. Jordmaterialparametrar för fyllnadsmaterial och lera tas fram. Fyllnadsmaterialets jordmaterialparametrar är svårast att bedöma eftersom fyllnadsmaterial ofta är inhomogent med stor variation över en relativt liten yta. Undersökningsmetoderna för lera är desto bättre och möjligheterna att bestämma lerans materialparametrar är goda.

Vid simuleringarna används fyra stycken grundfall av jordlagerföljden som vid analys påvisar betydelsen hos de olika jordmaterialens mäktighet och noggrannhet i bestämmandet av materialparametrar. Känslighetsanalys visar att variation i lerans materialparametrar ger stort utslag på resultatet, medan förändring av fyllnadsmaterialets materialparametrar ger ett mycket mindre utslag på resultatet. Förutom jordmaterialparametrarna är det främst beräkningsmodellens randvillkor och lastspridning som påverkar resultaten. Det är relativt stor skillnad mellan resultaten från de tre datorprogrammen vilket beror på olika randvillkor och lastspridning. Det är därför viktigt att vid dimensionering av en betongplatta på mark vara medveten om datorprogrammets randvillkor och huruvida datorprogrammet ser betongplattan som en del av en större yta eller inte.

Nyckelord: Fyllnadsmaterial, lös lera, jordmaterialparametrar, slutsättning, moment, materialmodeller, dimensioneringsprogram, randvillkor, jämförelse

Förord

Rapporten är ett examensarbete med inriktning mot geoteknik och är utfört under hösten 2005 vid Chalmers tekniska högskola, institutionen för Geologi och Geoteknik. Ramböll Sverige AB har bistått med idéer och arbetsverktyg.

Jag vill tacka alla som hjälpt och inspirerat mig under examensarbetets gång. Ett stort tack till Gunilla Franzén som varit min handledare och ställt upp med värdefull hjälp och långa nyttiga diskussioner. Ett stort tack även till Professor Göran Sällfors från institutionen Geologi och Geoteknik som har varit handledare och examinator för examensarbetet. Tack riktas även till Håkan Garin som främst hjälpt till med handledning för konstruktionsberäkningarna och Carl Jonsson Skanska Teknik för hjälp med teorin bakom beräkningsprogrammen.

Februari 2006

Christina Edström

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Problembeskrivning och frågeställningar	2
1.3	Syfte och Metod	2
1.4	Avgränsning och ambitionsnivå	2
2	MATERIALEGENSKAPER	3
2.1	Fyllning	3
2.1.1	Bildningssätt	3
2.1.2	Fält- och laborationsundersökningar	3
2.1.3	Parameterbestämning	4
2.2	Lera	6
2.2.1	Bildningssätt	6
2.2.2	Fält- och laborationsundersökningar	6
2.2.3	Parameterbestämning	7
3	MATERIALMODELLER	10
3.1	Linjärelastiskt	10
3.2	Mohr Coulomb	11
3.3	Olika typer av moduler	12
4	BERÄKNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR	16
4.1	Områdesbeskrivning	16
4.2	Geotekniska förhållanden	18
4.3	Beräkningsfall	18
4.4	Vald jordmodell	19
4.5	Materialdata betongplattan	21
4.6	Lastfall	22
5	SIMULERING	24
5.1	Handberäkning	24
5.1.1	Sättningsberäkning	24
5.1.2	Moment	25
5.2	FEM-design bottenplatta med tilläggsmodulen Raft	26
5.2.1	Beräkningsmetod samt ingående parametrar	26
5.2.2	Utförande	28
5.2.3	Programmets fördelar och nackdelar	29

5.3	Plaxis	30
5.3.1	Beräkningsmetod samt ingående parametrar	30
5.3.2	Utförande	31
5.3.3	Programmets fördelar och nackdelar	32
5.4	BE-slab	33
5.4.1	Beräkningsmetod samt ingående parametrar	33
5.4.2	Utförande	34
5.4.3	Programmets fördelar och nackdelar	34
6	RESULTAT	36
6.1	Jordmodellens inverkan på resultatet	36
6.1.1	Grundfall	36
6.1.2	Inverkan av lerans kompressionsmodul	39
6.1.3	Inverkan av fyllningen	42
6.2	Beräkningsmodellens inverkan på resultatet	45
6.2.1	Totalsättning	45
6.2.2	Moment	46
6.3	Tidsberoende sättningar	47
7	ANALYS	50
7.1	Jordmodellens inverkan på totalsättningen	50
7.1.1	Jordmodellens geometris inverkan på totalsättningen	50
7.1.2	Fyllnadsmaterialets mäktighet inverkan på totalsättningen	52
7.1.3	Lerans kompressionsmoduls betydelse för totalsättningen	54
7.1.4	Fyllnadsmaterialets egenskapers betydelse för totalsättningen	56
7.1.5	Sammanställning	57
7.2	Jordmodellens inverkan på momentet	57
7.2.1	Jordmodellens geometris inverkan på betongplattans moment	57
7.2.2	Fyllnadsmaterialets mäktighet inverkan på betongplattans moment	59
7.2.3	Lerans kompressionsmoduls betydelse för betongplattans moment	60
7.2.4	Fyllnadsmaterialets betydelse för betongplattans moment	62
7.2.5	Sammanställning	64
7.3	Beräkningsmodellens inverkan på totalsättningen	64
7.3.1	Randvillkorens inverkan på totalsättningen	65
7.3.2	Lastspridningens inverkan på totalsättningen	66
7.3.3	Förändrade randvillkor	67
7.3.4	Sammanställning	67
7.4	Beräkningsmodellens inverkan på momentet	68
7.4.1	Randvillkorens inverkan på momentet	68
7.4.2	Lastspridningens inverkan på momentet	69
7.4.3	Förändrade randvillkor	69
7.4.4	Sammanställning	69
7.5	Tidsberoende sättningar	69
8	SLUTSATS	71

Bilagor

- Bilaga 1 CRS försök
- Bilaga 2 Figurer med ingående materialparametrar för beräkningsfallen
- Bilaga 3 Schematisk figur av betongplattan i FEM-design bottenplatta/Raft
- Bilaga 4 Materialparametrar Plaxis
- Bilaga 5 Schematisk figur av beräkningsmodellen i Plaxis
- Bilaga 6 Schematisk figur av betongplattan i BE-slab
- Bilaga 7 Materialparametrar känslighetsanalys

- Bilaga 8 Momentdiagram från handberäkning
- Bilaga 9 Momentdiagram Plaxis grundfallen
- Bilaga 10 Momentdiagram FEM-design bottenplatta grundfallen
- Bilaga 11 Momentdiagram BE-slab grundfallen
- Bilaga 12 Momentdiagram BE-slab enbart fyllning

- Bilaga 13 Momentdiagram från simulering i Plaxis där jordlagerföljden förflyttas utåt i förhållande till betongplattan.

Diagram-, figur- och tabellförteckning

- Diagram 4.1 Lerans modul från CRS-försök
Diagram 4.2 Lerans korrigerade skjuvhållfasthet
Diagram 6.1 Totalsättning för handberäkningen grundfallen A – D
Diagram 6.2 Totalsättning för Plaxis grundfall A – D
Diagram 6.3 Totalsättning p.g.a. den yttre lasten för FEM-design bottenplatta/Raft för grundfall A – D
Diagram 6.4 Betongplattans maximala moment för Plaxis grundfall A – D
Diagram 6.5 Betongplattans maximala moment för FEM-design bottenplatta/Raft för grundfall A – D
Diagram 6.6 Betongplattans maximala moment för BE-slab för grundfall A – D
Diagram 6.7 Totalsättning på grund av den yttre lasten för Plaxis då lerans kompressionsmodul förändrats med 25 %
Diagram 6.8 Totalsättning på grund av den yttre lasten för FEM-design bottenplatta/Raft då lerans kompressionsmodul förändrats med 25 %
Diagram 6.9 Betongplattans maximala för Plaxis då lerans kompressionsmodul förändrats med 25 %
Diagram 6.10 Betongplattans maximala för FEM-design bottenplatta/Raft då lerans kompressionsmodul förändrats med 25 %
Diagram 6.11 Totalsättning på grund av yttre laster vid reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul för Plaxis
Diagram 6.12 Totalsättning på grund av yttre laster vid reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul för FEM-design bottenplatta/Raft
Diagram 6.13 Betongplattans maximala moment vid reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul för Plaxis
Diagram 6.14 Betongplattans maximala moment vid reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul för FEM-design bottenplatta/Raft
Diagram 6.15 Betongplattans maximala moment vid simulering av enbart fyllnadsmaterial i BE-slab
Diagram 6.16 Sammanställning av totalsättningen på grund av yttre last
Diagram 6.17 Sammanställning av betongplattans maximala moment
Diagram 6.18 Sammanställning av konsolideringssättningarna p.g.a. fyllnadsmaterialet för handberäkning
Diagram 6.19 Sammanställning av konsolideringssättningar samt de momentana sättningarna p.g.a. fyllnadsmaterialet för handberäkning
Diagram 6.20 Sammanställning av tidsättningar Plaxis
Diagram 7.1 Jämförelse av jordmodellernas inverkan på totalsättningen p.g.a. yttre last
Diagram 7.2 Fyllnadsmaterialets mäktighets betydelse för totalsättningen p.g.a. yttre last
Diagram 7.3 Totalsättning per meter p.g.a. fyllnadsmaterialet
Diagram 7.4 Känslighetsanalys för lerans kompressionsmodul
Diagram 7.5 Sättningsförändring vid känslighetsanalys av lerans kompressionsmodul i Plaxis
Diagram 7.6 Sättningsförändring vid känslighetsanalys av lerans kompressionsmodul i FEM-design bottenplatta/Raft
Diagram 7.7 Förändring totalsättning p.g.a. yttre last vid reduktion av fyllnadsmaterialet elasticitetsmodul
Diagram 7.8 Jordmodellens geometris betydelse på betongplattans maximala moment
Diagram 7.9 Betydelsen av fyllnadsmaterialets mäktighet på betongplattans moment
Diagram 7.10 Förändring av betongplattans moment vid känslighetsanalys av lerans kompressionsmodul för Plaxis
Diagram 7.11 Förändring av betongplattans moment vid känslighetsanalys av lerans kompressionsmodul för FEM-design bottenplatta/Raft
Diagram 7.12 Betydelsen av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul för betongplattans moment
Diagram 7.13 Simulering av enbart fyllnadsmaterialet i BE-slab
Diagram 7.14 Totalsättning p.g.a. yttre last för grundfallen
Diagram 7.15 Betongplattans maximala moment för grundfallen
- Figur 2.1 Typexempel av lerans spänning-deformationssamband
Figur 3.1 Deformationssamband för linjärelastisk materialmodell
Figur 3.2 Deformationssamband för ett elastiskt-plastiskt material
Figur 3.3 Mohr Coulomb materialmodell
Figur 3.4 Schematisk bild över elasticitetsmodulen
Figur 3.5 Schematisk bild över kompressionsmodulen
Figur 3.6 Schematisk bild över skjuvmodulen

Figur 4.1 Översiktlig ritning med geotekniska undersökningar
Figur 4.2 Skisser över de olika beräkningsfallen
Figur 4.3 Översiktsbild containerplacering
Figur 5.1 Schematisk bild av betongplattan med yttre och inre laster
Figur 5.2 Exempel av ett snitt av betongplattan
Figur 5.3 Schematisk bild över iterationssteg i FEM-design bottenplatta/Raft
Figur 5.4 Schematisk bild över iterationssteg i Plaxis
Figur 6.1 Resultat där tidsättningarna beräknas i Plaxis

Tabell 2.1 Parameterbestämning fyllning
Tabell 2.2 Karakteristiska värden för friktionsmaterial
Tabell 5.1 Indatavärden för jordlagren i FEM-design bottenplatta/Raft
Tabell 5.2 Indatavärden för jordlagren i BE-slab

Beteckningar

Grekiska versaler

\varnothing Friktionsvinkel [$^{\circ}$]

Grekiska gemena

γ Jordmaterialets tunghet [kN/m^3]

γ_w Vattnets tunghet [kN/m^3]

δ Sättning [m]

ε Töjning [%]

ε^e Elastiska deformationer [%]

ε^p Plastiska deformationer [%]

μ Korrigeringskoefficient [%]

ν Kontraktionstal

ρ Densitet [kg/m^3]

σ Spänning [kN/m^2]

σ'_0 Effektivspänning [kN/m^2]

σ'_c Förkonsolideringstryck [kN/m^2]

$\Delta\sigma$ Vertikal spänningsförändring [kN/m^2]

τ Skjuvhållfasthet [kN/m^2]

Latinska versaler

B Bäddmodul [kN/m^3]

E Elasticitetsmodul [kN/m^2]

G Skjuvmodul [kN/m^2]

L Längd [m]

M Kompressionsmodul [kN/m^2]

M_0	Kompressionsmodul för momentana sättningar [kN/m ²]
M_L	Kompressionsmodul för konsolideringssättningar [kN/m ²]
M_x	Snittmomentet [kNm]
P	Pålagd kraft [kN]
R	Radie [m]
T_x	Tvärkraft [kN]
W_L	Konflytgräns [%]

Latinska gemena

c'	Cohesion [kN/m ²]
c_v	Konsolideringskoefficient [m ² /s]
h	Jordlagrets höjd [m]
k	Permeabilitet [m/s]
q	Jordtryck [kN/m]
x	Snittens horisontella bredd [m]
z	Vågrätt avstånd mellan den pålagda kraften och jordkroppen [m]

1 Inledning

I dagens samhälle finns en genomgående trend där människan förlitar sig allt mer på datorer och andra tekniska hjälpmedel. Inom geokonstruktionen har utvecklingen gått från ett stort användande av empiriska regler och handberäkningar till ett utnyttjande av datorer och beräkningsprogram. Många av de beräkningsprogram som idag används kan utföra komplicerade beräkningar som arbetar med en mer eller mindre förenklad bild av verkligheten.

Dagens pressade samhälle kräver snabba och väl avvägda resultat, varför många användare till stor del förlitar sig på beräkningsprogrammets resultat utan att reflektera över den bakomliggande beräkningsmodellen. De personer som har utvecklat de geotekniska datorprogrammen har stor kompetens när det gäller programmeringen, men är inte alltid lika kompetenta inom det geotekniska området. Det är därför viktigt att jämförelser mellan olika beräkningsprogram görs för att kontrollera resultatets rimlighet. Det är samtidigt viktigt att geotekniker reflekterar över resultatet och bedömer dess relevans.

Denna rapport behandlar en jämförelse mellan resultaten från tre geotekniska beräkningsprogram vid en dimensionering av en uppställningsplats med en betongplatta för containrar i Göteborgs hamn. De tre dataprogrammen är FEM-design bottenplatta med tilläggsmodulen Raft, Plaxis samt BE-slab. De använder olika beräkningsmodeller och beskriver verkligheten med olika modeller.

1.1 Bakgrund

Göteborgs Hamn ligger geografiskt väldigt bra och en stor del av Sveriges import- och exportvaror som transporteras med båt mellanlandar här inför vidare transport. Under senare år har Göteborgs Hamn genomgått en kraftig effektivisering och utvecklingen i Göteborgs Hamn har varit att fler containrar anländer men att deras uppehållstid i hamnen minskat. Samtidigt har nyare och tyngre containrar satts i bruk för att minska företagets transportkostnader. De tyngre containrarna kräver större och därmed även tyngre fordon för att lyftas.

Området i Älvsborgshamnen används som bakgrund till den beräkningsjämförelse som rapporten behandlar. Området är intressant då fältarbeten har utförts i flera omgångar och att kunskapen om de geotekniska förhållandena i området idag är större.

1.2 Problembeskrivning och frågeställningar

Rapporten ska belysa skillnaderna mellan beräkningsprogrammen samt ge en analys av hur stor betydelse skillnaderna har vid beräkning av deformationer och spänningar under betongplattan. Analysen kommer även att omfatta inverkan av antaganden i hur den underliggande jorden beter sig. Rapporten kommer att behandla programmets bakomliggande beräkningsmodeller samt analysera vilka antaganden, avseende underliggande jordmaterial, som har störst påverkan för resultatet. Rapporten kommer även att undersöka vilken effekt en mer noggrann efterliknelse av verkligheten ger på resultatet.

Frågor som rapporten ska belysa är:

- Hur stor betydelse har valet av datorprogram och därmed beräkningsmodell för resultatet?
- Materialparametrarnas betydelse för resultatet?
- Vilket jordlager och vilka egenskaper har störst betydelse?
- Betydelsen av jordmodellens geometri

1.3 Syfte och Metod

Rapporten ska ge en ökad förståelse för de beräkningsmodeller som ligger till grund för några av dagens beräkningsprogram vid dimensionering av en platta på mark. Rapporten ska även ge ett vidare synsätt för huruvida små förändringar i materialförutsättningar kan medföra påtagliga ändringar på resultatet.

För att få en övergripande bild av området samt skapa en första geologisk modell studerades befintligt material och gamla undersökningar. Övrig information fås genom litteraturstudie samt studier av tidigare rapporter. Tre olika beräkningsprogram har använts med samma geologiska jordmodell som grunddata.

1.4 Avgränsning och ambitionsnivå

Denna studie är avgränsad till att gälla de geotekniska förutsättningarna och dess inverkan på den överliggande betongplattans dimensionering. Rapporten omfattar inte dimensionering av betongplattan, utan enbart vilka inre krafter betongplattan ska klara. Avgränsning görs även vid att rapporten inte behandlar några stabilitetsberäkningar utan ett antagande görs att provytan är stabil. Dessutom bortses från krypsättningar vid beräkning av de tidsberoende sättningarna.

Min önskan är att genom ett väl utfört arbete öka mina kunskaper inom området geoteknik. Förhoppningen är att de kunskaper jag erhåller under arbetets gång ska vara en god tillgång för mitt framtida yrkesliv.

2 Materialegenskaper

Älvsborgshamnen fylldes ut under 1960-talet genom att ett fyllnadsmaterial tippades på den då lösa leran på Göta älvs botten.¹ Jordlagerföljden i Älvsborgshamnen består därför av ett fyllnadsmaterial överliggande en lös lera på morän och sluttande berg.

2.1 Fyllning

Benämningen fyllning eller fyllnadsmaterial används för många olika typer av material och vid många olika förhållanden. Överlag består ett fyllnadsmaterial av många olika kornstorlekar, allt från sprängsten ner till fina jordarter såsom lera. Ett fyllnadsmaterial som det som återfinns i Älvsborgshamnen är svårt att ge säkra parametrar då fyllnadsmaterialet inte är homogent utan varierar mycket på enbart några meter. Vilka egenskaper ett fyllnadsmaterial har beror på de ingående materialen men även på hur de är placerade i jordlagerföljden. Det har stor betydelse om fyllnadsmaterialet är homogent eller om det till exempel har olika skikt.

2.1.1 Bildningsätt

Ett fyllnadsmaterial har ingen naturlig bildning utan är enbart skapat utav mänsklig hantering. I stort kan ett fyllnadsmaterials beståndsdelar delas in i tre grupper. Den första gruppen och den som normalt upptar störst del är de naturligt skapade jord- och bergarterna såsom sten, sand, lera etcetera. De här jordmaterialen har skapats genom naturliga processer under en mycket lång tid. Till denna grupp tillhör även sprängsten och andra jordmaterial vars kornstorlek förändrats av människan. Även om jordmaterialen är naturliga i sig själva förändras många av deras egenskaper vid bortschaktning och dumpning på en ny plats. Det är vid dessa förhållanden framförallt packningsgraden som förändras, vilket påverkar brottegenskaperna.

Den andra gruppen och den som är den mest svårbestämda är avfallsmaterial från mänsklig verksamhet såsom till exempel glas, tegel, plåt, kylskåp etcetera. Den tredje gruppen är organiskt material som medför stora svårigheter att parameterbestämma då dess egenskaper förändras mycket med tiden.

2.1.2 Fält- och laborationsundersökningar

För att kunna bestämma ett fyllnadsmaterials egenskaper är det viktigt att veta materialinnehållet samt dess spridning i området. För att bestämma materialinnehållet bör områdets historik först undersökas. Den ger ofta en bild av om fyllnadsmaterialet kommer från samma källa eller om fyllnadsmaterialet tagits från flera platser, samt vilken typ av fyllnadsmaterial som använts. Även om områdets historik ofta ger en

¹ Bergenfeldt Allan, Göteborgs Geotekniska Historia

god överblick är den bästa metoden för att bestämma materialinnehållet att gräva provgropar då de ger en noggrann bild av innehållet vid den aktuella gropen. Ett problem med provgropar är att materialinnehållet kan ha en kraftigt varierande spridning även över en liten markyta. Det är därför viktigt att säkerhetsställa materialinnehållet och dess spridning genom att göra flertalet provgropar. Det går självklart aldrig att vara helt säker på fyllnadsmaterialets egenskaper då det skulle innebära att schakta bort hela fyllnadsmaterialet, vilket inte är ekonomiskt försvarbart.

Från provgropen i fält tas materialprover på olika djup för att sortbestämma dem i laboratoriet. De ytterligare laborationsundersökningar som främst ger gynnsam information om fyllnadsmaterialet är de som ger fakta om materialets kornfördelning för olika djup och halten organiskt material.

2.1.3 Parameterbestämning

För att bestämma fyllnadsmaterialets egenskaper är det främst viktigt att veta finjordsinnehållet, halten av organiskt material, fyllnadsmaterialets spridning, packningsgrad samt under vilka förhållanden materialet har packats.²

Finjordsinnehållet påverkar främst fyllnadsmaterialets deformationsegenskaper och dess tjälkänslighet. Om fyllnadsmaterialet innehåller stor andel finjordsmaterial ansamlas vatten lättare och sannolikheten för tjälskott ökar. Innehåller däremot fyllnadsmaterialet lite finjordsmaterial och istället består av större stenar och block bildas lätt hålrum, de kan leda till kraftiga deformationer om de pressas samman när marken belastas. Överlag kan dock ett fyllnadsmaterial anses dränerat då den ofta innehåller större kornstorlekar.²

Det organiska materialet påverkar fyllnadsmaterialets egenskaper redan vid mycket små halter. Det beror främst på att det har en låg elasticitetsmodul.³ Ett annat problem med bestämning av det organiska materialets egenskaper är att de förändras över tiden då det organiska materialet förmultnar.

Hur de olika materialen är fördelade i fyllningen är av störst betydelse om materialet är skiktat, det vill säga om det finns ett svagare skikt.

Fyllnadsmaterialets relativa fasthet har även det betydelse för fyllnadsmaterialets deformation. Ett väl packat jordmaterial har en mindre tendens att deformeras än ett löst jordmaterial. Det är svårt att mäta ett fyllnadsmaterials relativa fasthet utan en bedömning får göras i fält. Om det finns information angående hur materialet packades och under vilka förhållanden det skedde ska det tas in i beräkningen. Det är stor skillnad på ett jordmaterial som enbart packats av sin egetyngd och ett jordmaterial som packats med hjälp av maskiner.

² Marshak Stephen, Earth a portrait of a planet

³ Bergdahl Ulf, Plattgrundläggning

Ur en byggnadsteknisk synvinkel är det den svagaste länken som har störst betydelse. Det är därför viktigt att skapa en övergripande bild av fyllnadsmaterialet och dess spridning i området för att kunna avgöra vad som har störst betydelse, se Tabell 2.1 nedan.

Tabell 2.1 Parameterbestämning fyllning

	Inre friktionsvinkel φ_k [°]	Elasticitetsmodul E [MPa]
Stor andel finjordsinnehåll	Minskar	Minskar
Stor andel organiskt material	Minskar	Minskar
Hög relativ fasthet	Ökar	Ökar

2.1.3.1 Empiriska regler

Även om den tekniska utvecklingen har medfört att fler materialegenskaper kan mätas i fält och i laboratoriet används fortfarande empiriska värden i stor utsträckning. De empiriska värdena är framtagna genom erfarenhet och baseras på resultat från många undersökningsprojekt. I Sverige är det främst Statens geotekniska institut (SGI), Vägverket och Banverket som ger ut vägledning för materialegenskaper.

Eftersom fyllnadsmaterial ofta innehåller en stor mängd olika material är det även empiriskt svårt att fastställa dess egenskaper. Det är viktigt att kontrollera fyllnadsmaterialets egenskaper enligt kapitel 2.1.3, parameterbestämning och utefter det väga samman karakteristiska värden för de ingående materialen.

För friktionsmaterial såsom fyllnadsmaterial bestäms många karakteristiska egenskaper genom fyllnadsmaterialets relativa fasthet, se Tabell 2.2⁴, som relativt lätt går att bestämma genom sonderingsundersökningar. För fyllnadsmaterial med stora mängder sprängsten där det inte går att utföra några sonderingar, kompliceras bestämmandet av de karakteristiska egenskaperna ytterligare då det innebär att det inte finns några mätvärden från fält att jämföra med förutom de för ögat synliga. Tabell 2.2 är baserad på undersökningar av naturligt lagrad kvartsand. Den ska enbart tillämpas när det är rimligt att tro att fyllnadsmaterialets egenskaper motsvarar en naturligt lagrad sand.

⁴ Vägverket, Jord hållfasthets- och deformationsegenskaper

Tabell 2.2 Karakteristiska värden för friktionsmaterial⁵

Relativ fasthet	CPT – sondering [MPa]	Viktsondering [MPa]	Hejarsondering [MPa]	Inre friktionsvinkel ϕ_k [°]	Elasticitetsmodul E [MPa]
Mycket låg	0 - 2,5	0 - 15	0 - 4	29 - 33	< 10
Låg	2,5 - 5	15 - 30	4 - 8	33 - 35	10 - 20
Medelhög	5 - 10	30 - 50	8 - 15	35 - 37	20 - 30
Hög	10 - 20	50 - 90	15 - 30	37 - 40	30 - 60
Mycket hög	20 - 30	90 - 130	30 - 45	40 - 42	60 - 90
	> 30	> 130	> 45	42	90

2.2 Lera

Stora delar av Göteborgs jordlagerföljd består av lera och lerhaltiga jordar. Under åren har många undersökningar gjorts och det finns relativt goda kunskaper om lera och dess egenskaper.

2.2.1 Bildningssätt

Lera avsätts under vattenytan och kräver relativt lugna förhållanden eftersom lerpartikeln är mycket liten och lätt följer med ett strömt vatten⁶. En stor del av lerorna i Västsverige avsattes efter den senaste istiden för ungefär 10 000 år sedan.

Lerans egenskaper beror på om leran är avsatt i salt eller sött vatten. En lera avsatt i sött vatten är mer kompakt än en lera avsatt i saltvatten. Samtidigt sker lersedimentationen snabbare i salthaltiga vattendrag på grund av saltvattnets elektrolytiska egenskaper⁶. I Västsverige avsattes leran under saltvattenförhållanden även om smältvattnet från inlandsisen minskade salthalten.

2.2.2 Fält- och laborationsundersökningar

Vid bestämmandet av lerors egenskaper används i fält olika sonderingsmetoder. Förenklat innebär en sondering att en spetsförsedd stång förs ner i jorden och att motståndet registreras. En sondering i fält ger i stort jordlagrets relativa fasthet och djupet ner till fast botten. Resultaten från en sondering i fält utvärderas ofta med hjälp av empiriska samband.

⁵ Vägverket, Jord hållfasthets- och deformationsegenskaper

⁶ Marshak Stephen, Earth portrait of a planet

För att få ytterligare information om leran görs tester inne i laboratoriet. Det görs normalt undersökningar på både störda- och ostörda prover. De störda proverna tas normalt upp genom skruvprovtagning medan de ostörda proverna tas upp genom kolvprovtagare.

Enligt svensk standard tas på varje nivå för de ostörda proverna tre hylsor upp med hjälp av en kolvprovtagare. De ostörda proverna ger information om leran. Normalt görs konprov manuellt för att ta fram sensitiviteten och skjuvhållfastheten. Förutom det kan även så kallade CRS försök utföras på ett antal olika nivåer för att ytterligare få information om lerans deformationsmoduler, permeabiliteten och konsolideringsgrad. Ett mer komplicerat laborationstest är ett så kallat triaxialförsök. De ger mer information är ett CRS försök men är samtidigt mer kostsamt.

2.2.3 Parameterbestämning

Bindningskraften mellan lerors partiklar har stor betydelse för lerans egenskaper. Leror anses i många fall vara odränerade då de har en låg permeabilitet. Utifrån permeabiliteten kan konsolideringskoefficient (c_v) beräknas enligt ekvation 2.1 nedan⁷.

$$c_v = \frac{k \cdot M}{\gamma_w} \quad (2.1)$$

där, c_v = konsolideringskoefficient [m^2/s]

k = permeabilitet [m/s]

M = kompressionsmodul [kN/m^2]

γ_w = vattnets tunghet [kN/m^3]

Konsolideringskoefficienten är en materialparameter som anger hur snabbt sättningarna sker. Det innebär att för ett jordmaterial med hög permeabilitet sker konsolideringen momentant, medan för jordar med låg permeabilitet sker konsolideringen med en viss fördröjning då det tar tid att pressa ut det vatten som finns i marken. Leror har relativt låg permeabilitet och kännetecknas därför av höga konsolideringssättningar, vilket innebär ett långsamt sättningsförlopp.

Lerors hållfasthet korrigeras med hänseende till kornflytgränsen enligt ekvation 2.2 nedan, dock ska inte korrigeringskoefficienter över 1,2 användas.⁸ Den korrigerade skjuvhållfastheten beräknas enligt ekvation 2.3.

⁷ Sällfors Göran, Geoteknik jordmateriallära - jordmekanik

⁸ Skredkommissionen, Anvisningar för stabilitetsutredningar

$$\mu = \left(\frac{0,43}{W_L} \right)^{0,45} \quad (2.2)$$

där, μ = korrigeringskoefficient [%]

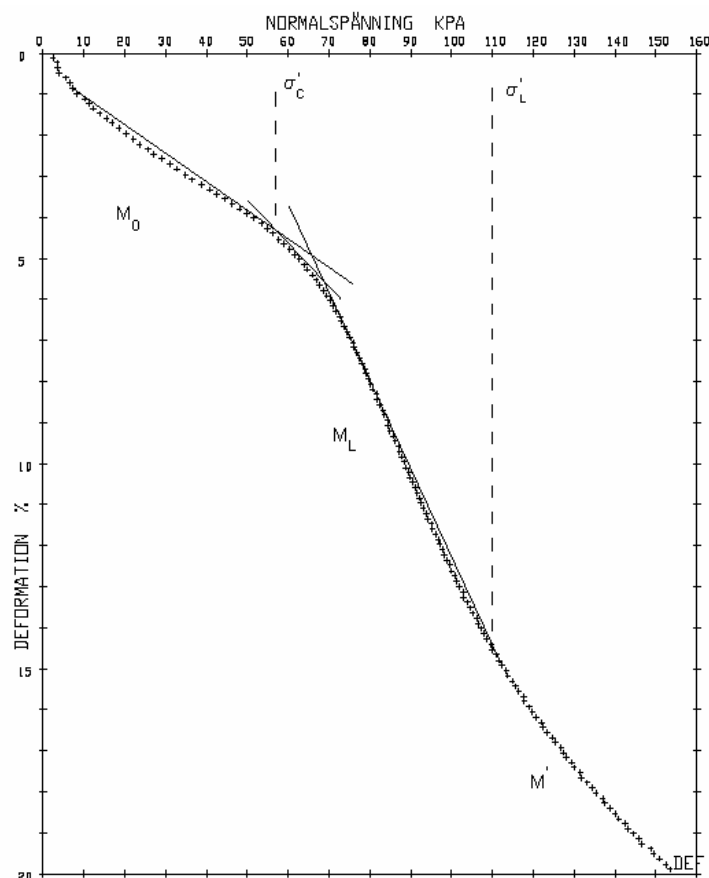
W_L = konflytgräns [%]

$$\tau_{red} = \frac{\tau_{ored}}{\mu} \quad (2.3)$$

där, τ = skjuvhållfasthet [kN/m^2]

μ = korrigeringskoefficient [%]

Modulen beskriver lerans hållfasthet och har betydelse för sättningarna. En lera med hög modul har mindre sättningar än en lera med låg modul. En leras modul tas relativt enkelt fram genom analys av dess spänning-deformations samband, se Figur 2.1 nedan.



Figur 2.1 Typexempel av lerans spänning-deformations samband

2.2.3.1 Empiriska regler

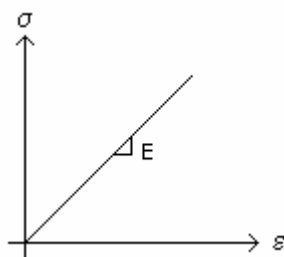
För leror finns idag goda förutsättningar för att bestämma materialets egenskaper genom fält- och laboratorieundersökningar. Empiriska samband och erfarenhetsvärden används för att bedöma informationens relevans. Empiriska värden används tidigt i projekt då mängden fältundersökningar är mindre än i slutet, strax före byggstart, då resultatmängden från undersökningar är mycket större.

3 Materialmodeller

Det finns många olika materialmodeller som alla efterliknar verkligheten på olika sätt och med olika riktighet. Beroende på vilken typ av material beräkningarna utförs för, ger de olika materialmodellerna varierande korrekta resultat. Överlag går att säga att desto mer komplex materialmodell desto fler parametrar används för att beskriva jordmaterialet.

3.1 Linjärelastiskt

Linjärelastiskt material är det enklaste materialmodellfallet. Antagandet för ett linjärelastiskt material är att det har en linjär spänning-deformationskurva, vilket innebär att då belastningen på jordmaterialet upphör återgår töjningarna efter samma linjära kurva till utgångsläget, se Figur 3.1. Det är den linjärelastiska materialmodellens största begränsning. I verkligheten börjar jordmaterial flyta efter en viss pålagd spänning, deformationen ökar inte linjärt med spänningen i oändligheten, vilket den linjärelastiska materialmodellen förutsätter.



Figur 3.1 Deformationssamband för linjärelastisk materialmodell

Den linjärelastiska materialmodellen antar att jordmaterialen är elastiska och kan beskrivas enligt Hooke's lag, se ekvation 3.1 nedan.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

där, E = elasticitetsmodul [kN/m^2]

ε = töjning [%]

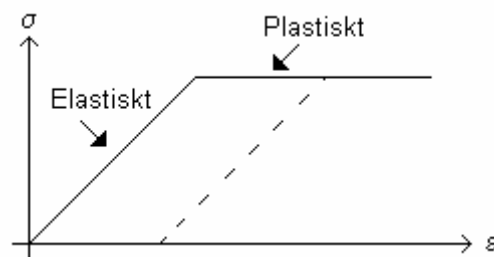
σ = spänning [kN/m^2]

Att jordlagerföljder anses vara elastiska är antaganden som används inom många områden i geotekniken. En jordlagerföljd är oregelbunden med många små variationer i alla riktningar och kan därför inte vara ett elastiskt material. En jordlagerföljd består av många jordpartiklar med kraftöverföring i kontaktpunkterna. Det medför att

jordpartiklarna kan förflytta sig i förhållande till varandra utan att jordpartikeln i sig förändras. Även om jordlagerföljder inte är elastiska är ofta jordpartiklarna i sig elastiska material. Antagandet att jordlager är elastiska görs eftersom många beräkningar annars mer eller mindre skulle vara omöjliga att utföra, samtidigt som antagandet ger godtagbara resultat.⁹

3.2 Mohr Coulomb

Mohr Coulomb är en elastisk-plastisk materialmodell som innebär att ett jordmaterial är elastiskt fram till en viss pålastning då jordmaterialet får plastiska egenskaper, se Figur 3.2. Skillnaden mellan en elastisk deformation och en plastisk deformation är att den plastiska deformationen inte återgår till utgångsläget vid avlastning¹⁰. Den streckade linjen i figuren visar hur den slutgiltiga deformationen blir om avlastningen skett efter det att materialet fått plastiska materialegenskaper.



Figur 3.2 Deformationssamband för ett elastiskt-plastiskt material

Deformationen för ett elastisk-plastiskt material delas vanligen upp i två delar, en plastisk del och en elastisk del. Det ger att spänningen beräknas genom en utveckling av Hooke's lag, se ekvation 3.2¹¹.

$$\sigma = E \cdot (\varepsilon^e + \varepsilon^p) \quad (3.2)$$

Där, σ = spänning [kN/m²]

E = elasticitetsmodul [kN/m²]

ε^e = de elastiska deformationerna [%]

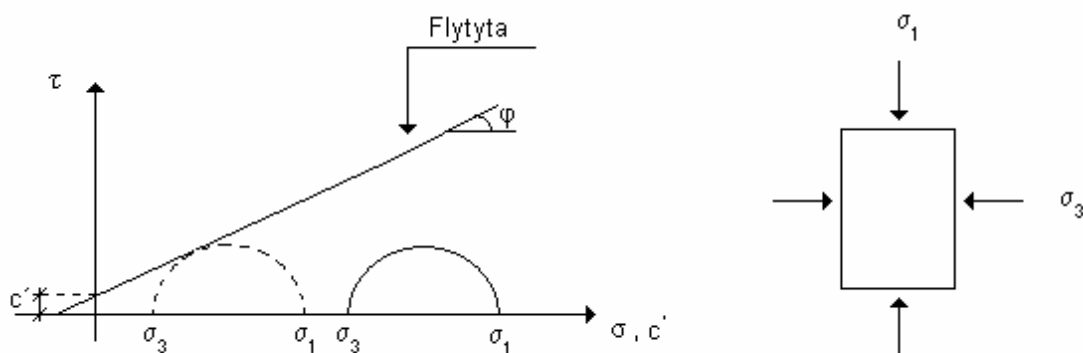
ε^p = de plastiska deformationerna [%]

⁹ Marshak Stephen, Earth a portrait of a planet

¹⁰ Larsson Rolf, Deformationsegenskaper i jord

¹¹ Brinkgreve R.B.J, Plaxis Finite element code for soil and rock analyses

Mohr Coulomb beskriver materialegenskapen av elasticitetsmodulen, såsom för den linjärelastiska materialmodellen. Ytterligare beskriver Mohr Coulomb materialegenskaperna genom friktionsvinkel $[\varphi]$, cohesion $[c]$ och dilatansvinkeln $[\psi]$. De senare materialegenskaperna förhåller sig till varandra enligt Figur 3.3, där den streckade halvcirkeln påvisar effektivspänningen och den heldragna halvcirkeln är totalspänningen. Flytytan är den maximala hållfastheten som kan mobiliseras vid olika spänningar.



Figur 3.3 Mohr Coulomb materialmodell

Materialmodellen Mohr Coulomb är en av de mest använda materialmodellerna, trots att det är en kraftig förenkling av verkligheten ger den relativt bra resultat. Mohr Coulomb materialmodell använder sig av ekvation 3.3 för att beräkna skjuvhållfastheten¹².

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (3.3)$$

Där, τ_f = skjuvhållfasthet $[\text{kN/m}^2]$

φ' = friktionsvinkel $[\text{°}]$

σ' = spänning $[\text{kN/m}^2]$

c' = cohesion $[\text{kN/m}^2]$

3.3 Olika typer av moduler

Inom geotekniken används flera olika moduler vid olika typer av förhållanden och beräkningar. Nedan följer korta definitioner över kontraktionstalet och de tre mest använda modulerna elasticitetsmodulen, kompressionsmodulen eller odometermodulen och skjuvmodulen.

¹² Sällfors Göran, Geoteknik jordamteriallära - jordmekanik

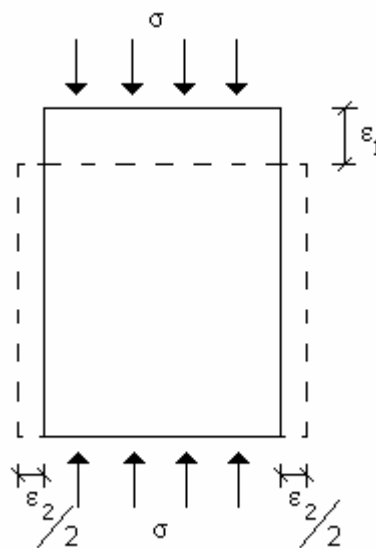
Elasticitetsmodulen avser elastiska material, det vill säga att töjningarna återgår till utgångsläget vid avlastning. Trots det används elasticitetsmodulen inom geotekniken oberoende av att jordmaterial överlag är icke-elastiska. De används främst eftersom de elasticitetsteoretiska beräkningsmodellerna är väl utvecklade. Därför har jordmaterial beskrivits i elastiska termer och dess beräkningsmodeller utvecklats för att främst klara av små deformationer. Antaganden görs även att elasticitetsmodulen är lika i alla riktningar. Elasticitetsmodulen beskrivs genom Hooke's lag där modulen är förhållandet mellan spänningen och deformationen, se ekvation 3.4. Elasticitetsmodulen för jordmaterialen kan antingen fås genom triaxialförsök när vertikalspänningen ökar samtidigt som horisontalspänningen hålls konstant, se Figur 3.4, eller beräknas fram från kompressionsmodulen.¹³

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

där, E = elasticitetsmodulen [kN/m²]

σ = spänning [kN/m²]

ε = töjning [%]



Figur 3.4 Schematisk bild över elasticitetsmodulen

Kompressionsmodul eller ödometermodul är den vanligaste modulen vid beräkning av jordmaterialens sättningar, eftersom den innebär att deformationer endast kan ske i vertikalled och inte i horisontalled, se Figur 3.5. Eftersom kompressionsmodulen är vanlig inom geotekniken är den väl dokumenterad. Kompressionsmodulen fås antingen av ett stegvis ödometerförsök eller av ett CRS försök, där det senare i dag

¹³ Larsson Rolf, Deformationsegenskaper i jord

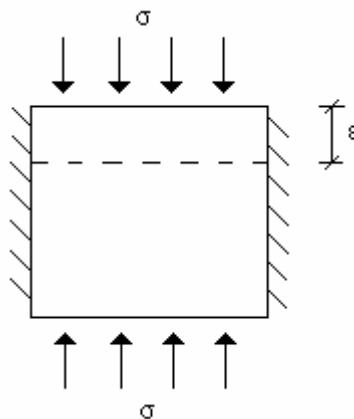
kan kallas ett standardförsök. Relationen mellan elasticitetsmodulen och kompressionsmodulen beskrivs i ekvation 3.5.¹³

$$M = \frac{E \cdot (1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \quad (3.5)$$

där, M = kompressionsmodulen [kN/m²]

E = elasticitetsmodulen [kN/m²]

ν = kontraktionstalet



Figur 3.5 Schematisk bild över kompressionsmodulen

Skjuvmodulen avser modulen när en provkropp genomgår en vinkelförändring men dess volym är konstant, se Figur 3.6. Skjuvmodulen är förhållandet mellan skjuvspänningen och vinkelförändringen, se ekvation 3.6, vilket medför att desto större deformation en provkropp får desto mindre blir skjuvmodulen.¹⁴

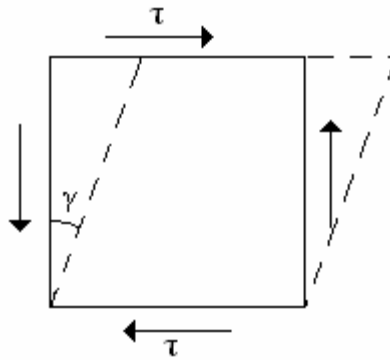
$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3.6)$$

där, G = skjuvmodulen [kN/m²]

τ = skjuvspänningen [kN/m²]

γ = vinkelförändringen [rad]

¹⁴ Larsson Rolf, Deformationsegenskaper i jord



Figur 3.6 Schematisk bild över skjuvmodulen

Skjuvmodulen för ett jordmaterial tas fram i laboratorium i skjuvapparater där volymen bibehålls konstant. För väldigt små deformationer klarar dagens laborationsundersökningar inte av att ta fram skjuvmodulen, då måste speciell mätutrustning användas i fält.¹⁴

Förhållandet mellan elasticitetsmodulen och skjuvmodulen beskrivs enligt ekvation 3.7.

$$E = 2 \cdot G \cdot (1 + \nu) \quad (3.7)$$

Där, E = elasticitetsmodulen [kN/m^2]

G = skjuvmodulen [kN/m^2]

ν = kontraktionstalet

Kontraktionstalet är förhållandet mellan de vertikala och horisontella deformationerna. Kontraktionstalet antas, precis som elasticitetsmodulen, vara lika i alla riktningarna och används vid förvandlingar mellan de olika modulerna.¹⁵

¹⁵ Larsson Rolf, Deformationsegenskaper i jord

4 Beräkningsförutsättningar

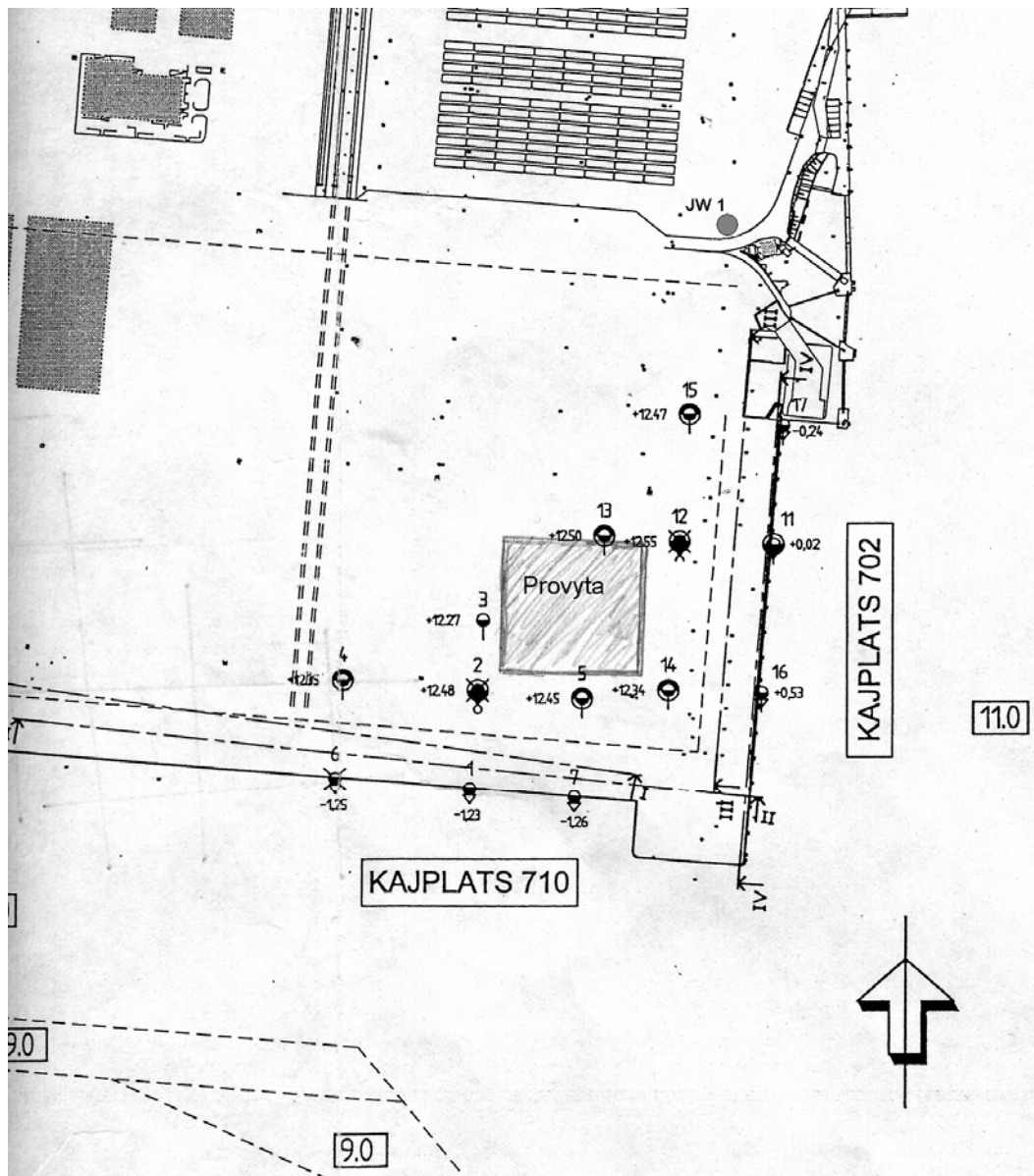
De tre olika beräkningsprogrammen, Plaxis, FEM-design bottenplatta/Raft samt BE-slab, använder till stor del skilda parametrar för att beskriva jordlagerföljden. Nedan följer en övergripande beskrivning av området, jordlagren och ingående parametrar. I kapitel 5 Simulering beskrivs mer detaljerat vilka jordmaterialparametrar de olika beräkningsprogrammen använder sig av.

4.1 Områdesbeskrivning

Älvsborgshamnen är den yttersta hamnen vid inloppet från Skagerack till Göta Älv. Älvsborgshamnen skapades såsom övriga områden i Göteborgs hamn genom dumpning av överskottsmassor under sextiotalet och har därefter byggts ut ytterligare.¹⁶ I dag består Älvsborgshamnen av två kajplatser och en stor uppställningsplats för containrar.

Under det senaste decenniet har geotekniska undersökningar genomförts i Älvsborgshamnen i flera omgångar. Det är främst resultat från de två senaste undersökningsomgångarna som är lokaliserade i närheten av provområdet, som används i denna rapport, se Figur 4.1. För att få centriska laster vid simuleringarna har provytans areal anpassats efter de containrar som belastar provområdet och uppgår till ungefär elvahundra kvadratmeter.

¹⁶ Bergfeldt Allan, Göteborgs geotekniska historia



Figur 4.1 Översiktlig ritning med geotekniska undersökningar¹⁷

¹⁷ Ramböll Sverige AB

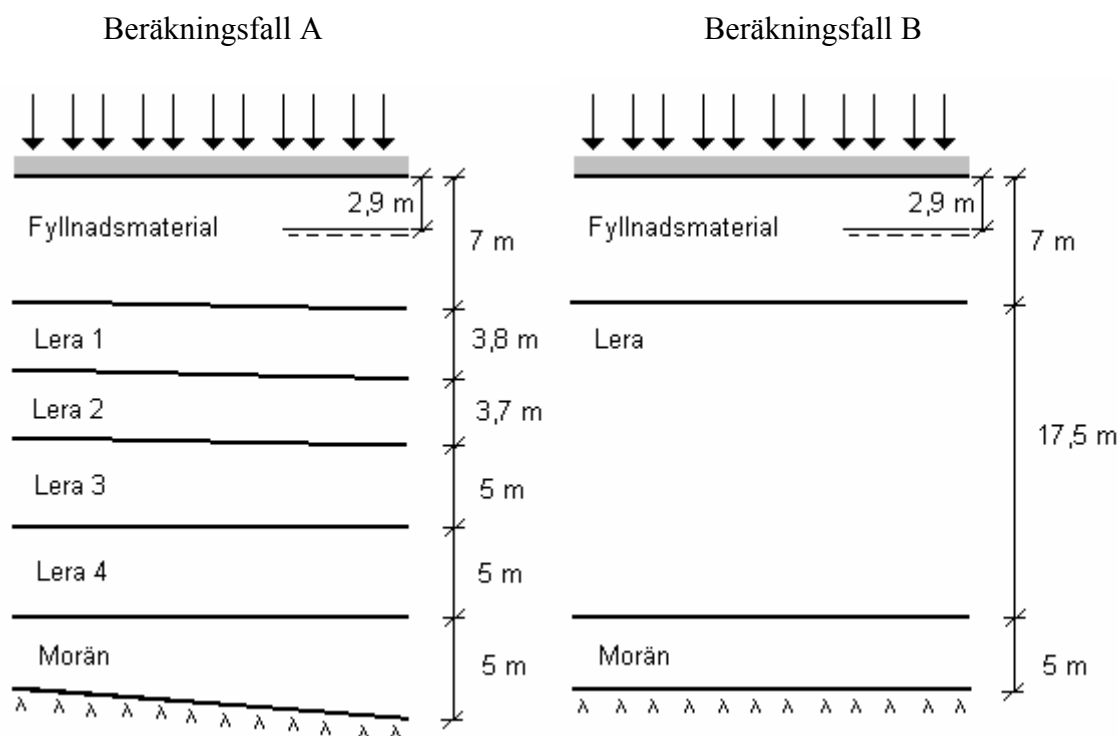
4.2 Geotekniska förhållanden

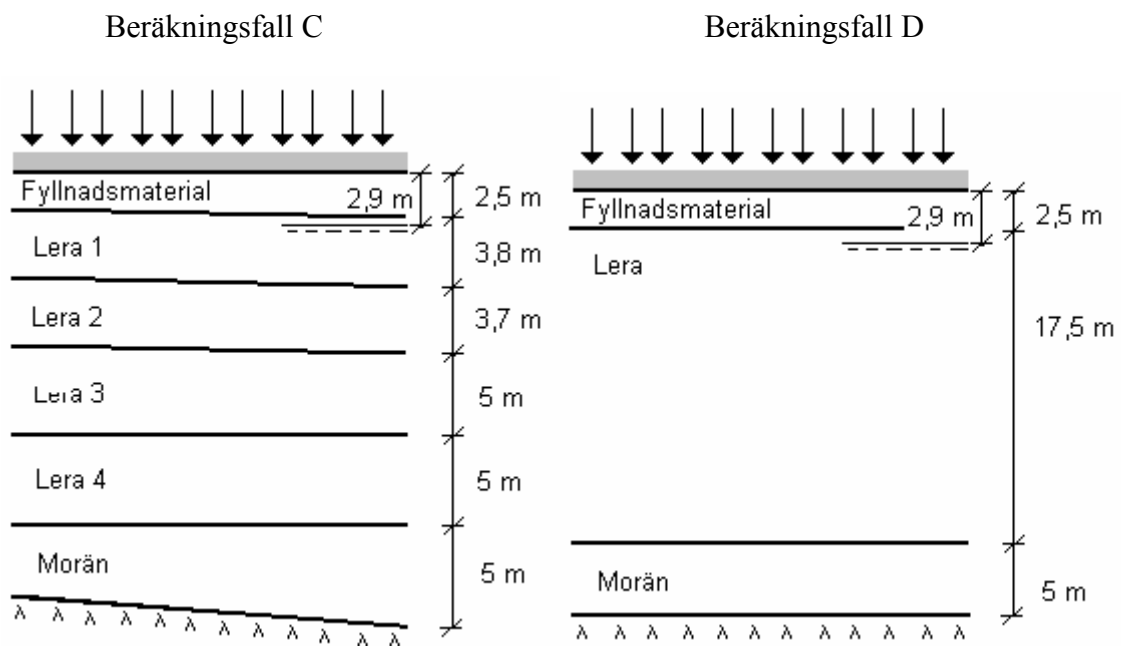
Det aktuella området har en jordlagerföljd av ungefär fem meter fyllnadsmaterial underlagrad av en lös lera med varierande mäktighet. Under leran återfinns ett lager morän och slutligen en något sluttande bergyta. Områdets markyta är plan då den sedan tidigare jämnats ut, för att fungera som en uppställningsplats för containrar.

Utvärdering av CRS försöken och konförsöken visar att leran är indelad i fyra skikt med ökande kompressionsmodul och skjuvhållfasthet mot djupet. Fyllningen och moränen antas vara homogena och indelas därför inte i några inre skikt.

4.3 Beräkningsfall

Beräkningarna kommer att göras för fyra olika grundfall, se Figur 4.2. I analyskapitlet görs en jämförelse mellan de olika grundfallen. Fall A är det mest verklighetsanpassade fallet och dess jordlagerföljd efterliknar den som fältundersökningarna påvisar. I fall C har förutsättningarna förändrats så att fyllningens mäktighet har minskats till två och en halv meter, resterade jordlager efterliknar den verkliga jordlagerföljden. Fall B är en förenkling av verkligheten där jordlagren är vertikala och leran antas vara homogen. Fall D är även den en förenkling av verkligheten med vertikala jordlager och homogen lera, dessutom har fyllnadsmaterialets mäktighet minskats till två och en halv meter såsom i fall C.





Figur 4.2 Skisser över de olika beräkningsfallen

4.4 Vald jordmodell

Närmsta provgrop till provområdet är JW1 som påvisar ett oordnat fyllningsmaterial med bland annat sten, men även block förekommer. Provgropen tyder på att fyllnadsmaterialet består av ett något grovkornigt moränmaterial med större stenar. Fyllnadsmaterialet antas ha en friktionsvinkel $[\phi]$ på 38° , materialets tyngd $[\gamma]$ till 18 kN/m^3 och elasticitetsmodulen $[E]$ förutsätts vara 30 MPa , såsom för en morän med relativt hög fasthet.¹⁸ Från elasticitetsmodulen beräknas kompressionsmodulen $[M]$ enligt kap. 3.3. Med ett tvärkontraktionstal $[\nu]$ på $0,3$ fås en kompressionsmodul på ungefär 40 MPa .

CRS försök har gjorts i tre borrhål, 2, 11 och 12. Framförallt information från borrhål 2 och 12 användas då de är lokaliserade strax utanför provområdet, se Figur 4.1. Borrhål 11 är lokaliserat i älvkanten och anses därför inte representera provområdet lika väl. De utvärderade parametrarna är densitet $[\rho]$, vattenkvot, σ'_c , M_L , σ'_L , M' , c_v och konduktivitet $[k]$, se bilaga 1. Vid analys av lerans kompressionsmodul $[M_L]$ anses nivå 9 meter för borrhål 12 vara något stört och nivån sätt i parantes, samtidigt vägs ej borrhål 11 in lika mycket som borrhål 2 och 12. Leran för de avancerade fallen A och C delas utefter kompressionsmodulen in i fyra skikt, se Diagram 4.1 nedan. Skikt 1 har kompressionsmodulen 600 kPa , skikt 2 har kompressionsmodulen 750 kPa , skikt 3 har kompressionsmodulen 1100 kPa och skikt 4 har kompressionsmodulen 1300 kPa . För fall B och D där leran beräknas som ett lager där ett medelvärde för kompressionsmodulen på 850 kPa antas.

¹⁸ Bergdahl Ulf, Ottoson Elvin m.fl., Plattgrundläggning

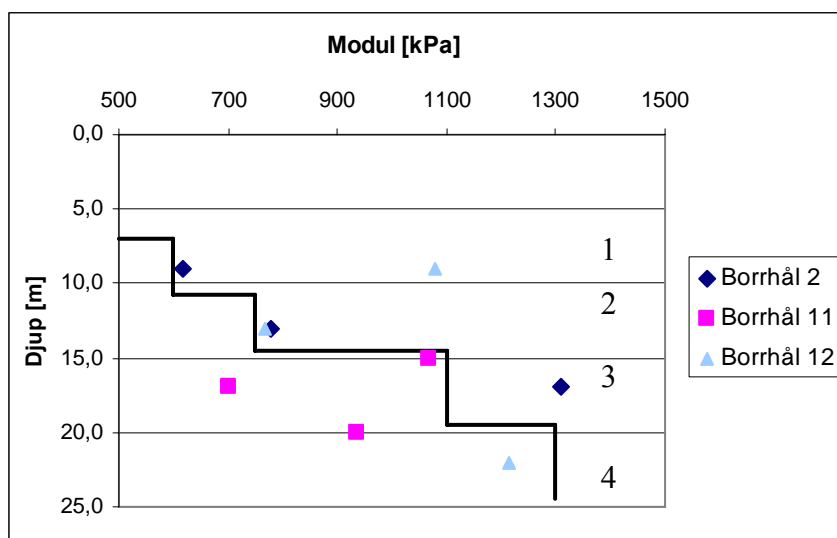


Diagram 4.1 Lerans modul från CRS-försök

Lerans odränerade skjuvhållfasthet från konförsök korrigeras enligt kapitel 2.2.3 parameterbestämning. Den korrigerade skjuvhållfastheten ökar med djupet i två olika lager, se Diagram 4.2. I det övre lagret ökar skjuvhållfastheten med, $\tau_{fu} = 19 + 0,6z$ kPa, där z är djupet från skiktets övre gräns och i det undre lagret ökar skjuvhållfastheten med, $\tau_{fu} = 23,2 + 1,6z'$ kPa, där z' är djupet från det andra skiktets övre gräns. Den odränerade skjuvhållfastheten beräknas som 0,1 av den dränerade skjuvhållfastheten.

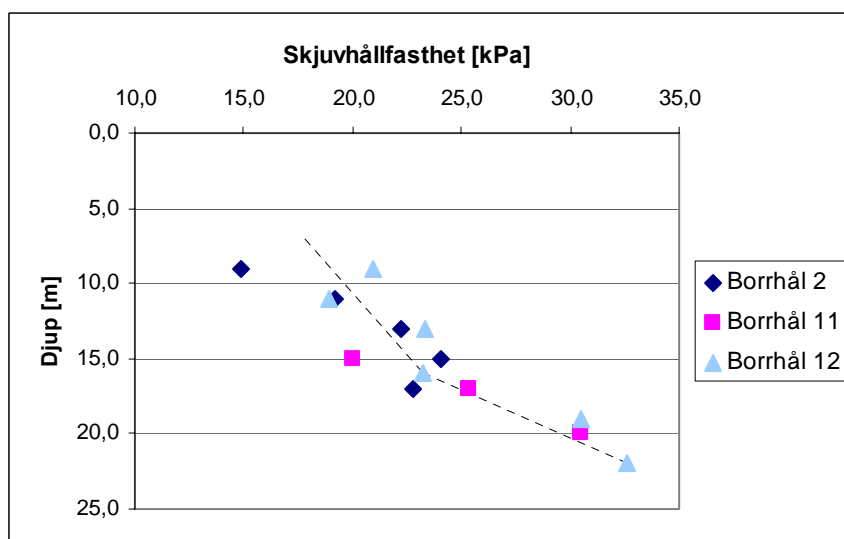


Diagram 4.2 Lerans korrigerade skjuvhållfasthet

Variationen i lerans densitet är liten, dock antas den i de två övre skikten vara konstant med ett värde på $1,6 \text{ ton/m}^3$ och för de två undre skikten vara $1,7 \text{ ton/m}^3$. Det ger att lerans tunghet $[\gamma]$ blir 16 kN/m^3 i de övre lerskikten och 17 kN/m^3 i de två undre lerskikten. För de enklare fallen B och D antas lerans tunghet till $16,5 \text{ kN/m}^3$ för hela skiktet.

Lerans friktionsvinkel $[\phi]$ antas till 30° för alla fyra grundfallen. Sensitiviteten är varierande med djupet. Resultat från fält och laboratorieundersökningar tyder på att det inte existerar någon kvicklera.

För moränen längst ner i jordlagerföljden antas friktionsvinkeln $[\phi]$ vara 38° med en tyngd $[\gamma]$ på 20 kN/m^3 . Elasticitetsmodulen $[E]$ antas för moränen vara 40 MPa , det ger med ett tvärkontraktionstal $[\nu]$ på $0,3$ en kompressionsmodul $[M]$ på ungefär 54 MPa , se ekvation 4.1 ovan¹⁹.

Grundvattenytan antas ha samma nivå som älven och vid beräkningarna används nivån för lågvatten på $+9,6$ meter, vilket innebär $2,9$ meter under markytan, se Figur 4.2.²⁰

I bilaga 2 redovisas de ingående materialparametrar och skitindelningen för de fyra olika beräkningsfallen.

4.5 Materialdata betongplattan

Vid Älvsborgshamnen utgör området som ska täckas av en betongplatta ungefär $10\,000$ kvadratmeter. Dimensioneringarna görs för en del av betongplattan, för att undvika matematiska problem vid simuleringarna, främst i FEM-design bottenplatta/Raft, görs simuleringarna på ett kvadratisk område. På en bredd av 34 meter får exakt åtta containrar med mellanrum plats. Provp Plattans dimensioner antas därför till ett kvadratisk område med linjelasterna centrerade över betongplattan. Provytan uppgår till 1100 kvadratmeter vilket ungefär är en tiondel av den yta som används som uppställningsplats för containrar i Älvsborgs Hamn. Betongplattan antas ha en tjocklek på $0,2$ meter och betongen är av kvaliteten K40, som enligt dagens standard kan översättas till ungefär C40/45. Vid beräkningarna antas betongplattan oarmerad.

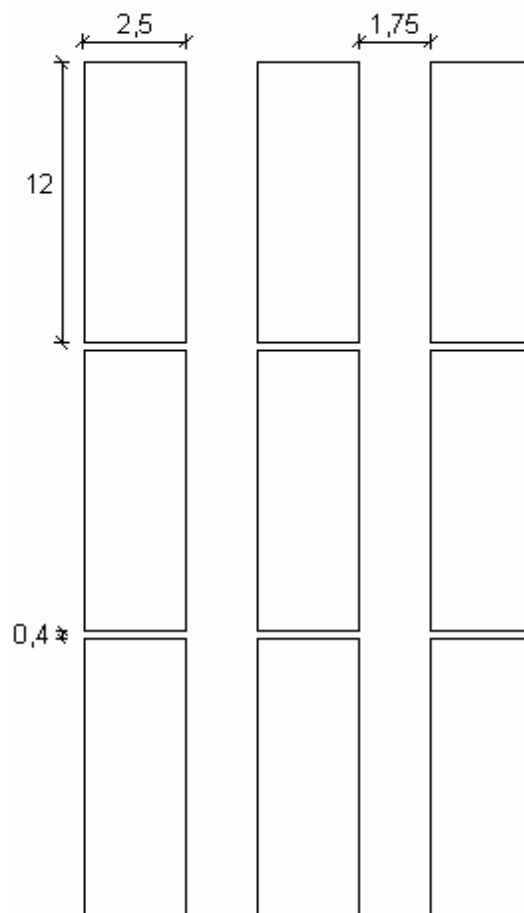
¹⁹ Bergdahl Ulf, Ottoson Elvin m.fl., Plattgrundläggning

²⁰ Sammanfattning av beräkningar geoteknik, 2001-08-16

4.6 Lastfall

Provområdets betongplatta belastas av containrar, grensletruckar och andra mindre arbetsfordon. De tre grupperna klassas som mobila laster då de ej är konstanta under en längre period. Av de tre är det containrarna och grensletruckarna som ger de största lasterna.

Området belastas av 40 fots containrar som är 12 meter x 2,5 meter stora och det staplas maximalt tre containrar på varandra. Containrarna placeras enligt Figur 4.3, vilket innebär att betongplattan på 34 meter x 34 meter belastas av åtta stycken rader med containrar. Under 2001 utfördes två mätserier nere i Göteborgshamn där sammanlagt ungefär 46 000 containrar vägdes. Om lasterna antas normalfördelade kan det 95 % värdet av lasten bestämmas till 31,2 ton per container. Det 95 % värdet innebär att det endast överskrids i 5 % av fallen. Det 95 % värdet har använts i simuleringarna och bedöms som ett bra antagande.²¹ Lasten från containrarna antas jämt fördelade mellan de fyra tassarna i hörnen. Den maximala kraften från en containers tass uppgår till approximativt 230 kN och innebär tre containrar i höjden.



Figur 4.3 Översiktsbild containerplacering

²¹ Förstärkning av södra kajen, Skandiahammen, Metodik för bestämning av laster..., (2002-09-04)

Vid simuleringarna är det kraft per meter som är av intresse. Centrumavståndet mellan två containrar är 12,4 meter och sträckan belastas av två tassar. Det innebär en last på 37,0 kN/m. För handberäkningen är det lasten per yta som är av intresse. Provytan belastas som sagt av åtta stycken containrar vilket innebär sexton linjelaster. De medför en utbredd last på 17,4 kN/m².

En grensletruck väger ungefär 85 ton och belastar betongplattan centrerat genom truckens åtta hjul.²² Det ger att varje punktlast från grensletrucken uppgår till 104 kN. För simuleringarna har fallet med tre containrar bedömts som mest kritiskt.

²² Sprickor i Baseport plattan, teknikpärm Ramböll Sverige AB

5 Simulering

De tre beräkningsprogrammen som simuleringen har gjorts i har olika utvecklingsbakgrund och tänkta användare. Beräkningsprogrammen skiljer sig både teoretiskt och praktiskt från varandra men simuleringarna har gjorts för så lika jordmodeller som möjligt. Förutom simulering i beräkningsprogrammen har även slutsättningen och momentdiagrammet för de olika fallen bestämts genom handberäkning.

5.1 Handberäkning

För att få en förväntad sättning och ett förväntat moment görs en översiktlig handberäkning.

5.1.1 Sättningsberäkning

Utvärdering av σ'_C och σ'_L från CRS försöken, se bilaga 1, tillsammans med jordmaterialens spänning behövs för att utföra sättningsberäkningen. Vid sättningsberäkningarna används ekvation 5.1 nedan, där den första termen beskriver de momentana sättningarna och den andra termen konsolideringssättningarna. Spänningarna i lerlagren avläses i uppritade spänningsdiagram genom grafisk lösning.

$$\delta = h \left(\frac{\sigma'_C - \sigma'_0}{M_0} + \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma - \sigma'_C}{M_L} \right) \quad (5.1)$$

där, δ = sättning [m]

h = jordlagrets höjd [m]

σ'_c = förkonsolideringstryck [kN/m²]

σ'_0 = effektivspänning [kN/m²]

$\Delta\sigma$ = den vertikala spänningsförändringen [kN/m²]

M_0 = kompressionsmodulen för momentana sättningar [kN/m²]

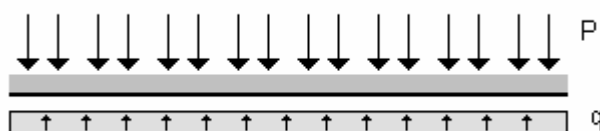
M_L = kompressionsmodulen för konsolideringssättningar [kN/m²]

Sättningen i fyllnadsmaterialet och moränen är i förhållande till sättningen i leran liten och försummas därför. Att sättningen är mindre i friktionsmaterialen beror på att materialen har en hög kompressionsmodul.

För att kunna utföra handberäkningen sammanslås provplattans egentyngd med den utbredda lasten från containrarna till 22,2 kPa. Då provplattan enbart är en del av en större yta ses lastspridningen som obefintlig, eftersom lastspridningen från de olika punkterna tar ut varandra.

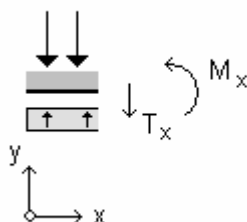
5.1.2 Moment

Betongplattans moment beräknas i mittsnittet för provplattan. Betongplattan belastas med 16 stycken punktlaster [P] på 37,0 kN vardera. Jordlagren motverkar den yttre lasten från containrarna vilken i handberäkningarna ses som en utbredd last. De 16 punktlasterna omvandlas till en utbredd last [q] på 17,4 kN/m, se Figur 5.1.



Figur 5.1 Schematisk bild av betongplattan med yttre och inre laster

Moment- och tvärkraftsdiagram tas fram med hjälp av snittmetoden där beräkningar sker för varje 0,1 meter längs betongplattan. För varje snitt ställs jämviktsekvationer upp, se Figur 5.2, vilket ger ekvationer för att beräkna tvärkraften och momentet utefter hela betongplattan, se ekvation 5.2 och 5.3 nedan²³.



Figur 5.2 Exempel av ett snitt av betongplattan

²³ Samuelsson Alf, Wiberg Nils-Erik, Byggnadsmekanik strukturmekanik

$$T_x = q \cdot x - \sum P \quad (5.2)$$

där, T_x = tvärkraften [kN]

q = jordtrycket [kN/m]

x = snittens horisontella bredd [m]

P = containerpunktlast [kN]

$$M_x = q \cdot \frac{x^2}{2} - \sum P \cdot (x - L) \quad (5.3)$$

där, M_x = snittmomentet [kNm]

q = jordtrycket [kN/m]

x = snittens horisontella bredd [m]

P = containerpunktlast [kN]

L = längden mellan containerpunktlasten och betongplattans vänstra hörn [m]

5.2 FEM-design bottenplatta med tilläggsmodulen Raft

FEM-design bottenplatta/Raft är ett FEM-program i tre dimensioner utvecklat för att dimensionera betongplattor på mark. Programmet är främst utarbetat för konstruktörer och använder sig av en relativt enkel beskrivning av undergrunden. Betongplattan kan däremot beskrivas i detalj. Programmet har dock fördelar mot många andra program på marknaden.

FEM-design bottenplatta/Raft utvecklades i mitten på 1990-talet av dåvarande Skanska teknik. Utvecklingen av programmet har legat nere de senaste åren men en uppgradering har diskuterats.

5.2.1 Beräkningsmetod samt ingående parametrar

FEM-design bottenplatta bygger på en utveckling av en Winklerbäddmodell. Generellt bygger Winklerbäddmodellen på att undergrunden omvandlas till en fjäderbädd. En begränsning i Winklerbäddmodellen är att fjädrarna inte är sammankopplande med varandra. Det som programmet FEM-design bottenplatta/Raft gör är att sammankoppla fjädrarna, det vill säga att om påverkan sker på en fjäder

sprider sig det cirkulärt till övriga fjädrar.²⁴ Programmet använder sig även av en flexibilitetsmatris där många andra liknande beräkningsprogram direkt ställer upp en styvhetsmatris. Fördelen att ställa upp en flexibilitetsmatris är rent matematiska och görs för att minska beräkningstiden.²⁵

Betongplattan beskrivs genom ett FEM rutnät, de noder som anges till betongplattan är samma som i sin tur beskriver jordlagerföljden. Programmet ser på jordmodellen som ett linjärelastiskt system utan brottlaster, där jordskikten enbart beskrivs av en kompressionsmodul som kan variera linjärt med djupet. Eftersom programmet ser jordmodellen som ett linjärelastiskt material tas inte portrycket med i beräkningarna, därför finns ingen möjlighet att lägga in grundvattenytan.²⁴

Jordlagerföljden och dess egenskaper definieras genom att ”borrhål” placeras i anknytning till bottenplattan. ”Borrhålen” beskriver jordlagerföljden i en dimension. Varje nod tilldelas den jordlagerföljd som det närmaste ”borrhålet” har. För att beräkna vertikalspänningen använder sig FEM-design bottenplatta sig av Boussinesq’s uttryck, se ekvation 5.4.²⁴

$$\sigma = P \cdot \frac{3 \cdot z^3}{2\pi \cdot R^5} \quad (5.4)$$

där, P = den pålagda kraften [kN]

z = det vågräta avståndet mellan den pålagda kraften och jordkroppen [m]

R = radien mellan den pålagda kraften och den tänkta jordkroppen [m]

FEM-design bottenplatta itererar fram resultatet genom att upprepa fyra steg till dess att konvergensvillkoret eller tills att enligt användaren bestämt antal iterationer gjorts. Konvergensvillkoret innebär att summan av grundtrycket är den samma som summan av överlasten. Det första steget utförs endast en gång och då för att få ett startvärde att börja iterera från, sedan genomförs steg 2 – 4 tills iterationen är genomförd, se Figur 5.3.²⁶

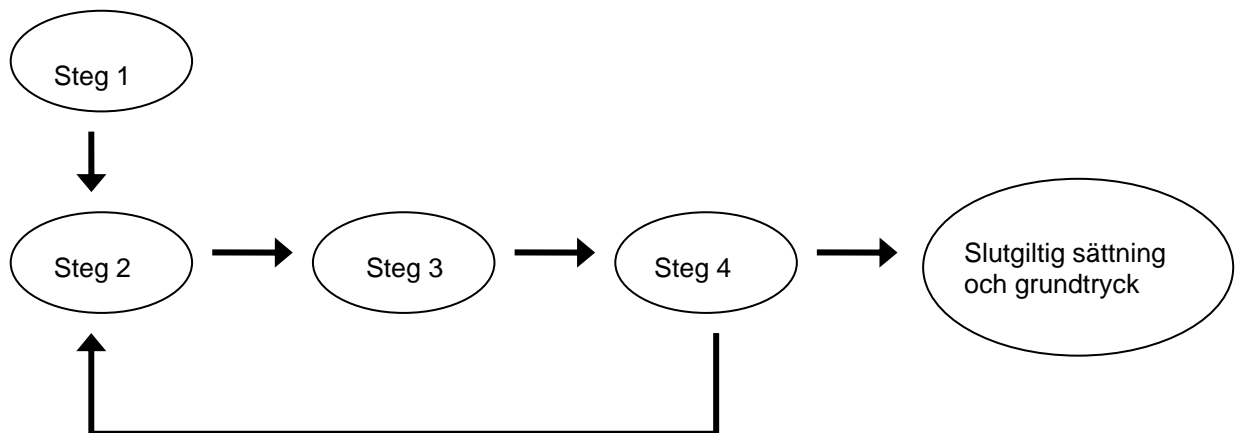
- Steg 1: Programmet beräknar fram antalet fjädrar och konstruerar en flexibilitetsmatris beroende av överlasten. Programmet antar att varje fjäders grundtryck är detsamma som överlasten.
- Steg 2: Baserat på bäddkonstanterna i steg 1 konstrueras en styvhetsmatris för förhållandet platta jord. Beräkningarna ger ett nytt aktuellt grundtryck genom användning av Winklermetoden.
- Steg 3: En ny flexibilitetsmatris ställs upp med de nya aktuella grundtrycken som beräknades fram i steg 2. Resultaten från flexibilitetsmatrisen ger nya värden på sättningarna och bäddkonstanterna.

²⁴ Dimensionering vid grundläggning med hel bottenplatta, Bygg & teknik 2/97

²⁵ Carl Jonsson, Skanska teknik

²⁶ Dimensionering vid grundläggning med hel bottenplatta, Bygg & teknik 2/97

- Steg 4: Utifrån flexibilitetsmatrisen i steg 3 konstrueras en ny styvhetsmatris vilket även den ger nya värden på sättningarna och grundtrycken.



Figur 5.3 Schematisk bild över iterationssteg i FEM-design bottenplatta/Raft

5.2.2 Utförande

Betongplattans yttre dimensioner är 34 meter x 34 meter och har en tjocklek på 0,2 meter. Betongkvaliteten är K40 och övriga parametrar fås från BBK 94 vilken är inlagd som grundvillkor i FEM-design bottenplatta/Raft.

Lasterna från containrarna läggs in som linjelaster utefter containrarnas långsidor. Linjelasterna fördelas procentuellt ut till närliggande noder. För att efterlikna verkligheten, att betongplattan fortsätter utanför provplattans bredd på trettiofyra meter, placeras de två linjelasterna som ligger längst ut mot randen, till höger respektive vänster, med halva det avstånd som skiljer två containrar. I mittskiktet förtätas noderna för att ge ett tydligare momentdiagram, se bilaga 3.

Jordlagerföljden beskrivs genom fem respektive ett ”borrhål” beroende vilket av de fyra fallen, se kap 4.3 eller bilaga 2, som beräknas. Kompressionsmodulen för lerlagren fås genom CRS försök, för fyllningen och moränen beräknas den fram genom en empiriskt framtagen elasticitetsmodul och tvärkontraktionstalet på 0,3, se Tabell 5.1. För bergytan antas ett högt värde på kompressionsmodulen då materialet är mycket fast.

Tabell 5.1 Indatavärden för jordlagren i FEM-design bottenplatta/Raft

	Kompressionsmodul [kN/m ²]	
	Fall A och Fall C	Fall B och Fall D
Fyllning	40 400	40 400
Lera 1	600	850
Lera 2	750	---
Lera 3	1100	---
Lera 4	1300	---
Morän	53 800	53 800
Berg	100 000 000	100 000 000

5.2.3 Programmets fördelar och nackdelar

FEM-design bottenplatta/Raft interpolerar inte mellan borrhålen utan varje nod använder sig av det närmsta borrhålet. Det ger i gränserna en trappstegsmodell mellan borrhålen istället för en mer verklighetsanpassad mjuk modell. I det här fallet då jordlagren har en liten vertikal förändring bör programmets förenkling inte medföra stora effekter på resultaten.

De fyra grundfallen behåller sin geometri i FEM-design bottenplatta/Raft, den stora förenklingen ligger i hur jordmaterialen definieras. Eftersom FEM-design bottenplatta/Raft endast tar hänsyn till kompressionsmodulen, påverkas till exempel inte grundvattenytan och därmed portrycket deformationen.

FEM-design bottenplatta/Raft beskriver betongplattan relativt bra och variationer i tjocklek och egenskaper är enkla att simulera. Dessutom placeras yttre laster med olika storlek och form enkelt in.

5.3 Plaxis

Plaxis är ett FEM-program med inriktning mot dimensionering för geoteknik. Programmet började utvecklas i Holland under slutet av 1980-talet på tekniska universitetet i Delft utanför Haag.²⁷ Plaxis har sedan dess regelbundet utvecklats och nu finns inriktningar mot flera geotekniska användningsområden. Vid simuleringarna har Plaxis, i två dimensioner, version 8 från hösten 2004 används. Programmet ger möjligheten att noggrant beskriva jordlagerföljden och dess parametrar. Dessutom tas hänsyn till interaktionen mellan jord och platta.

5.3.1 Beräkningsmetod samt ingående parametrar

Plaxis är ett tvådimensionellt program som bygger sin modell mot djupet genom jordlagerföljden. Då det är ett geotekniskt program ligger tyngdpunkten av beräkningsmöjligheter på jordmaterialens egenskaper. Jordlagerföljden kan delas in i oändligt många skikt som var och en kan ha olika egenskaper. Materialmodellen för jordlagren kan variera från en enklare linjärelastisk materialmodell till mer avancerade modeller som hardening-soil och cam-clay. Plaxis version 8 innehåller sex stycken olika materialmodeller.²⁷ Jordlagrens parameteregenskaper definieras av olika antal jordmaterialparametrar beroende på vald jordmodell. Jordlager och yttre laster kan ett i taget aktiveras eller avaktiveras för varje beräkningssteg och på så sätt efterlikna verkligheten för till exempel en simulering av bortschaktning eller vid utfyllnad.

Plaxis är ett FEM-program och jordlagerföljden beskrivs genom ett rutnät med triangulära element. Varje triangel delas vid beräkning in i ytterligare sex eller femton noder. Rutnätets täthet kan varieras och läggas tätare vid till exempel geokonstruktioner.

Betongplattan placeras mellan två ändpunkter och dess egenskaper definieras manuellt då inget bibliotek med betongegenskaper finns. Vid varje yttre last placeras en beräkningsnod vilket medför vid beräkning att lasten enbart verkar i den givna punkten. Vid simuleringarna anges beräkningsområdets randvillkor som horisontellt fast i ytterkanterna, det vill säga att betongplattan och den underliggande jordlagerföljden inte kan förflyttas i horisontalled. Det medför att lastspridningen från punktlasterna samverkar så att lasten blir konstant mot djupet.

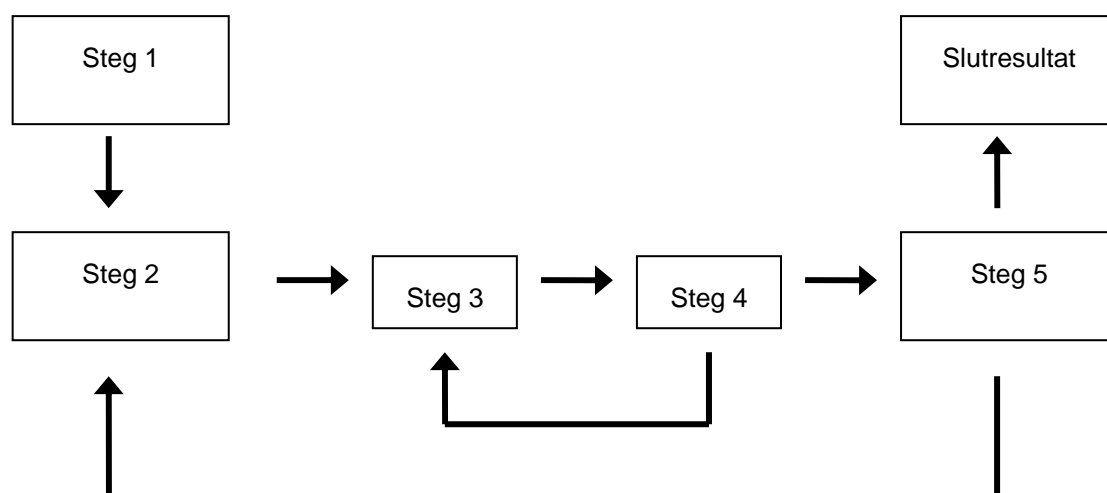
Grundvattenytan kan precis som jordlagren definieras genom många punkter och därmed simulera en varierande grundvattenyta. Porvattentrycket kan antingen definieras som hydrostatiskt eller genom andra mätvärden.

Plaxis itererar fram resultatet från simuleringarna genom att utföra en mängd beräkningssteg. Övergripande kan beräkningsiterationen beskrivas genom fem olika

²⁷ Brinkgreve R.B.J, Plaxis Finite element code for soil and rock analyses

beräkningssteg. Steg 1 är startvärdet för iterationen, steg 2-5 genomförs till dess att beräkningen är genomförd, se Figur 5.4.²⁸

- Steg 1: Programmet delar in alla element i ytterligare sex noder och ställer upp en styvhetsmatris för beräkningsfallet.
- Steg 2: Stegvis ökning av de yttre krafterna.
- Steg 3-4: Iteration tills dess att de inre krafterna för varje element är i jämvikt.
- Steg 5: Uppdaterar deformationerna och återgår till steg 2 tills dess att alla laststeg utförts och systemet är i jämvikt.



Figur 5.4 Schematisk bild över iterationssteg i Plaxis

5.3.2 Utförande

Den övergripande principen går ut på att användaren genomför tre steg, ”input”, ”calculation” samt ”output”. I inputenheten definieras jordmodellen, geometrin, geokonstruktioner samt yttre laster. Grundmodellerna i Plaxis har bredden 34 meter med den överliggande betongplattan slutar 1 decimeter från randen. Det görs för att ta bort det stödmoment som uppstår om betongplattan skulle dras ut till randen. Betongplattan definieras som K40 med en tjocklek på 0,2 meter.

Beräkningarna har utförts för materialmodellerna linjärelastiskt och Mohr Coulomb. Känslighetsanalyserna har gjorts för materialmodellen Mohr Coulomb. Varje materialmodell innehåller flera olika materialparametrar vilka redovisas i bilaga 4. Eftersom materialmodellerna linjärelastisk och Mohr Coulomb inte tar hänsyn till en ökande skjuvhållfasthet mot djupet har skjuvhållfastheten beräknats för mittpunkten för varje skikt.

²⁸ Brinkgreve R.B.J, Plaxis Finite element code for soil and rock analyses

För de fyra grundfallen har grundvattenytan antagits till lågvatten och därmed plushöjden 9,6 meter, det innebär 2,9 meter under markytan²⁹, se bilaga 2. Dessutom har hydrostatiskt portryck antagits genom hela modellen. Att grundvattenytan antagits konstant innebär för fall A och B att grundvattenytan ligger i det över skiktet av fyllningen medan den för fall C och D ligger i överkant av leran.

Lasterna från containrarna definieras som punktlaster med kraft per meter. De placeras i horisontal led med samma mellanrum som linjelasterna i FEM-design bottenplatta och BE-slab. Varje punktlast uppgår till 37,0 kN/m och totalt placeras 16 punktlaster in, se bilaga 5.

För samtliga fyra fall och materialmodeller har beräkningarna delats in i följande steg.

1. Plastisk beräkning för leran under vattenytan, det vill säga att fyllnadsmateriallagret avaktiveras och leran belastas enbart av vatten.
2. Plastisk beräkning där fyllningen aktiveras
3. Konsolideringsberäkning, här utjämnas portrycket i leran.
4. Plastisk beräkning där betongplattan aktiveras. Här nollställs även sättningarna för att få fram sättningarna på grund av den yttre lasten.
5. Plastisk beräkning där punktlasterna från containrarna aktiveras.
6. Plastisk beräkning är punktlasterna multipliceras med 37,0 kN/m
7. Konsolideringsberäkning, åter en utjämning av portrycket i leran.

5.3.3 Programmets fördelar och nackdelar

Plaxis beskriver jordlagerföljden mycket detaljerat men är svagare på att beskriva betongplattan. I de här beräkningsfallen där en enkel betongplatta används är betydelsen liten, skulle däremot en betongplatta med olika tjocklek beräknas uppstår problem.

²⁹ Sammanfattning av beräkningar geoteknik, 2001-08-16

5.4 BE-slab

BE-slab utvecklades på universitetet av Dortmund under 1980-talet och är ett boundary elements, eller på svenska även kallat randelementmetoden, program i två dimensioner i plan, som främst används för att dimensionera betongplattor på mark. Programmet är som FEM-design bottenplatta främst utarbetat för konstruktörer. BE-slab använder sig av avancerade beskrivningar för betongplattan medan jordlagerföljden beskrivs enligt en något förlegad modell.

5.4.1 Beräkningsmetod samt ingående parametrar

I BE-slab sker beräkningarna utefter den diskretisering där betongplattans ytterkanter delas in i randelement. Eftersom noder endast placeras utefter elementets ytterkanter minskar antalet ekvationer i jämförelse med ett FEM-program.³⁰

Grundprincipen till ett boundary element program är att deformationen och krafterna på en kropps yta tillsammans med de yttre lasterna bestämmer deformationen och spänningarna inne i kroppen.³¹

BE-slab använder sig av en traditionell Winklerbäddmodell vid beräkning. Winklerbäddmodellen bygger på att undergrunden beskrivs genom en fjäderbädd, där fjädrarna inte är sammankopplade med varandra. Jordmodellen beskrivs med hjälp av bäddmodulen för hela jordmodellen. Bäddmodulen är ingen materialparameter utan är till stor del beroende på hur fältförsöken genomförts, hur belastningsfundamenten ser ut samt belastningens storlek. Bäddmodulen beskriver den deformation som sker i jordlagren vid en viss pålagd last, se ekvation 5.5 nedan.

$$B = \frac{\Delta\sigma}{\delta} \quad (5.5)$$

där B = Bäddmodulen [kN/m^3]

$\Delta\sigma$ = Den pålagda lasten [kN/m^2]

δ = Sättningen på grund av den pålagda lasten [m]

Betongplattan beskrivs genom de randelement som beräkningarna utgår från. Förutom dem placeras punkter där resultat efterfrågas.

³⁰ <http://www.bem.uni-stuttgart.de/home.htm> (2005-12-20)

³¹ Hartmann Friedel, Introduction to boundary elements

5.4.2 Utförande

Betongplattan dimensioneras med en ytare på 34 meter x 34 meter med tjockleken 0,2 meter. Betongkvaliteten är K40.

Lasterna från containrarna definieras som linjelaster utefter containrarnas långsidor. För att efterlikna verkligheten att betongplattans dimensioner är större än den simulerade, placeras linjelasterna lägst ut till höger respektive vänster med halva avståndet mellan två containrar ut till randen.

BE-slab ser undergrunden som ett konstant lager ut under hela betongplattan och beskrivs med hjälp av bäddmodulen. Eftersom programmet ser jordmodellen som ett konstant lager finns inga möjligheter att beskriva eventuella geografiska variationer i jordlagerföljden. Bäddmodulen fås genom att slutsättningarna vid en viss last tas fram genom handberäkningar, se Tabell 5.2. Bäddmodulen för fall A – D beräknas från de sättningar som uppstår i leran på grund av fyllnadsmaterialet. För det bra och dåliga fyllnadsmaterialet beräknas bäddmodulen från sättningarna i fyllnadsmaterialet. Bäddmodulen omvandlas sedan till fjädrar under hela betongplattan, bilaga 6.

Tabell 5.2 Indatavärden för jordlagren i BE-slab

	Bäddmodul [kN/m ³]
Fall A	51,8
Fall B	49,5
Fall C	51,3
Fall D	49,0
Bra fyllnadsmaterial	5 771
Dålig fyllnadsmaterial	3 843

5.4.3 Programmets fördelar och nackdelar

BE-slab beskriver jordens parametrar mycket förenklat. Först och främst använder programmet sig av bäddmodulen, vilken bristfälligt beskriver jorden. Flera antaganden görs för att kunna beräkna sättningen och därifrån bäddmodulen, det medför att små felaktigheter vid sättningsberäkningen kan ge större fel i BE-slab.

BE-slab beskriver jorden som ett lager, vilket kan vara problematiskt om jordlagerföljden är mycket varierande. Problemet blir då att bestämma i vilket snitt bäddmodulen ska beräknas.

BE-slab beskriver betongplattan mycket bra och simuleringar av betongplattor med varierande tjocklek och materialegenskaper är okomplicerat. Även olika typer av yttre laster med olika former kan lätt beskrivas.

6 Resultat

Resultaten från simuleringarna i de tre datorprogrammen, Plaxis, FEM-design bottenplatta/Raft samt BE-Slab, redovisas på olika sätt. Resultat som kan erhållas från samtliga program är den totala sättningen samt det maximala momentet i betongplattan. För att ge en rimlighetsbedömning av grundfallen beräknas även totalsättningen samt moment för hand. Resultaten har sammanställts i detta kapitel och är indelat i två delar, ett med avseende på jordmodellernas inverkan på resultatet samt ett med avseende på datorprogrammets, det vill säga beräkningsmodellens inverkan.

De simuleringar som har gjorts är,

- De fyra grundfallen, se kap. 4.3 beräkningsfall eller bilaga 2.
- Känslighetsanalys för lerans kompressionsmodul som förändrats med $\pm 25\%$.
- Känslighetsanalys för reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul med 33% .
- Handberäkning av totalsättningen och betongplattans moment.

6.1 Jordmodellens inverkan på resultatet

De fyra olika beräkningsfallen är uppbyggda med syfte att belysa hur noggrannheten i jordmodellens geometri och jordmaterialparameter påverkar resultatet. Dessutom ska beräkningsfallen belysa om ett rimligt resultat även fås vid användning av en förenklad jordmodell.

6.1.1 Grundfall

För grundfallen A – D används de materialparametrar som utvärderas under kapitel 4, beräkningsförutsättningar. Materialparametrarna som används för Plaxis redovisas i bilaga 4, de som används för FEM-design bottenplatta redovisas i kapitel 5.2.2, utförande Tabell 5.1 och materialparametrarna för BE-slab redovisas i kapitel 5.4.2, utförande Tabell 5.2.

6.1.1.1 Totalsättning

Totalsättningen för grundfallen redovisas i tre diagram. Resultaten från handberäkningen och Plaxis är indelade i totalsättning, sättningen på grund av den yttre lasten samt sättningen på grund av fyllnadsmaterialet. De framräknade sättningarna från handberäkningen redovisas i Diagram 6.1 och från Plaxis i Diagram 6.2. FEM-design bottenplatta/Raft redovisar enbart totalsättningen på grund av den

yttre lasten, se Diagram 6.3. Handberäkningarna påvisar att konsolideringssättning i leran från den last fyllnadsmaterialet medför fortfarande pågå. BE-slab redovisar ingen totalsättning av betongplattan.

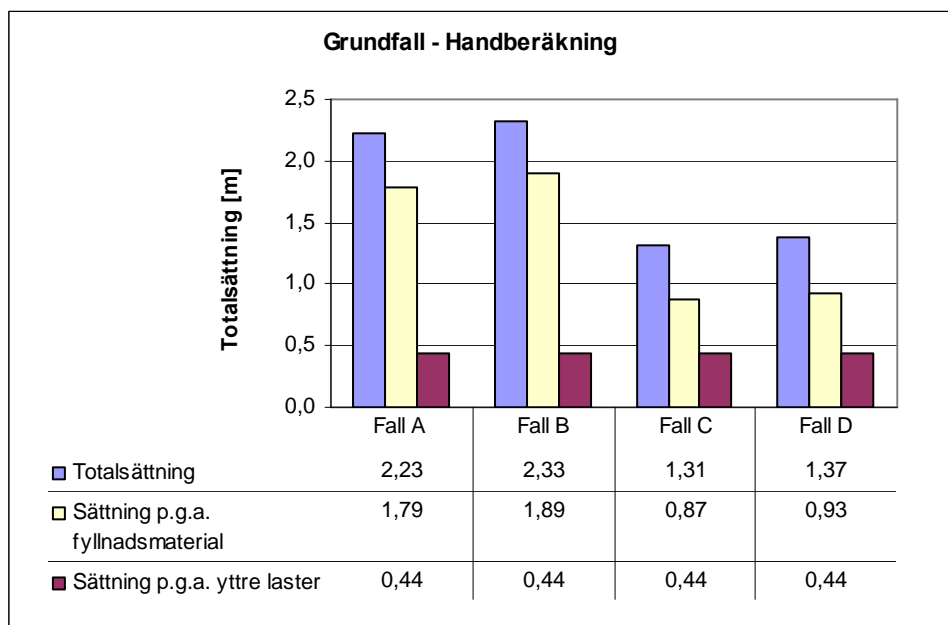


Diagram 6.1 Totalsättning för handberäkningen grundfallen A – D

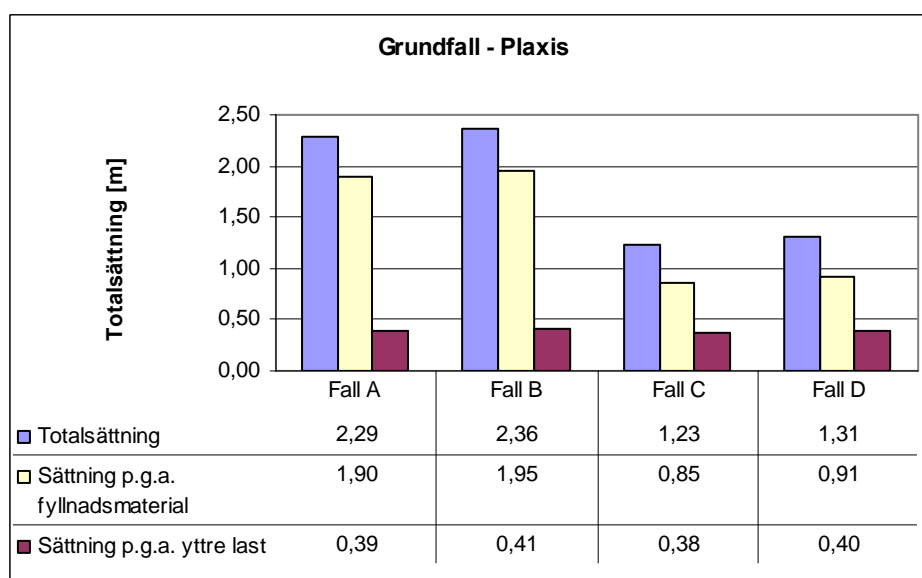


Diagram 6.2 Totalsättning för Plaxis grundfall A – D

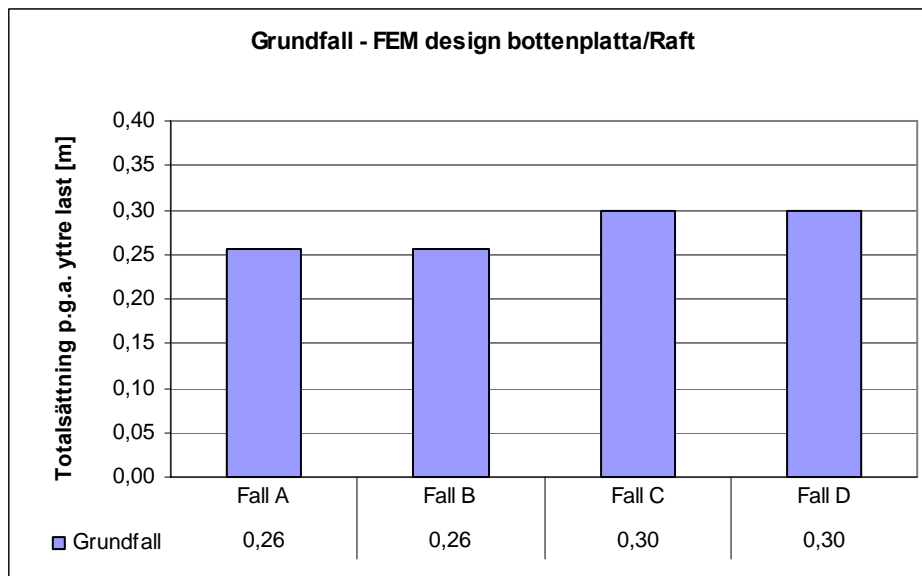


Diagram 6.3 Totalsättning p.g.a. den yttre lasten för FEM-design bottenplatta/Raft för grundfall A – D

6.1.1.2 Moment

Det maximala momentet i betongplattan redovisas även det i diagramform. Enligt handberäkningen är betongplattans maximala moment 6,94 kNm/m. Resultaten från Plaxis redovisas i Diagram 6.4, från FEM-design bottenplatta/Raft redovisas resultaten i Diagram 6.5 samt för BE-slab redovisas resultaten i Diagram 6.6 nedan.

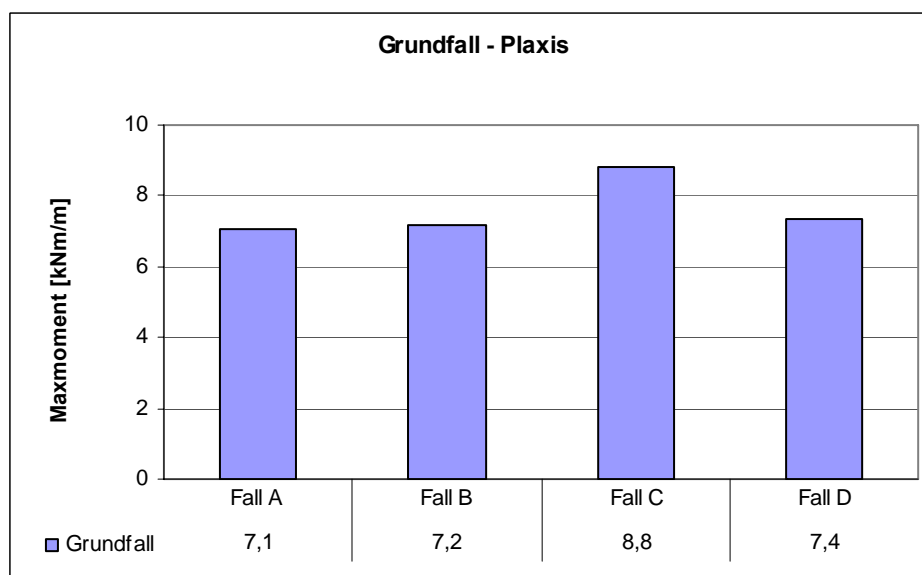


Diagram 6.4 Betongplattans maximala moment för Plaxis grundfall A – D

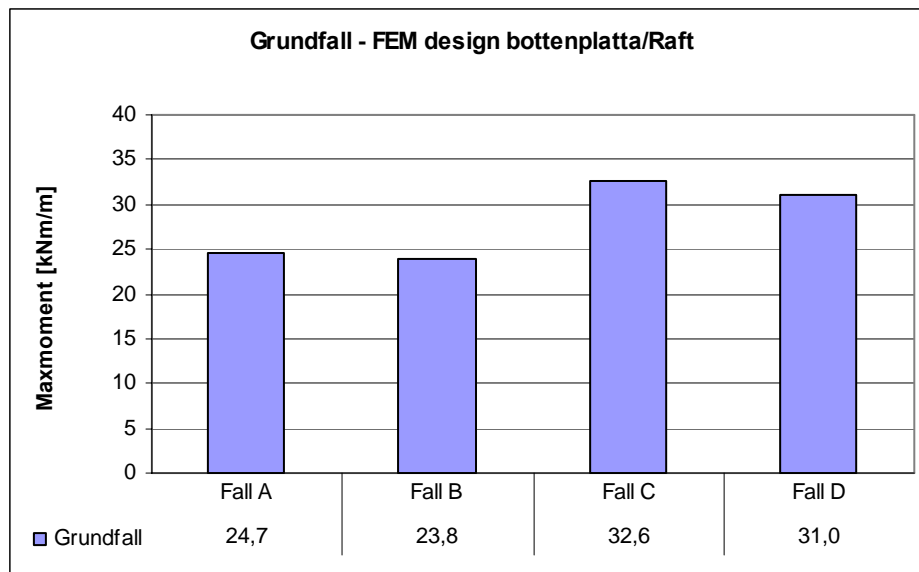


Diagram 6.5 Betongplattans maximala moment för FEM-design bottenplatta/Raft för grundfall A – D

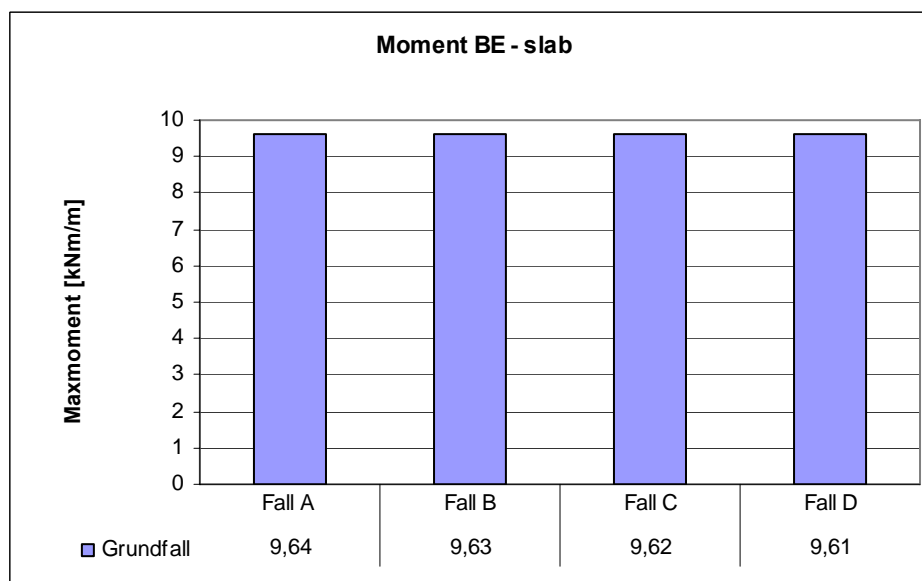


Diagram 6.6 Betongplattans maximala moment för BE-slab för grundfall A – D

6.1.2 Inverkan av lerans kompressionsmodul

För simuleringarna vid känslighetsanalysen för leran används samma materialparametrar som för grundfallen förutom lerlagrens kompressionsmodul som varierar med $\pm 25\%$, se bilaga 7. Enbart totalsättningen på grund av den yttre lasten redovisas nedan.

6.1.2.1 Totalsättning

Totalsättningen på grund av den yttre lasten för Plaxis när lerans kompressionsmodul varierar med 25 % redovisas nedan i Diagram 6.7. Totalsättningen på grund av den yttre lasten för FEM-design bottenplatta/Raft redovisas i Diagram 6.8. BE-slab redovisar igen totalsättning.

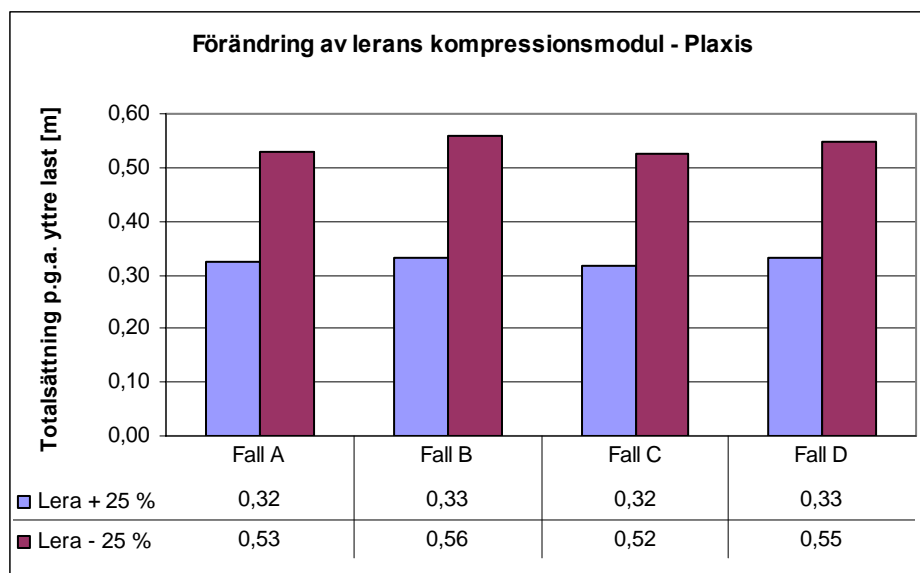


Diagram 6.7 Totalsättning på grund av den yttre lasten för Plaxis då lerans kompressionsmodul förändrats med 25 %

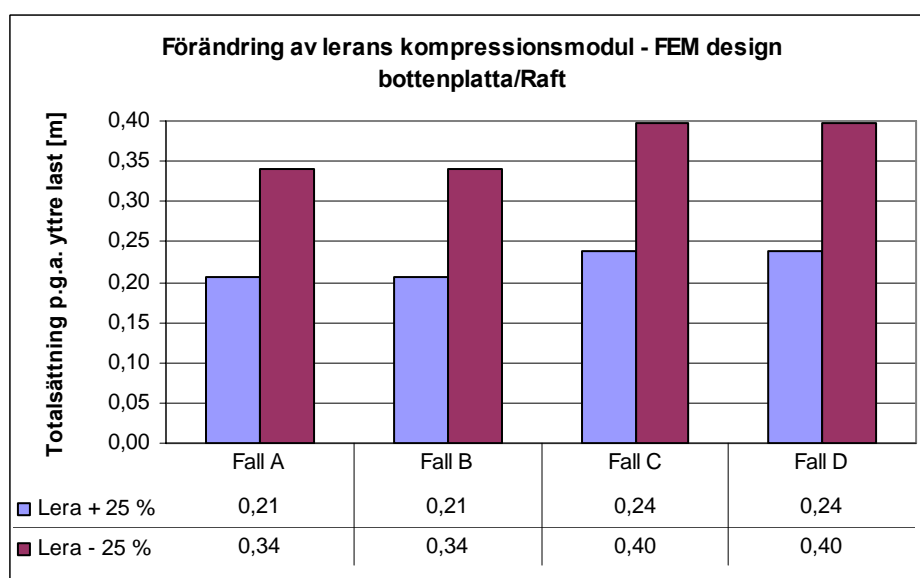


Diagram 6.8 Totalsättning på grund av den yttre lasten för FEM-design bottenplatta/Raft då lerans kompressionsmodul förändrats med 25 %

6.1.2.2 Moment

Resultaten för betongplattans maximala moment från simuleringen när lerans kompressionsmodul förändrats med 25 % för Plaxis redovisas i Diagram 6.9 och för FEM-design bottenplatta/Raft i Diagram 6.10. För BE-slab har ingen simulering gjorts för fallen med variation med lerans kompressionsmodul.

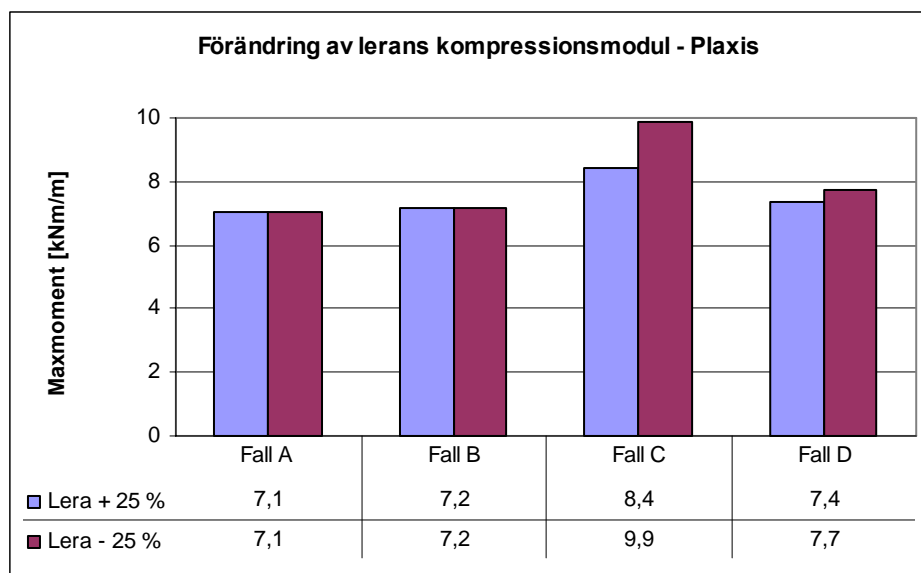


Diagram 6.9 Betongplattans maximala för Plaxis då lerans kompressionsmodul förändrats med 25 %

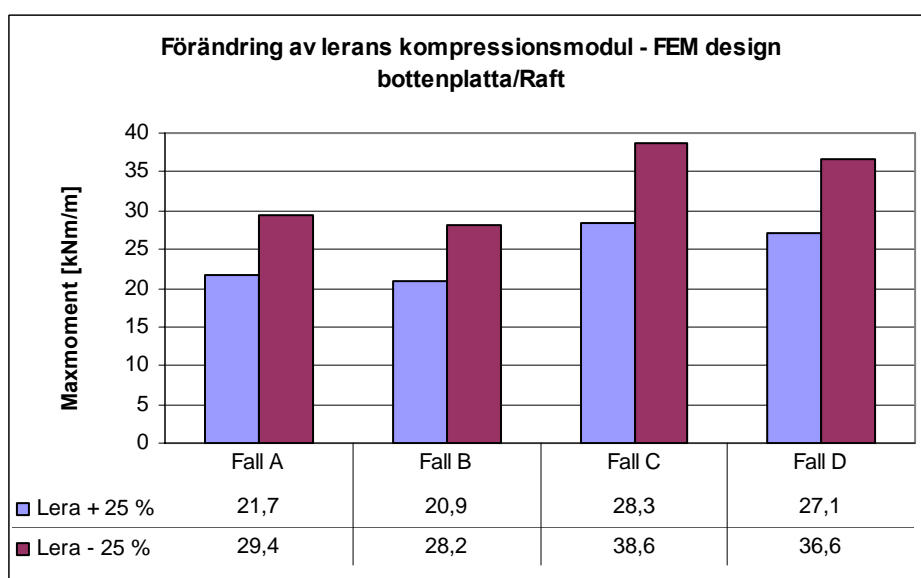


Diagram 6.10 Betongplattans maximala för FEM-design bottenplatta/Raft då lerans kompressionsmodul förändrats med 25 %

6.1.3 Inverkan av fyllningen

Materialparametrar för fyllnadsmaterial kan vara svåra att bestämma och ofta används empiriska värden. Simulering för de fyra beräkningsfallen har gjorts för ett sämre fyllnadsmaterial än förväntat. Fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul har minskats med 10 MPa det vill säga 33 % och ur materialsynpunkt innebär det att materialet har gått från en relativt hårt packad morän utblandat med en sprängstensfyllnad till att vara en mer sandig morän, se bilaga 7.

6.1.3.1 Totalsättning

Totalsättningen på grund av yttre laster vid reduktion av fyllnadsmaterialets kompressionsmodul för Plaxis redovisas i Diagram 6.11 och för FEM-design bottenplatta/Raft redovisas i Diagram 6.12. BE-slab redovisar igen totalsättning.

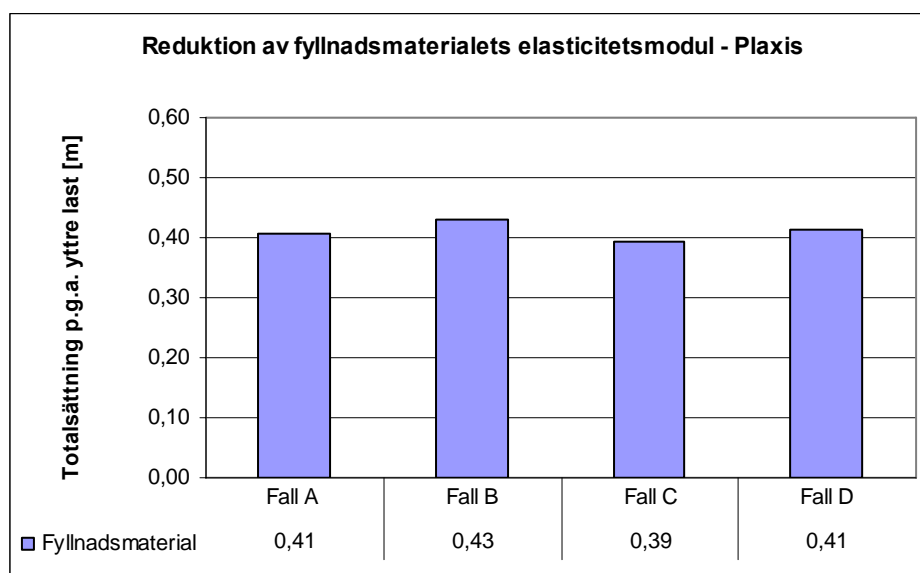


Diagram 6.11 Totalsättning på grund av yttre laster vid reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul för Plaxis

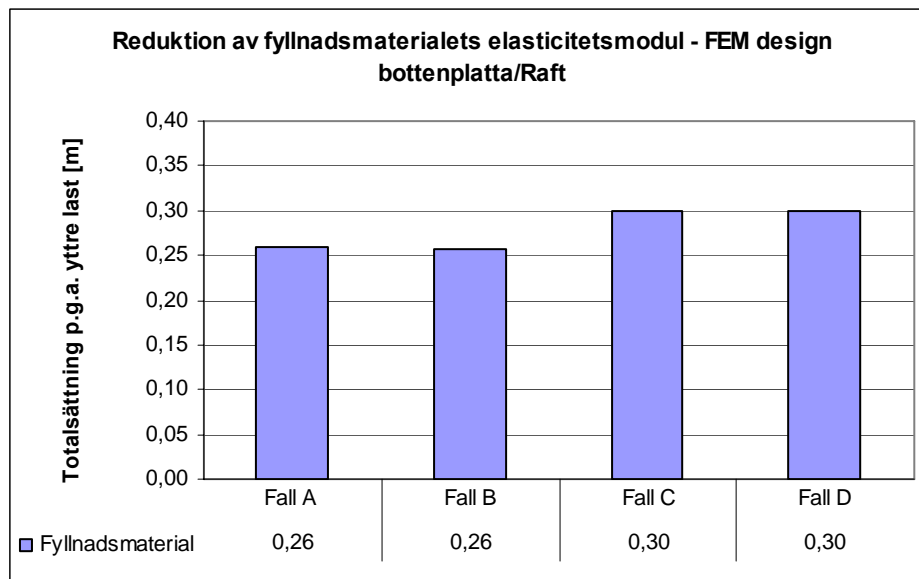


Diagram 6.12 Totalsättning på grund av yttre laster vid reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul för FEM-design bottenplatta/Raft

6.1.3.2 Moment

Simuleringar av betongplattans maximala moment har för reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul gjorts i Plaxis och FEM-design bottenplatta/Raft. Resultaten från Plaxis redovisas i Diagram 6.13 och från FEM-design bottenplatta/Raft redovisas i Diagram 6.14. För BE-slab har ingen simulering för reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul för grundfallen gjorts. Istället har simuleringar gjorts där enbart fyllnadsmaterialet beräknats och resultaten redovisas i Diagram 6.15.

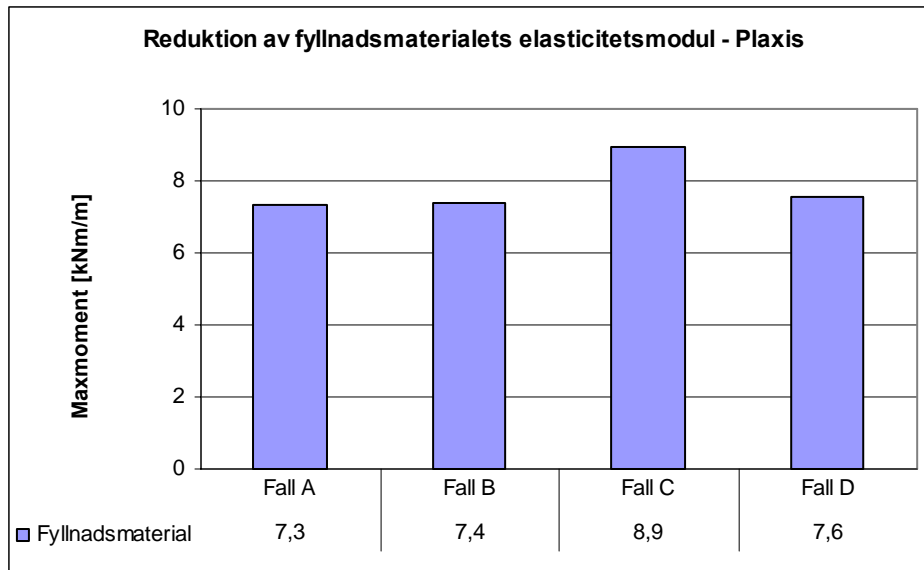


Diagram 6.13 Betongplattans maximala moment vid reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul för Plaxis

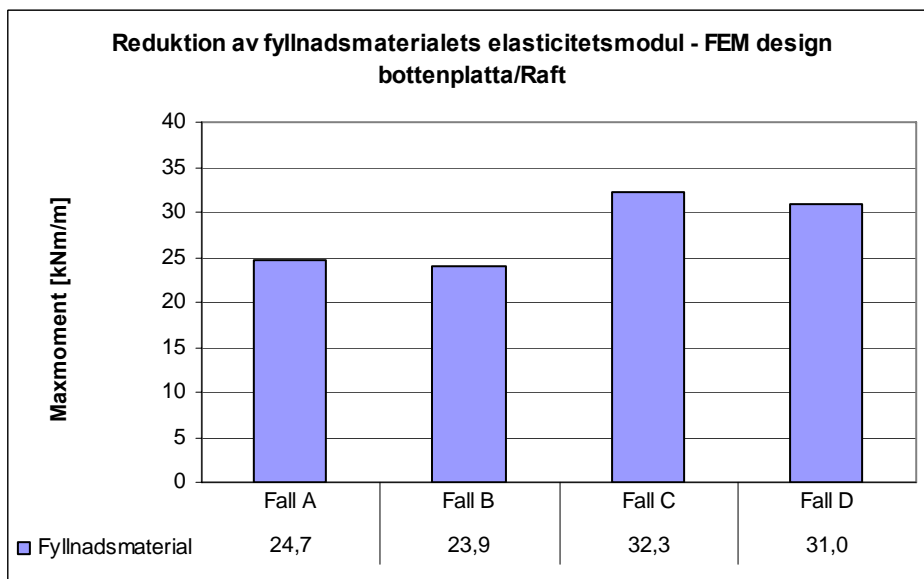


Diagram 6.14 Betongplattans maximala moment vid reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul för FEM-design bottenplatta/Raft

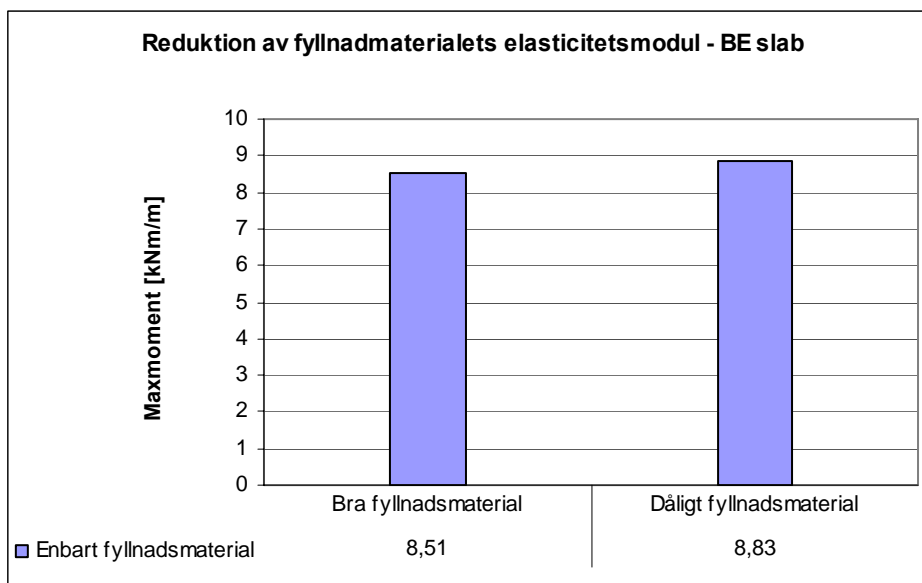


Diagram 6.15 Betongplattans maximala moment vid simulering av enbart fyllnadsmaterial i BE-slab

6.2 Beräkningsmodellens inverkan på resultatet

De tre datorprogrammen, Plaxis FEM-design bottenplatta/Raft samt BE-slab, bygger på olika principer och beräkningsgrunder. Nedan redovisas skillnaderna i resultat från grundfallen beroende på beräkningsmodell.

6.2.1 Totalsättning

Totalsättningen på grund av yttre last har beräknats i Plaxis, för handberäkningen samt för FEM-design bottenplatta/Raft. Resultaten för slutsättningarna på grund av yttre last redovisas i Diagram 6.16.

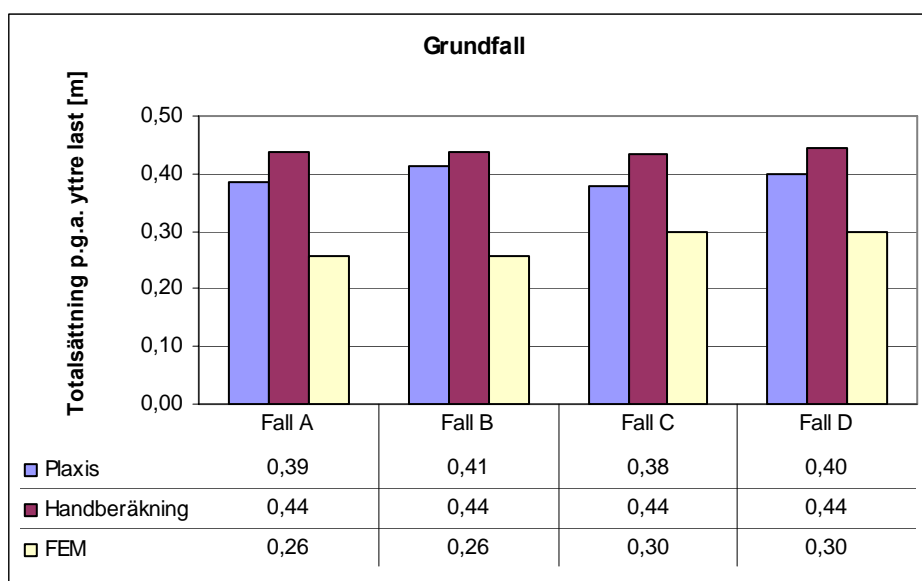


Diagram 6.16 Sammanställning av totalsättningen på grund av yttre last

6.2.2 Moment

Momentberäkningar har gjorts i alla tre beräkningsprogrammen samt för handberäkningen. Momentdiagrammet från handberäkningarna redovisas i bilaga 8. Momentdiagrammen för grundfall A – D i Plaxis redovisas i bilaga 9. Momentdiagrammen från simuleringar i FEM-design bottenplatta/Raft för grundfall A – D redovisas i bilaga 10. Momentdiagrammen från simuleringarna i BE-slab redovisas för grundfall A – D i bilaga 11 och för känslighetsanalysen i bilaga 12.

Betongplattans maximala moment från respektive simulering för grundfall A – D för Plaxis, handberäkning, FEM-design bottenplatta/Raft samt BE-slab redovisas i Diagram 6.17.

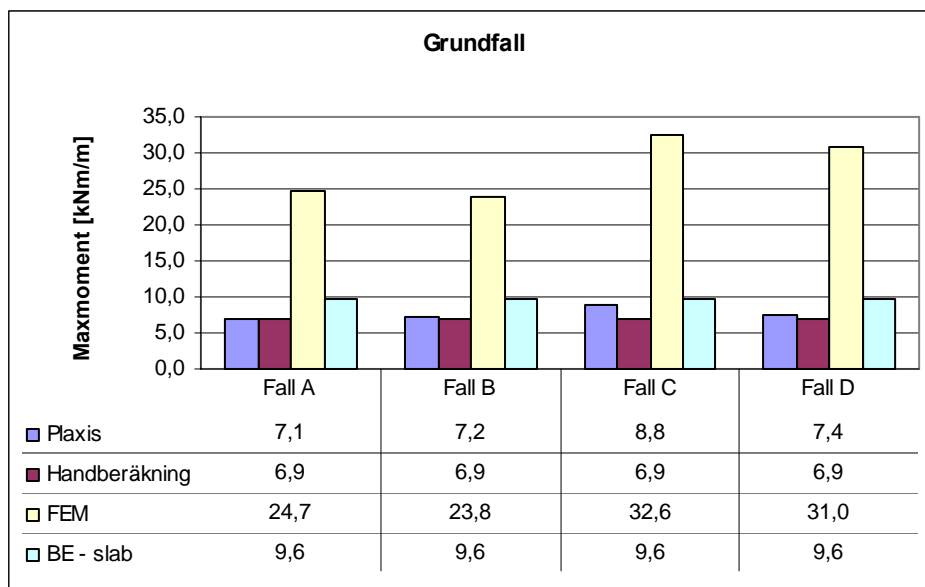


Diagram 6.17 Sammanställning av betongplattans maximala moment

6.3 Tidsberoende sättningar

I lera uppstår alltid konsolideringssättningar som även kallas tidsättningar. Hur snabbt slutsättningen nås beror främst på lerans konsolideringskoefficient och mäktighet. Sättningskurvan för konsolideringssättningar är en negativ exponentialfunktion där sättningshastigheten är snabbast de första åren. För att kontrollera om konsolideringssättningar på grund av fyllnadsmaterialets vikt fortfarande pågår beräknas tidsättningen genom både handberäkning och i datorprogrammet Plaxis.

Handberäkningarna visar att slutsättningen från dess att leran belastats sker efter 560 år. Totalsättningarna på grund av fyllnadsmaterialet från handberäkningarna redovisas i två diagram. Enbart konsolideringssättningarna redovisas i Diagram 6.18. I Diagram 6.20 redovisas både konsolideringssättningarna och de momentana sättningarna.

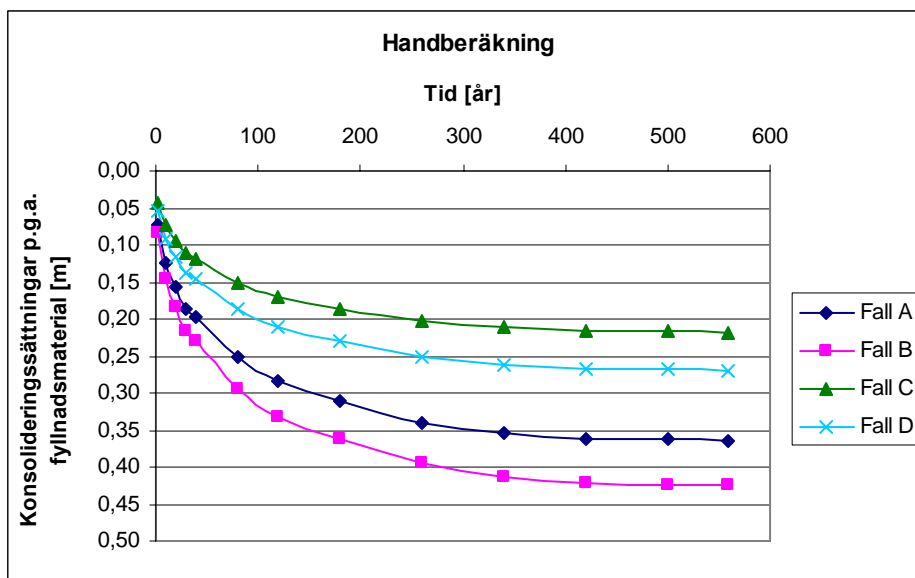


Diagram 6.18 Sammanställning av konsolideringssättningarna p.g.a. fyllnadsmaterialet för handberäkning

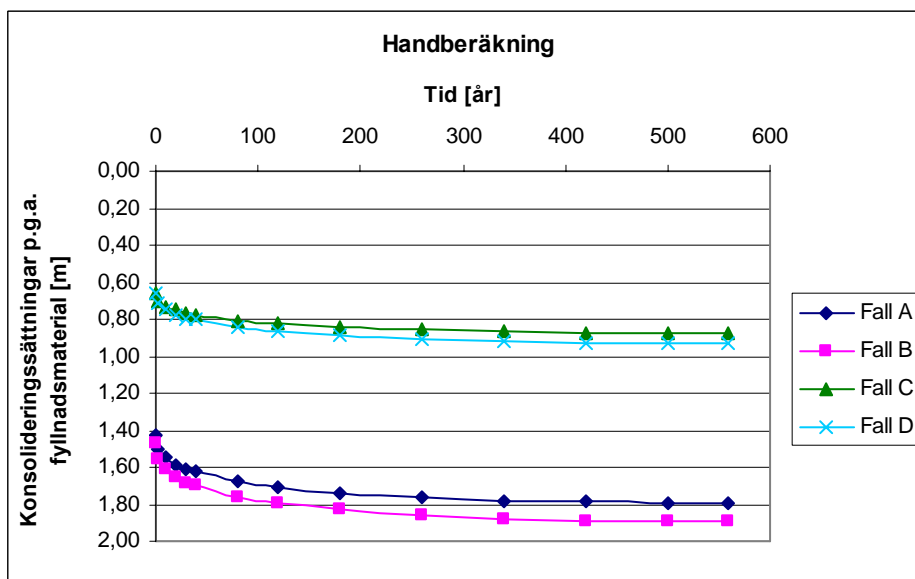
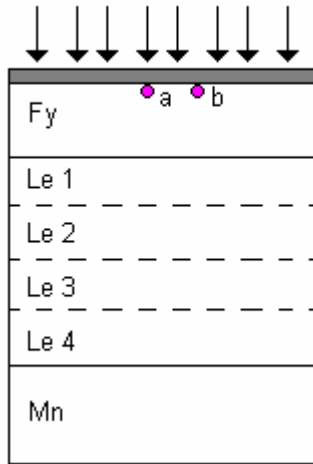


Diagram 6.19 Sammanställning av konsolideringssättningar samt de momentana sättningarna p.g.a. fyllnadsmaterialet för handberäkning

I Plaxis har sättningskurvan för konsolideringssättningarna tagits fram i två punkter i direkt anslutning till betongplattan. Den ena punkten är placerad rakt under en punktlast och den andra punkten mitt i mellan två laster, se Figur 6.1. Sättningskurvorna från de båda punkterna sammanfaller och därför redovisas endast en kurva från varje grundfall. Plaxis antar att sättningen från fyllnadsmaterialet är färdig innan de yttre lasterna belastar beräkningsmodellen. Resultaten från Plaxis visar att slutsättningen från enbart fyllnadsmaterialet sker för fall A och B efter

ungefär 360 år, för fall C och D sker slutsättningen från fyllnadsmaterialet efter ungefär 22 år respektive 27 år, se Diagram 6.20.



Figur 6.1 Resultat där tidsättningarna beräknas i Plaxis

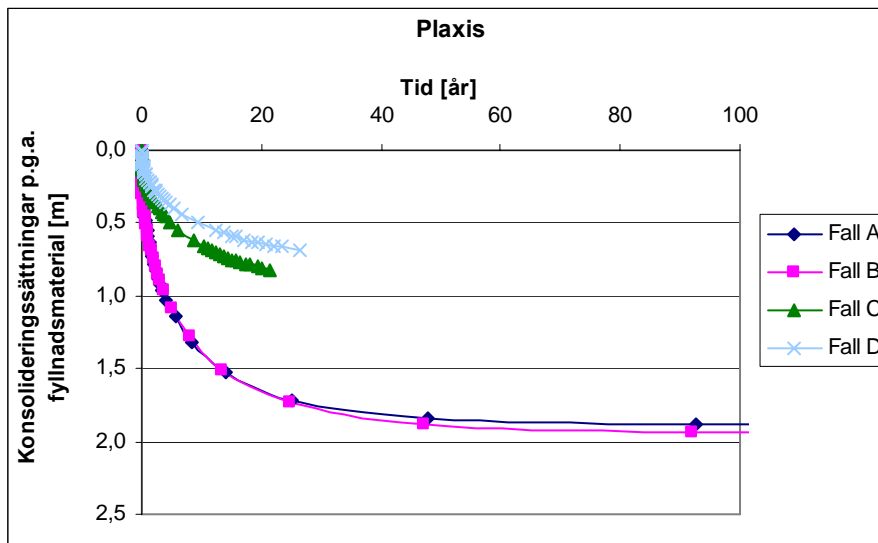


Diagram 6.20 Sammanställning av tidsättningar Plaxis

7 Analys

Resultaten från simuleringarna kommer att analyseras ur två olika synvinklar. Det ena där tyngdpunkten ligger på jordmodellernas inverkan, den andra där datorprogrammets olika beräkningsprinciper analyseras mot varandra. Datorprogrammets beräkningsprincip har en stor betydelse eftersom de ger att olika delar av jordmodellen får olika stora värden på resultatet. Analysen delas även in i en diskussion kring totalsättningen och en diskussion angående momentet.

7.1 Jordmodellens inverkan på totalsättningen

Plaxis och FEM-design bottenplatta/Raft beräknar båda fram slutsättningen. Dessutom kan Plaxis visa resultat från delberäkningar och för separata skikt. BE-slab beräknar inte slutsättningen, däremot används de gjorda handberäkningarna för att ta fram bäddmodulen. Nedan följer analyser för Plaxis, FEM-design bottenplatta/Raft samt handberäkningarna.

7.1.1 Jordmodellens geometris inverkan på totalsättningen

De fyra beräkningsfallen är uppbyggda så att fall A efterliknar verkligheten i materialparametrar och den har mäktigt fyllnadsmaterial, dessutom är leran indelad i fyra skikt. Fall B överensstämmer med fall A förutom att leran inte är indelad i några inre skikt. Fall C är uppbyggd som fall A men fyllnadsmaterialets mäktighet har minskats. Fall D överensstämmer med fall C men precis som vid fall B är inte leran indelad i några inre skikt.

För att beräkna vilken påverkan indelningen av lerlagret i flera skikt har på resultatet beräknas den procentuella skillnaden mellan fallen med flera lerskikt och de med ett lerskikt, se Diagram 7.1 nedan. Resultatet från simuleringarna i Plaxis visar att de fall där leran inte delas in några inre skikt får en större sättning på grund av den yttre lasten. Totalsättningen ökar med ungefär 5 % vilket är ungefär 2 centimeter. I FEM-design bottenplatta/Raft har lerskiktsindelningen ingen betydelse för resultatet. Handberäkningarna påvisar en viss betydelse av indelning av leran i inre skikt.

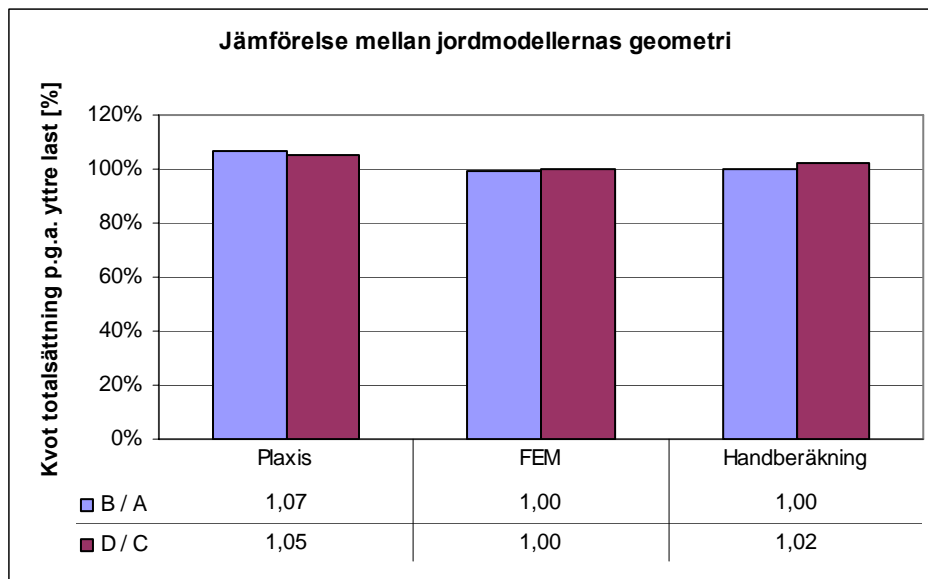


Diagram 7.1 Jämförelse av jordmodellernas inverkan på totalsättningen p.g.a. yttre last

Att det är i Plaxis där betydelsen av att dela in leran i inre skikt har störst betydelse var väntat, då Plaxis använder flest jordmaterialparametrar samt tar hänsyn till skiktens nivåplacering. Resultatet visar att för fall A och fall C där leran är indelad i inre skikt, är leran styvare och starkare än för fall B och fall D där ett medelvärde av lerans egenskaper använts. Det är här även viktigt att reflektera över hur exakta resultat som eftersträvas. I Plaxis ger en exaktare jordmaterialföljd med ingående parametrar ett bättre resultat, frågan är helt enkelt på hur mycket tid som ska läggas ner för att beräkningsmässigt minska totalsättningen ytterligare ett par millimeter. Samtidigt ska vikten av bra jordmaterialparametrar ej glömmas bort. Det har ingen betydelse hur många skikt jordlagren indelas i, om jordmaterialparametrar inte överensstämmer med verkligheten.

I FEM-design bottenplatta/Raft ger en indelning av leran i inre skikt ingen skillnad på resultatet. Det tyder på att den sammanlagda styvheten på leran i fall B och fall D är ett bra avvägt medelvärde av de kompressionsmoduler som används i fall A och fall C. Eftersom FEM-design bottenplatta/Raft enbart använder kompressionsmodulen som jordmaterialparameter minskar effekten av att beskriva jordlagerföljden med flera skikt.

Vid handberäkningen används flera jordmaterialparametrar vilket medför att det blir svårare att återge lerlagret som ett skikt. Eftersom att vid handberäkningen tas differenserna mellan styvheterna fram genom grafiskt metod finns risk för en viss felmarginal. Att resultaten från fall B överensstämmer med resultaten från fall A medan fall C är något styvare än fall D beror antagligen på felmarginaler vid den grafiska avläsningen samt i vilka skikt sättningen beräknas. Det innebär att felmarginalen från den grafiska avläsningen och den skiktindelningen som används vid sättningsberäkningen är större än den felmarginal som blir av att lerans ses som ett skikt.

De simulerade beräkningsfallen är relativt homogena med jämn ökning av jordmaterialegenskaperna. Det minskar skiktindelningens betydelse på resultatet. Indelning av jordlager i inre skikt är således viktigast vid stora variationer i jordmaterialparametrar. Indelningen av jordlager i inre skikt är dock av stor betydelse för resultatet och bör eftersträvas.

7.1.2 Fyllnadsmaterialets mäktighet inverkan på totalsättningen

Där fyllnadsmaterial har använts som utfyllnad av ett område kan fyllnadsmaterialets mäktighet variera relativt kraftigt på en lite yta. Om inte tillräckliga undersökningar görs eller om undersökningarna görs på fel platser kan lokala variationer av större mäktigheter av fyllnadsmaterial missas. För att undersöka betydelsen av fyllnadsmaterialets mäktighet på totalsättningen kontrolleras den procentuella skillnaden mellan fallen där fyllnadsmaterialet har stor mäktighet och fallen där fyllnadsmaterialets mäktighet är liten, se Diagram 7.2. Vid simuleringarna för fall A och fall B har fyllnadsmaterialet en mäktighet på 7 meter och för fall C och fall D en mäktighet på 2,5 meter.

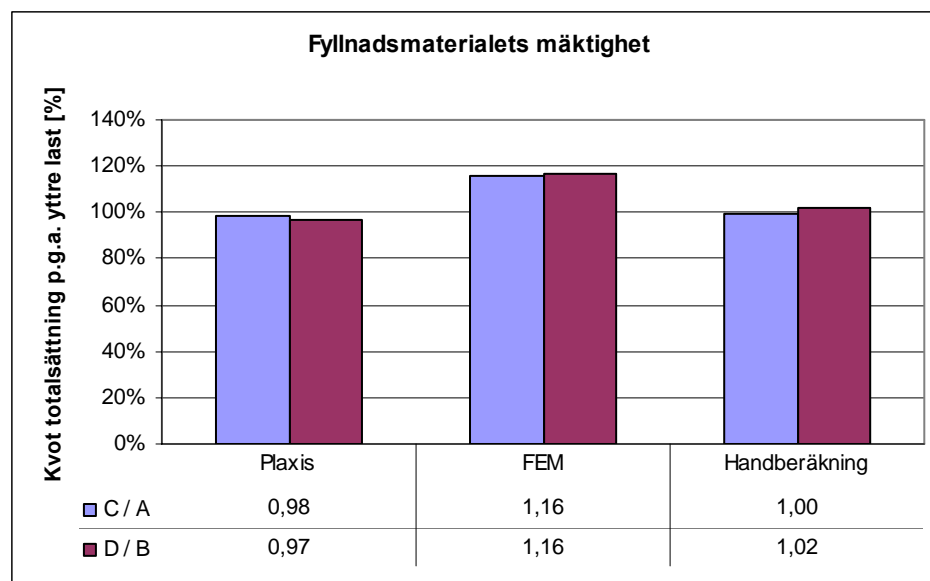


Diagram 7.2 Fyllnadsmaterialets mäktighets betydelse för totalsättningen p.g.a. yttre last

Resultaten från Plaxis i Diagram 7.2 ovan visar sättningen på grund av den yttre lasten. Sättningen som bildats av fyllnadsmaterialet är inte med. Trots det ses en skillnad på resultatet på ungefär 2 – 3 %. Det tyder på att fyllnadsmaterialets påverkan på sättningen är mer komplex än att enbart fungera som en last på underliggande jordlager. Att fall C och fall D har en något mindre totalsättning på grund av den yttre lasten, beror antagligen på att lasterna fördelas genom noderna nedåt i jordmodellen. Den mindre mäktigheten av fyllnadsmaterial ger en annan spänningsbild än fallen med mäktigt fyllnadsmaterial. Det är dock lite förvånande att det har en sådan stor

betydelse på resultatet då ingen yttre lastspridning finns eftersom jordmodellen är låst i randen.

Den stora skillnaden mellan fall C och fall D mot fall A och fall B i FEM-design bottenplatta/Raft beror på lastspridningen. Fyllnadsmaterialet är styvare och mindre sättningsbenäget är en lera. I fall A och fall B med det mäktiga fyllnadsmaterialet innebär lastspridningen att stora delar av den yttre lasten tas upp av fyllnadsmaterialet och lite av leran. I fall C och fall D där fyllnadsmaterialet har en mindre mäktighet har lastspridningen inte skett i så stor grad i överkant av leran, därför påverkas leran av en större yttre last i fall C och fall D än i fall A och fall B.

Resultatet från de utförda handberäkningarna i Diagram 7.2 är precis som för Plaxis enbart resultatet av den yttre lasten. Eftersom ingen lastspridning finns i handberäkningarna borde resultatet bli liknande för alla fyra beräkningsfallen. Resultatet påverkas enbart av lerlagrens styvhet och densitet eftersom det är de enda parametrarna som varierar mellan grundfallen. Att det är sättningen på grund av yttre lasten som redovisas i Diagram 7.2 ovan kan ifrågasättas. Det är gjort främst för att visa hur enkelt det är att acceptera resultat som redovisas utan att reflektera över dem.

Områdets totalsättning påverkas till stor del av mängden fyllnadsmaterial som placeras på markytan. För att kontrollera vikten av fyllnadsmaterialet beräknas sättningen per meter fyllnadsmaterial för totalsättningarna på grund av fyllnadsmaterialet, vilket inkluderar de momentana sättningarna, se Diagram 7.3.

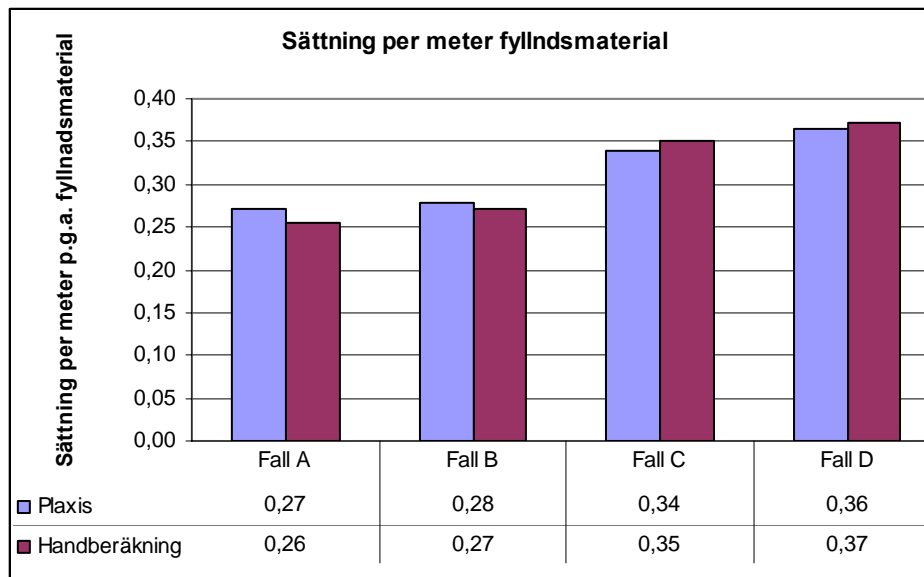


Diagram 7.3 Totalsättning per meter p.g.a. fyllnadsmaterialet

Resultaten från både Plaxis och handberäkningen visar att sättningen per meter fyllnadsmaterial för fall A och fall B med mäktigt fyllnadsmaterial är ett par centimeter lägre än sättningen per meter fyllnadsmaterial för fall C och fall D. Det

visar att jordlager är komplexa system där många parametrar och egenskaper verkar tillsammans.

Fyllnadsmaterialets mäktighet har stor betydelse på slutsättningen. Fyllnadsmaterialet påverkar sättningen både genom sin egentygnd samt vid beräkningar med lastspridning.

7.1.3 Lerans kompressionsmoduls betydelse för totalsättningen

Simuleringarna av lerans känslighetsanalysfall visar att lerans kompressionsmodul har stor betydelse för totalsättningen. Den procentuella förändringen beräknas med grundfallet som nolläge. Resultaten från alla simuleringar i såväl Plaxis som FEM-design bottenplatta/Raft sammanfaller mycket väl och visar tydligt att om lerans kompressionsmodul förändras med 25 % förändras totalsättningen med ungefär 20 % - 30 %, se Diagram 7.4. De fyra grundfallen sammanfaller väl med varandra och början till en exponentiellt avtagande funktion syns.

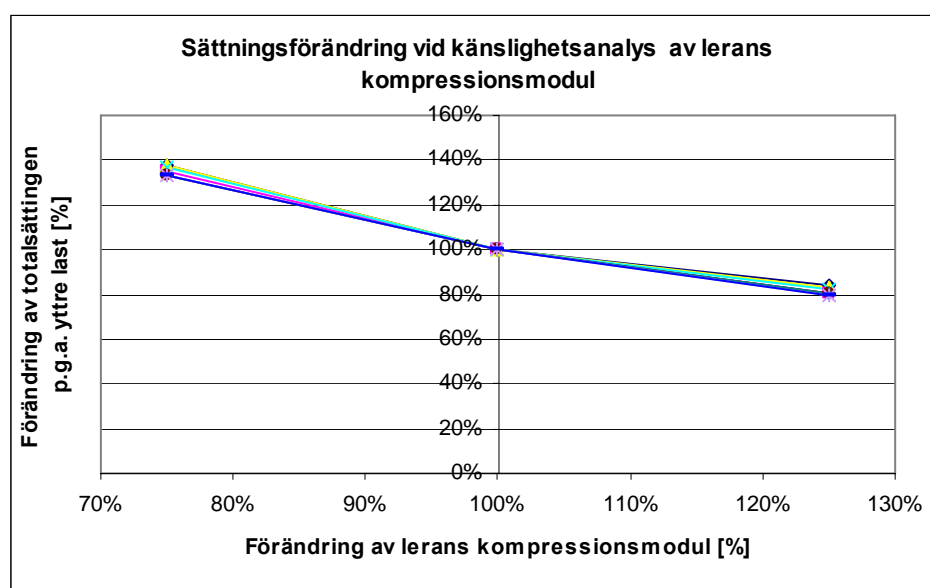


Diagram 7.4 Känslighetsanalys för lerans kompressionsmodul

Vid simulering av känslighetsanalys av lerans kompressionsmodul i Plaxis ses en liknande procentuell förändring för alla beräkningsfallen, se Diagram 7.5. Att resultaten inte är desamma beror på att leran beskrivs genom flera andra jordmaterialparametrar vilka inte förändras. Resultatet visar dock att lerans kompressionsmodul har stor betydelse på totalsättningen och bör därför beskrivas med stor noggrannhet. Ingen genomgående trend syns huruvida lerans indelning i inre skikt har betydelse för resultatet när kompressionsmodulen förändras.

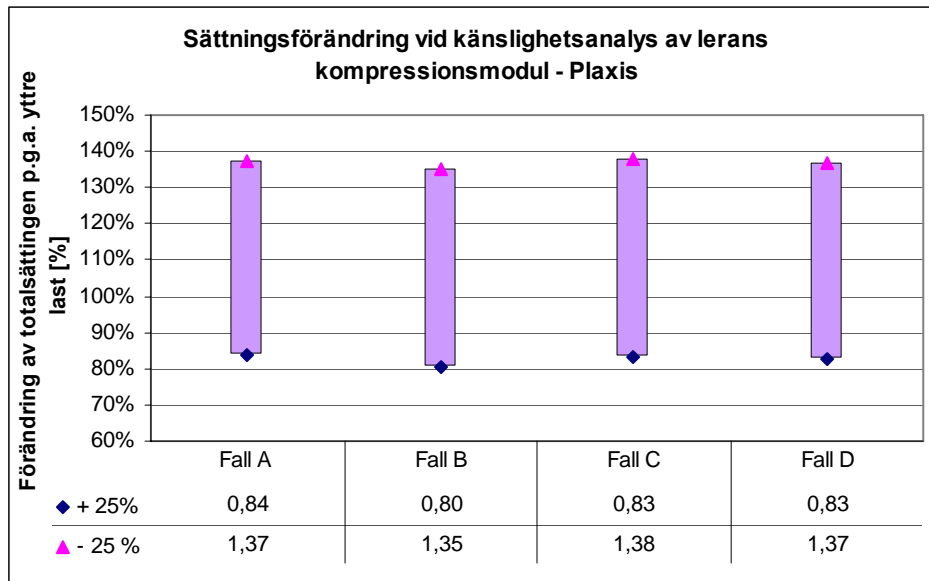


Diagram 7.5 Sättningsförändring vid känslighetsanalys av lerans kompressionsmodul i Plaxis

Vid simulering av känslighetsanalys av lerans kompressionsmodul i FEM-design bottenplatta/Raft sker samma procentuella förändring för alla beräkningsfallen, se Diagram 7.6. Att det inträffar beror på att leran enbart beskrivs av kompressionsmodulen vilket medför att samma procentuella förändring i förhållande till grundfallen sker.

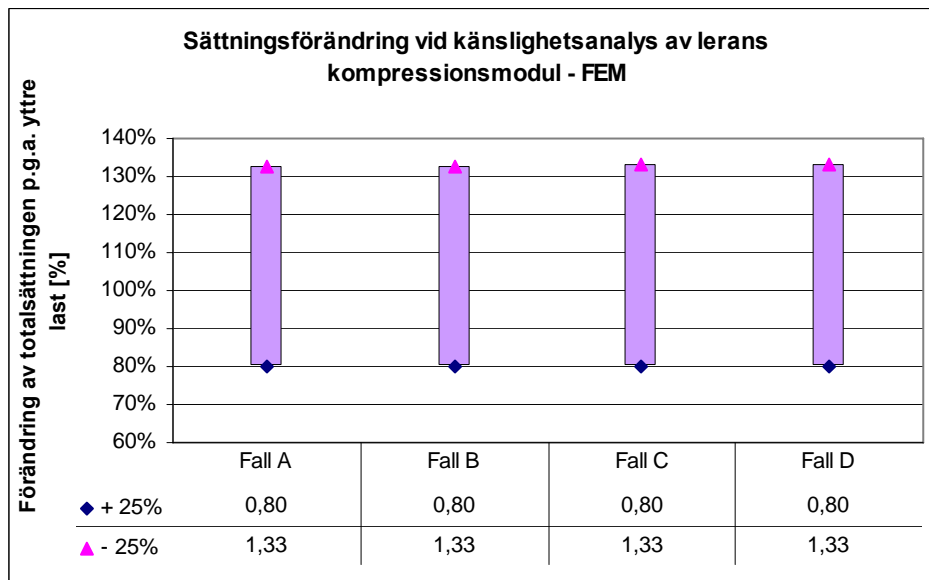


Diagram 7.6 Sättningsförändring vid känslighetsanalys av lerans kompressionsmodul i FEM-design bottenplatta/Raft

Lerlager är ofta det jordlager som påverkar sättningen mest. Det medför att förändringar av lerans jordmaterialparametrar ger stora förändringar för sättningen, därför bör leran undersökas noggrant.

7.1.4 Fyllnadsmaterialets egenskapers betydelse för totalsättningen

Fyllnadsmaterial är, som tidigare nämnts, svårt att ge bra materialparametrar. Vid känslighetsanalysen har en relativt kraftig reduktion av elasticitetsmodulen genomförts. Det ger dock en relativt liten förändring i förhållande till grundfallen, se Diagram 7.7.

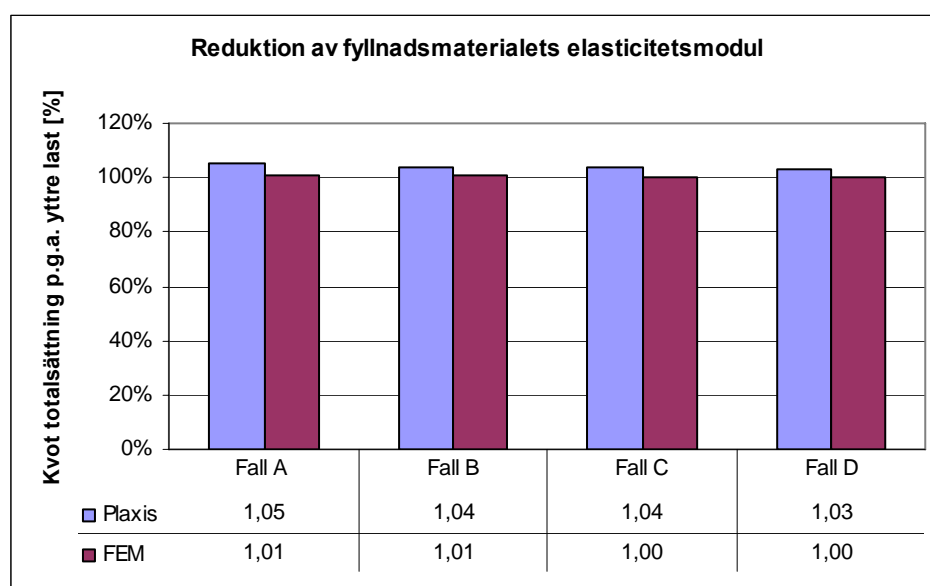


Diagram 7.7 Förändring totalsättning p.g.a. yttre last vid reduktion av fyllnadsmaterialet elasticitetsmodul

I Plaxis är förändringen ungefär 4 procent vilket kan översättas till omkring 1 – 2 centimeters sättning. Fyllnadsmaterialet är ett styvt material och sättningen i materialet är liten. Det är dock något förvånande att en reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul med 10 MPa inte påverkar resultatet mer. Det har en mindre inverkan på resultatet än vad uppdelningen av leran i inre skikt har.

I FEM-design bottenplatta/Raft är betydelsen av att reducera fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul mer eller mindre obefintlig. En anledning till att inverkan på resultatet är så pass liten är att elasticitetsmodulen vilken räknas om till kompressionsmodulen medverkar till fjäderkonstanten. Det är sedan den sammanlagda fjäderkonstanten som deformeras. Fyllnadsmaterialets kompressionsmodul är mycket större i förhållande till lerans och trots att den reducerats kraftigt är den betydligt större än lerans kompressionsmodul.

7.1.5 Sammanställning

- Det svagaste jordlagret har störst betydelse för totalsättningen och variationer i parametergenskaper ger stora skillnader på resultaten och bör därför undersökas väl.
- Styva jordlager som överlagrar svagare jordlager påverkar inte enbart totalsättningen genom jordmaterialets egentynghet utan även på grund av lastspridningen.
- Jordlagers skiktindelning har störst betydelse vid inhomogena jordlager med varierande jordmaterialparametrar.
- Indelning av ett svagare jordlager i flera skikt påverkar resultatet och bör ge ett mer troligt resultat.
- Fler använda jordmaterialparametrar försvårar att se ett mäktigt jordlager som enbart ett skikt.
- Beräkningsmodellen bör byggas upp efter hur säkert resultat som eftersträvas.

7.2 Jordmodellens inverkan på momentet

Plaxis, FEM-design bottenplatta/Raft och BE-slab beräknar alla fram betongplattans maximala moment. Momentdiagram har framtagits för alla grundfallen samt känslighetsanalyserna i både Plaxis och FEM-design bottenplatta. För BE-slab har enbart simuleringar gjorts för grundfallen, där enbart fyllnadsmaterialet tagits med i beräkningen samt enbart dåligt fyllnadsmaterial. Momentkrafter har även beräknats genom handberäkning, där tas dock inte jordlagerföljden med i beräkningen och analys av handberäkningarna sker enbart i kap. 7.4 Beräkningsmodellens inverkan på momentet. Nedan följer analyser för Plaxis, FEM-design bottenplatta/Raft samt BE-slab.

7.2.1 Jordmodellens geometris inverkan på betongplattans moment

Fyra olika beräkningsfall används vid simuleringarna där fall A efterliknar verkligheten mest. Fall B överensstämmer med fall A förutom att leran inte är indelad i några inre skikt. Fall C har samma uppbyggnad av lerlagret som fall A däremot har fyllnadsmaterialets mäktighet minskats. Fall D överensstämmer med fall C förutom att leran inte har några inre skikt.

Precis som för sättningarna, beräknas jordmodellens geometris betydelse på betongplattans moment, genom den procentuella skillnaden mellan fallen med flera lerskikt och de med ett lerskikt, se Diagram 7.8. Störst variation ses i Plaxis mellan fall C och fall D med en skillnad på ungefär 20 procent. I FEM-design bottenplatta/Raft syns en viss betydelse medan ingen variation finns i BE-slab.

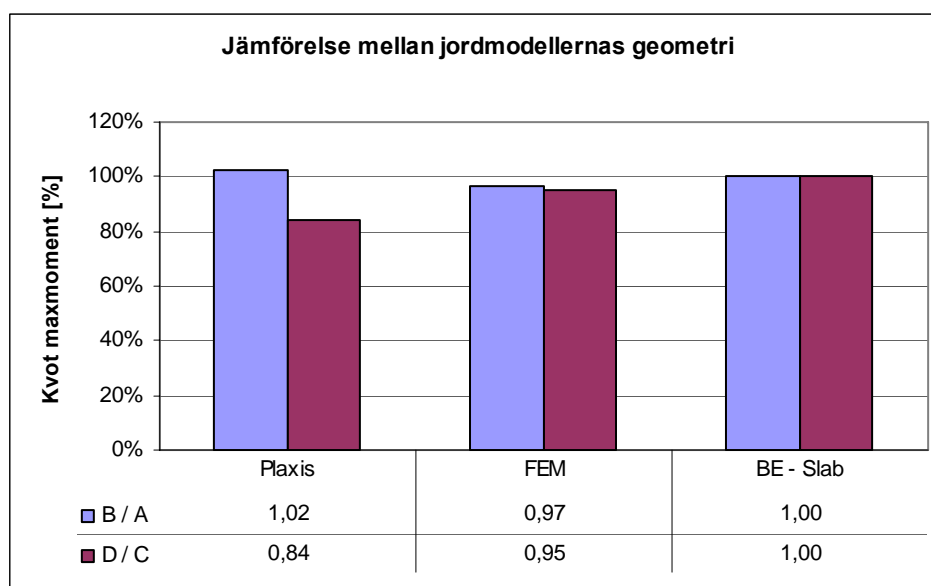


Diagram 7.8 Jordmodellens geometris betydelse på betongplattans maximala moment

Lerlagrens förhållande mellan fall A och fall B är desamma som förhållandet mellan fall C och fall D. Den stora skillnaden i resultatet tyder på att något mer förutom lerlagrens indelning har betydelse för betongplattans maximala moment. Förhållandet för betongplattans maximala moment mellan fall A och fall B är snarlikt. Betongplattans maximala moment i fall B är något mindre än för fall A, ungefär 2 procent vilket motsvarar omkring 0,1 kNm/m. Att lerlagrens skiktindelning har en liten betydelse i fall A och fall B beror på att fyllnadsmaterialets mäktighet fungerar som ett stabilt skikt och jämnar ut sättningsskillnader i markytan och på så sätt minskar betongplattans tvångsmoment. För fall C och fall D där fyllnadsmaterialets mäktighet är mindre har leran större inverkan på momentet i betongplattan. Att momentet är så mycket större i fall C visar att det är de översta jordlagren som har störst inverkan på betongplattan. Fall C med indelning av leran i inre skikt har ett svagare övre lager än vad fall D har med ett sammanlagt lerlager. Kompressionsmodulen är för de övre lagren för grundfallet C är 600 kN/m² samt 750 kN/m², medan kompressionsmodulen för grundfallet D är 850 kN/m² och är därmed styvare. Tillsammans med att fall C har något sneda lager medan fall D har helt vertikala lager medför det att tvångsmomentet på betongplattan i fall C är mycket större än i fall D och därför ses den stora skillnaden i betongplattans moment mellan fall C och fall D.

I FEM-design bottenplatta/Raft finns en viss variation mellan de olika beräkningsfallen. Fall A och fall C har större moment i betongplattan än vad fall B och fall D har. Den stora skillnaden ligger förutom i lerans skiktindelning även i att fall A och fall C beskrivs med fem "borrhål" medan fall B och fall D endast beskrivs med ett "borrhål". Det ger att fall A och fall C får en viss trappstegsförändring i lagren medan fall B och fall D har helt vertikala lager. Förändringen i fall A och fall C är liten men den finns dock och har enligt Diagram 7.8 relativt stor inverkan på betongplattans tvångsmoment.

BE – slab påvisar igen skillnad mellan fallen med indelning av leran i fler skikt och dem med enbart ett lager. Det beror främst på att de olika beräkningsfallen har en snarlik bäddmodul med variationer på ungefär 2 kN/m². Samtidigt antas hela ytan under betongplattan ha samma styvhet vilket medför att deformationen på betongplattan är liten och därmed är även tvångsmomentet liten.

Jordmodellens geometri påverkar betongplattans moment med varierande grad beroende av använd beräkningsmodell. Till skillnad mot sättningen påverkas betongplattans moment av att jordlagren till stor grad samverkar. Främst Plaxis men även till viss grad FEM-design bottenplatta/Raft påvisar betydelsen av fyllnadsmaterialets mäktighet och jordmaterialparametrarna för de övre jordlagren. BE-slab ger ett missvisande resultat, främst på grund av att bäddmodulen inte påverkar markytans varierande sättning.

7.2.2 Fyllnadsmaterialets mäktighet inverkan på betongplattans moment

Fyllnadsmaterialets mäktighet varierar mellan 7 meter och 2,5 meter, där fall A och fall B har stor mäktighet och fall C och fall D den mindre mäktigheten. Redan i föregående kapitel har betydelsen av fyllnadsmaterialets mäktighet diskuterats hur det fungerar som ett utjämnande skikt och minskar betongplattans tvångsmoment. I den här delen jämförs fall A mot fall C och fall B mot fall D, för att ta bort lerlagrens inverkan på betongplattans moment och enbart se till fyllnadsmaterialets mäktighet. Variationen mellan programmen och de ingående beräkningsfallen är relativt stor, se Diagram 7.9.

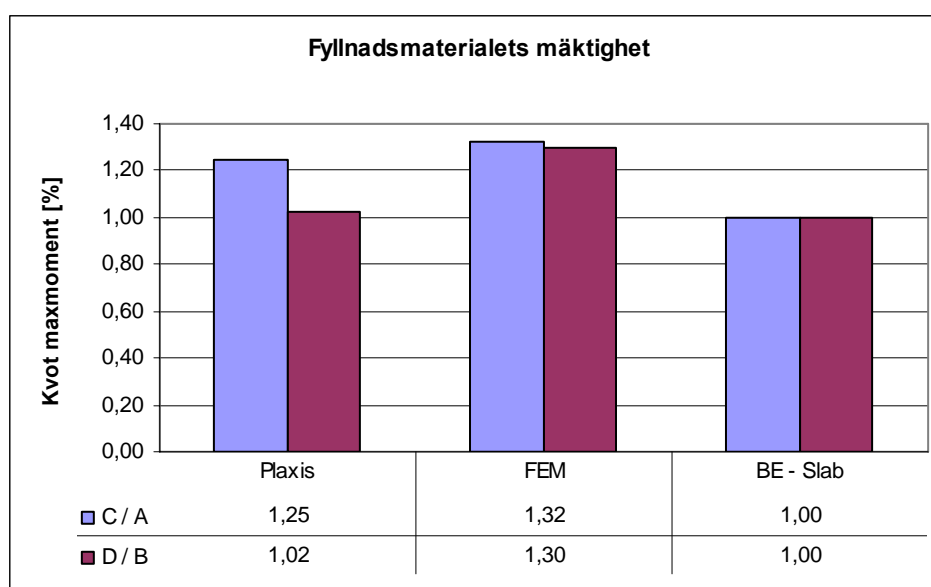


Diagram 7.9 Betydelsen av fyllnadsmaterialets mäktighet på betongplattans moment

I Plaxis beror den stora skillnaden mellan fall C och fall A att fyllnadsmaterialets mindre mäktighet i fall C ger större tvångsmoment än i fall A där fyllnadsmaterialet jämnar ut markytans sättningvariationer och därmed minskar betongplattans deformation. Att skillnaden är så stor beror även på att det översta lerskiktet i fall C är så pass svagt. Att inte samma skillnad uppstår mellan fall D och fall B, beror på att leran i fall D är jämnstyvt och därmed starkare än fall C i den övre delen av leran. Det minskar betydelsen av fyllnadsmaterialet som ett utjämnande lager.

I FEM-design bottenplatta/Raft ses en skillnad på ungefär 30 procent mellan fallen med liten mäktighet av fyllnadsmaterial, mot fallen med mäktigt fyllnadsmaterial. Skillnaden beror mycket på lastspridningen vilken ger en större sättning för fall C och fall D. Den större sättningen påverkar betongplattan genom att deformationen i betongplattan blir större, vilket ökar det tvångsmoment som betongplattan måste klara.

Precis som i föregående kapitel påvisar BE-slab igen skillnad mellan beräkningsfallen. Det beror som vid föregående fall på att de olika beräkningsfallen har en snarlik bäddmodul och att ytan under betongplattan antas ha samma styvhet.

Fyllnadsmaterialets mäktighet har tillsammans med de övre lerlagren stor betydelse för betongplattans moment i Plaxis. FEM-design bottenplatta/Raft påvisar att fyllnadsmaterialets mäktighet till stor del ensamt påverkar betongplattans moment. Plaxis visar ett bättre resultat eftersom jordlager är komplexa system och är beroende av fler parametrar än kompressionsmodulen. BE-slab ger ett missvisande resultat då bäddmodulen inte beskriver jordlagrens rörelser tillräckligt bra.

7.2.3 Lerans kompressionsmoduls betydelse för betongplattans moment

Vid känslighetsanalysen av minskad kompressionsmodul av leran ses samma trender i betongplattans momentkraft som för grundfallen. För att lättare se betydelsen av lerans kompressionsmodul på momentet i betongplattan beräknas den procentuella skillnaden mot grundfallen. I Plaxis ses en stor variation för betydelsen av lerans kompressionsmodul mellan de olika beräkningsfallen, se Diagram 7.10. I FEM-design bottenplatta/Raft är betydelsen för lerans kompressionsmodul likartad för de olika grundfallen, se Diagram 7.11.

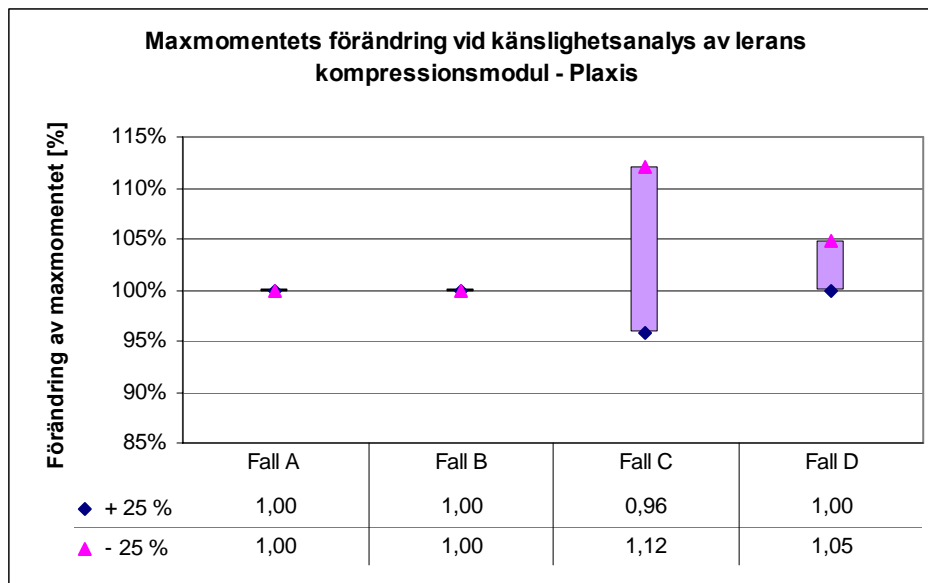


Diagram 7.10 Förändring av betongplattans moment vid känslighetsanalys av lerans kompressionsmodul för Plaxis

I Plaxis har lerans kompressionsmodul i stort sätt ingen betydelse för betongplattans maximala moment för fall A och fall B. Det beror på att de har ett mäktigt fyllnadsmaterial som minskar den inverkan lera har på betongplattan. För fall C inverkar lerans kompressionsmodul mycket på betongplattans moment. Störst betydelse har en minskning av lerans kompressionsmodul vilket medför att betongplattans moment ökar med 11 %. Vid en ökning av lerans kompressionsmodul minskar betongplattans moment med 5 %. Samma tendens syns även för fall D dock att utfallet är mindre. En ökning av lerans kompressionsmodul påverkar inte betongplattans moment, det gör dock en minskning vilket medför en förändring på 5 %. Lerans kompressionsmodul har ungefär dubbelt så stor betydelse för fall C än för fall D. Det beror på kompressionsmodulens storlek i grundfallet, det vill säga utgångsläget.

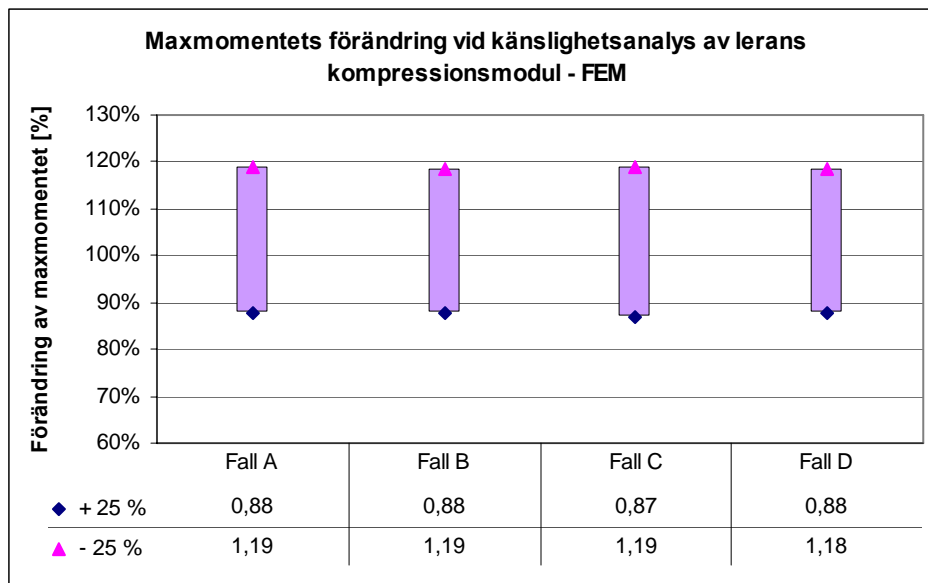


Diagram 7.11 Förändring av betongplattans moment vid känslighetsanalys av lerans kompressionsmodul för FEM-design bottenplatta/Raft

Även i FEM-design bottenplatta syns den påverkan som lerans kompressionsmodul har på momentkrafterna och minskad kompressionsmodul ökar momentkrafterna. Skillnaden är att samma procentuella förändring sker för alla beräkningsfallen. Det beror på att leran enbart beskrivs av kompressionsmodulen och en förändring i storlek ger direkta resultat. När lerans kompressionsmodul ökar med 25 % minskar betongplattans maximala moment med 12 %. Vid en minskning av lerans kompressionsmodul ökar istället betongplattans maximala moment med 19 %. Det visar att förhållande mellan lerans kompressionsmodul och betongplattans moment inte är en rätlinjig ekvation.

Förändring av lerans kompressionsmodul ger stora variationer på betongplattans moment. Plaxis ger till viss del ett mer korrekt resultat än FEM-design bottenplatta/Raft då fler parametrar påverkar jordlagrens beteende.

7.2.4 Fyllnadsmaterialets betydelse för betongplattans moment

Fyllnadsmaterialets mäktighet har visat sig ha stor betydelse för betongplattans maximala moment. För att kontrollera betydelsen av fyllnadsmaterialets materialparametrar beräknas kvoten mellan grundfallen och fallen med en reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul. Vid känslighetsanalysen har en relativt kraftig reduktion av elasticitetsmodulen genomförts där betydelsen för betongplattans moment är dock ganska minimal, se Diagram 7.12.

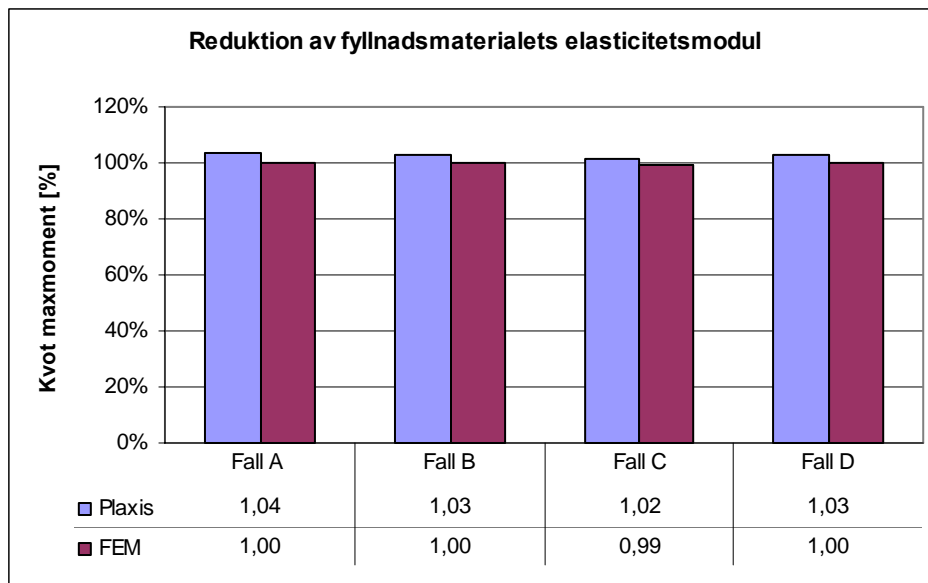


Diagram 7.12 Betydelsen av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul för betongplattans moment

I Plaxis uppvisar alla fyra beräkningsfallen D samma tendens att momentet i betongplattan ökar något när fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul minskar. Det betonar ytterligare fyllnadsmaterialets egenskap att vara ett styvt lager som jämnar ut markytan och minskar tvångsmomentet.

Även i FEM-design bottenplatta/Raft tyder resultatet från reduktionen av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul att föregående antagande stämmer att fyllnadsmaterialet betydelse för betongplattans moment är liten. Fyllnadsmaterialet påverkar i första hand sättningen och eftersom sättningen i fyllnadsmaterialet är så liten minimeras betydelsen. Fyllnadsmaterialet påverkar resultatet främst genom mäktigheten och hur stor del den tar upp av lastspridningen.

I BE-slab har jordmodellen en relativt liten betydelse och det kan vara frestande att enbart ta med fyllnadsmaterialet i beräkningen av bäddmodulen. Simuleringar har gjorts för att enbart fyllnadsmaterial har använts för att beräkna bäddmodulen, samt att enbart dåligt fyllnadsmaterial har använts, se Diagram 7.13. Vid jämförelse har ett grundfall använts då differensen mellan de fyra grundfallen är mycket liten.

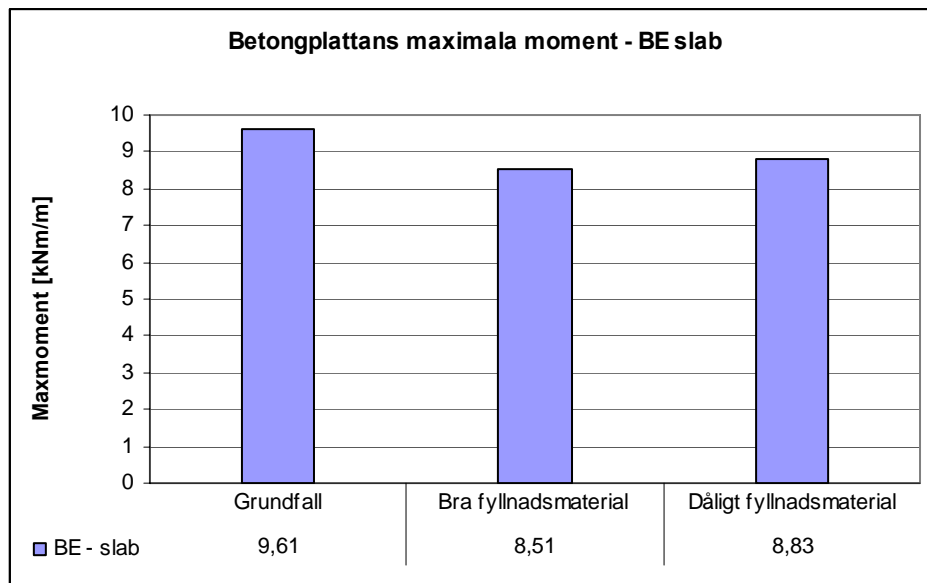


Diagram 7.13 Simulering av enbart fyllnadsmaterialet i BE-slab

Skillnaden mellan bäddmodulen för grundfallen och när enbart fyllnadsmaterialet beräknas är mycket stor, se kap 5.4.2 Utförande, Tabell 5.2. Däremot är skillnaden i betongplattans maximala moment mindre. Minskningen hos betongplattans maximala moment är ungefär 1 kNm/m och då har bäddmodulen ökat med två tiopotenser. Det ger att betydelsen för till exempel lerans kompressionsmodul är mycket liten, då ganska stora förändringar hos bäddmodulen behövs för att ge variationer i betongplattans moment.

Reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul ger en liten förändring på betongplattans moment. Både Plaxis och FEM-design bottenplatta/Raft uppvisar samma resultatförändringar. Resultaten från BE-slab ger att storleken på bäddmodulen har en relativt liten betydelse för betongplattans moment.

7.2.5 Sammanställning

- De övre jordlagren har störst betydelse för betongplattans moment. Ett styvt jordlager med stor mäktighet motverkar yttre tvångsmoment på betongplattan, medan ett svagt jordlager medverkar till en böjning av betongplattan och därmed ett högre moment.
- Indelning av ett svagare jordlager i skikt har betydelse även för betongplattans moment, då det ger mer exakta parameteregenskaper för jordskiktets styvhet.

7.3 Beräkningsmodellens inverkan på totalsättningen

Beräkningsprogrammen skiljer sig på flera punkter från varandra, men det är främst randvillkoren och lastspridningen som är annorlunda. Sättningsberäkningar är gjorda i

Plaxis, FEM-design bottenplatta/Raft och handberäkningen och skillnader i resultaten diskuteras nedan. För Plaxis och handberäkningen kan delresultat tas fram dock analyseras sättningen på grund av den yttre lasten eftersom det är den enda sättningen FEM-design bottenplatta/Raft redovisar. Skillnaden hos sättningen för de olika programmen är tydlig och varierande, se Diagram 7.14.

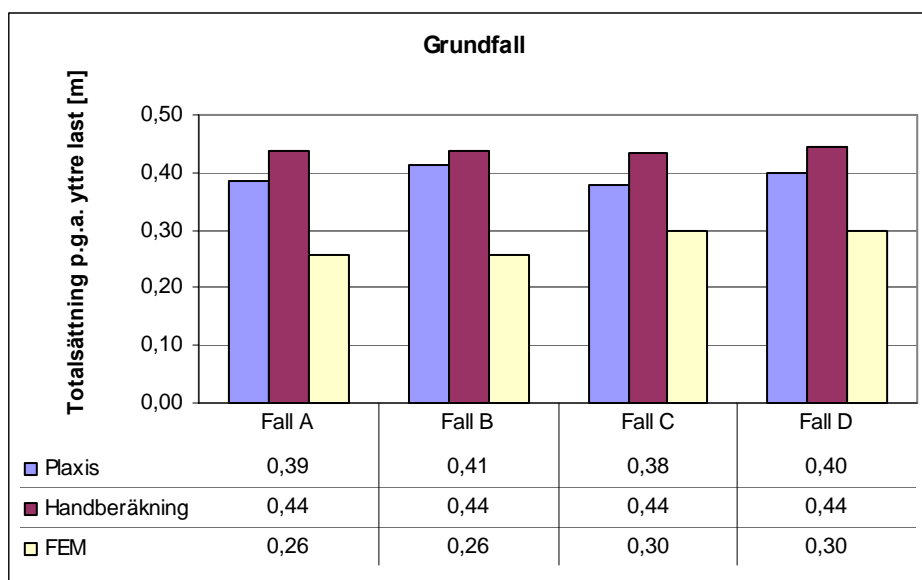


Diagram 7.14 Totalsättning p.g.a. yttre last för grundfallen

7.3.1 Randvillkorens inverkan på totalsättningen

Randvillkoren skiljer sig mellan beräkningsprogrammen vilket försvårar möjligheterna att beräkna förändring mot en nollnivå. Plaxis och handberäkningen bygger på samma princip av att beräkningsmodellen är låst i horisontalled så rörelse kan enbart ske i vertikalled. FEM-design bottenplatta/Raft är däremot fri för rörelse i alla tre dimensioner.

I Plaxis medför randvillkoret med låsta förflyttningar i horisontalled att jordmaterialen inte kan pressas bort från betongplatta, vilket ger en relativt jämn slutsättning under betongplattan. Tendenser till att betongplattans deformation är något skålformad finns, speciellt i fall C. Den skålformade sättningen skulle däremot öka avsevärt om jordmodellen inte är låst i randen. Handberäkningens randvillkor liknar de i Plaxis eftersom även den är låst i randen och bildar därmed en enkel tvådimensionell beräkningsmodell.

FEM-design bottenplatta/Raft har randvillkoren att betongplattan kan förflyttas och deformeras i tre dimensioner. Det ger olika förutsättningar för sättningarna. I FEM-design bottenplatta/Raft ser dessutom jordlagerföljden som oändligt stor utanför betongplattan vilket medför att jordlagren kan pressas utanför betongplattans ytterkant. Eftersom jordlagerföljden beskrivs genom fjädrar som enbart deformeras i vertikalled kan föregående påstående verka felaktigt. Det som händer är dock att

kraften fördelas mellan fjädrarna utåt i modellen och en skålformad sättningsmodell uppstår.

Resultatet på sättningen från både Plaxis och handberäkningen liknar varandra i både storleksordning och tendenser mellan de olika grundfallen. Skillnaden mellan de två beräkningsmodellerna ligger främst i att Plaxis är ett FEM-program och beräkningarna sker i noder genom hela modellen, medan handberäkningen sker för en punkt i varje sättningsnitt. Det ger att Plaxis är mer avancerat och mer matematiskt exaktare, att handberäkningen ändå liknar Plaxis så pass väl visar att det är en bra överslagsmodell.

FEM-design bottenplatta skiljer sig från de andra två beräkningsmodellerna vilket är väntat då randvillkoren är olika. Att sättningen blir mindre än för Plaxis och handberäkningen beror främst på lastspridningen, se nästa kapitel. FEM-design bottenplatta/Raft ser även betongplattan som hela betongplattan och inte enbart en del av en större yta.

Det är mycket viktigt att definiera rätt randvillkor, det vill säga att vara medveten om vilken del av betongplattan som ska simuleras.

7.3.2 Lastspridningens inverkan på totalsättningen

Lastspridningen beror till stor del på randvillkoren och påverkar sättningen direkt eftersom de olika jordlagren belastas med olika stor laster. Provytan är en del av en mycket större betongplatta, det innebär att lastspridningen från betongplattans egentygnd blir densamma i samtliga punkter då lastspridningen kan sägas ta ut varandra. Provytans mittnitt belastas av 16 stycken punktlaster där lastspridningen från dem är lite mer komplicerat.

I handberäkningen tas lastspridningen från betongplattan helt bort, samtidigt omvandlas de 16 punktlaster till en jämnt utspridd last där lastspridningen tas bort. Det ger ett sammanslaget system utan någon lastspridning vilket innebär för sättningen att alla jordlager belastas av lika stor del av de yttre lasterna.

Lastspridningen i Plaxis liknar den för handberäkningen något. Lastspridningen från betongplattans egentygnd tar ut sig själv och antas därmed vara konstant mot djupet. Däremot placeras en nod under varje punktlast och fördelningen av dem blir inte helt jämn utan varierar lite. Det är dock många punktlaster på en liten yta så skillnaden är inte jättestor men den existerar.

I FEM-design bottenplatta/Raft finns lastspridning vilket gör att jordlagrens nivå får större betydelse för sättningen. Samtidigt omvandlas jordlagerföljden till en fjäderkonstant vilket minskar lastspridningens påverkan på sättningen något.

För Plaxis har lastspridningen liten betydelse för sättningen, den bidrar dock med en viss del. Beräkningsmodellens lastspridning är som sagt minimal i beräkningsfallen. Hade jordlagerföljden fortsatt utanför betongplattan hade lastspridningen haft en stor betydelse för sättningen i ett datorprogram som Plaxis där modellen är byggd mot djupet. Samma företeelse skulle uppstå vid handberäkningen om antagandet att

lastspridningen existerat. Nu finns ingen lastspridning vilket innebär att den inte har någon betydelse för sättningen.

FEM-design bottenplatta/Raft skiljer sig från både Plaxis och handberäkningarna då lastspridningen är en stor del av totalsättningen. Enligt Diagram 7.14 är sättningarna större för fall C och fall D än för fall A och fall B. Det beror främst på att lastspridning, vilket medför att i fall A och fall B tar det mäktiga fyllnadsmaterialet upp större del av de yttre lasterna. I fall C och fall D har inte lastspridningen hunnit minska andelen av den yttre lasten som påverkar lerlagren. Det medför att kraften som påverkar leran i fall C och fall D är större än för leran i fall A och fall B, eftersom fyllnadsmaterialets större mäktighet placerar leran längre ner i jordlagerföljden och därmed minskar påverkan från den yttre kraften.

Lastspridningen påverkar sättningen till stor grad och det är viktigt att vara medveten om hur datorprogrammet beräknar lastspridningen. Lastspridningen har störst inverkan på ett litet fundament med punktlaster i förhållande till en stor betongplatta med utbredd last.

7.3.3 Förändrade randvillkor

För att kontrollera de antaganden som är gjorda varför det är skillnader mellan storleken på sättningarna ändras randvillkoren för beräkningarna i Plaxis. En skillnad mellan Plaxis och FEM-design bottenplatta/Raft är att jordlagerföljden är oändligt stor i horisontalled för FEM-design bottenplatta/Raft. För att kontrollera antagandet simuleras fall A i Plaxis där jordlagerföljden dras 20 meter utanför betongplattans yttre gräns. Resultatet från simuleringen visar att slutsättningen istället blir 0,32 meter vilket bättre överensstämmer med resultatet från FEM-design bottenplatta. Flyttas jordlagerföljden ytterligare utåt kommer slutsättningen att ytterligare närma sig resultatet från FEM – design bottenplatta/Raft.

7.3.4 Sammanställning

- Störst inverkan på resultatet för totalsättningen har lastspridningen och randvillkoren. Lastspridningen påverkar hur stor del av den yttre lasten jordlagren påverkas av. Ett svagare jordlager längre ner i jordmodellen får större inverkan på totalsättningen om det inte finns någon lastspridning.
- Randvillkoren tillsammans med placeringen av betongplattan bestämmer huruvida sättningen sker jämt eller ”skålformat”.
- De teoretiska beräkningsmetoderna påverkar sättningen beroende på om överliggande jordlager påverkar underliggande jordlager som en last.
- Lastspridningen påverkas av hur lasterna är definierade, som punktlaster eller som en utbredd last.

7.4 Beräkningsmodellens inverkan på momentet

Plaxis, FEM-design bottenplatta/Raft, handberäkningen och BE-slab redovisar resultat angående momentkraften i betongplattan. Resultaten från de olika beräkningsmetoderna skiljer sig kraftigt från varandra, se Diagram 7.15, och betydelsen av randvillkor och lastspridning är stor.

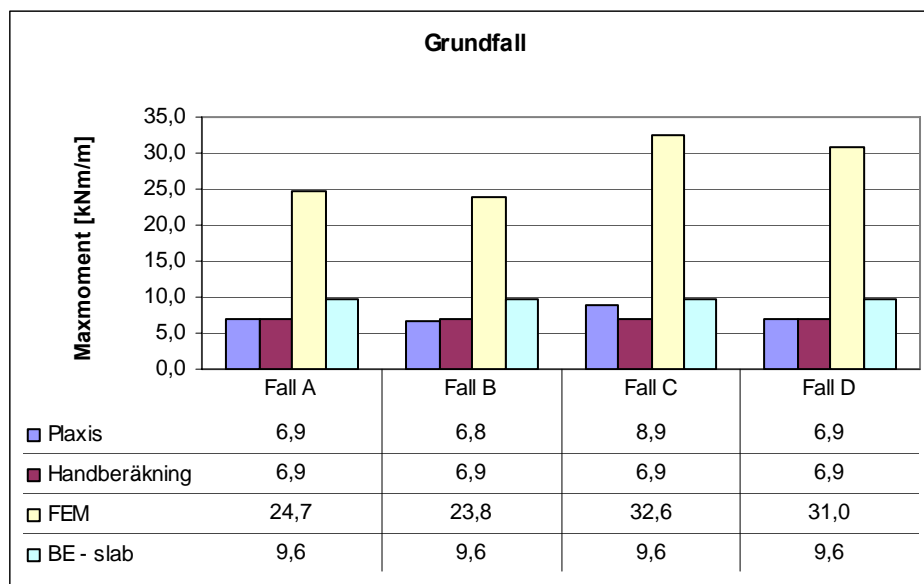


Diagram 7.15 Betongplattans maximala moment för grundfallen

7.4.1 Randvillkorens inverkan på momentet

Betongplattans maximala moment samt momentdiagrammets utseende beror främst på datorprogrammets randvillkor. Som beskrivits i kap 7.3 medför randvillkoren i Plaxis att varken betongplattan eller jordlagerföljden kan förflyttas i horisontalled. Det ger en jämn sättnings i markytan och en minimering av en skålformad sättningsmodell. Det minskar det yttre tvångsmomentet och ett längre moment i betongplattan syns.

Vid handberäkningarna tas ingen hänsyn till jordlagerföljden utan beräkningarna är desamma för alla fyra beräkningsfallen. Handberäkningen har liknande randvillkor som Plaxis vilket syns på de likartade resultaten. Den lilla skillnad som uppstår beror främst på jordlagrens inverkan på betongplattans moment i Plaxis.

I FEM-design bottenplatta/Raft är betongplattan fri att förflytta sig i tre dimensioner medan jordlagerföljdens fjädrar enbart kan deformeras i vertikalled. Det sker dock en lastfördelning mellan fjädrarna i FEM-design bottenplatta/Raft vilket medför en skålformad deformation hos betongplattan. Det medför som tidigare sagts ett yttre tvångsmoment och ett större moment.

I BE-slab är randvillkoren att betongplattan kan förflyttas i vertikalled men inte i horisontalled, bäddmodulen beskriver underlagets styvhet men det är ingen tredje

dimension. Bäddmodulen påverkar dock momentkrafterna och ger att de inte överensstämmer med resultaten från Plaxis och handberäkningen, vilket tyder på osäkerheten i framtagningen av bäddmodulen. BE-slab är ett Boundary elements program, det borde dock inte avspeglas i resultatet utan skillnaden mot Plaxis och handberäkningen beror främst på framtagandet av bäddmodulen.

7.4.2 Lastspridningens inverkan på momentet

Lastspridningens inverkan på resultatet är relativt liten och indirekt genom sättningen. Sättningen påverkas av lastspridningen främst genom hur stor andel av de yttre lasterna som påverkar varje jordmateriallager. Det medför en jämn sättning och det är främst när sättningen får ett skålformat utseende som betongplattans moment påverkas.

7.4.3 Förändrade randvillkor

Den stora skillnaden mellan Plaxis och FEM-design bottenplatta/Raft är förutom att beräkningarna sker för olika antal dimensioner, att jordlagerföljden fortsätter utanför betongplattans yttre kant och därmed andra randvillkor. För att kontrollera realiteten i det antagandet simuleras för fall A i Plaxis att jordlagerföljden fortsätter utanför betongplatta. Vid antagandet att jordlagerföljden slutar 20 meter utanför betongplattan fås ett maximalt moment på 22,6 kNm/m vilket bättre överensstämmer med resultatet från FEM-design bottenplatta/Raft. Om jordlagerföljden dras längre utåt kommer momentkrafterna i Plaxis och FEM-design bottenplatta/Raft närma sig ytterligare. Förutom att värdet på betongplattans maximala moment överensstämmer, liknar även momentdiagrammen varandra, bilaga 13.

7.4.4 Sammanställning

- Datorprogrammets beräkningsteori påverkar betongplattans moment mest genom randvillkoren och huruvida betongplattan kan förflytta sig och därmed hur stora yttre tvångsmoment som uppstår.
- Det är viktigt att ställa upp korrekta randvillkor beroende vilken del av betongplattan som beräknas.

7.5 Tidsberoende sättningar

De tidsberoende sättningarna har beräknats i Plaxis och genom handberäkningar. Sättningskurvornas form är lika i båda beräkningarna och för alla grundfallen. Däremot påverkar slutsättningen exponentialfunktionens amplitud.

För handberäkningen är den procentuella sättningen per år lika för de fyra grundfallen. Det ger att fall A och B där sättningen är större än för C och D, har större amplituder i sina sättningskurvor.

Den stora skillnaden i tidsättningarna mellan handberäkningarna och Plaxis är att slutsättningen sker tidigare enligt Plaxis. Det beror på att Plaxis räknar med en snabbare portryckssänkning än handberäkningen och därmed även en högre sättningshastighet. Plaxis antar även att konsolideringssättningarna från fyllnadsmaterialet är klara innan de yttre lasterna belastar beräkningsfallen.

Ytterligare påverkas även totalsättningen av krypsättningar som ger en större slutsättning. Det har dock inte behandlas i denna rapport.

8 Slutsats

- Indelning av jordlager i inre skikt är viktigast vid stora variationer i jordmaterialparametrarna. Dock är indelningen av jordlager i inre skikt av stor betydelse för resultatet och bör eftersträvas, eftersom det ger ett mer troligt resultat.
- Det svagaste jordlagret, i det här fallet leran, har störst betydelse för sättningen och momentet i betongplattan. Variationer i parameteregenskaper ger stora skillnader på resultaten och bör undersökas väl.
- Det är mycket viktigt att definiera rätt randvillkor, det vill säga att använda ett datorprogram som kan simulera de omständigheter som råder.
- Fyllnadsmaterialets mäktighet har stor betydelse på slutsättningen och påverkar sättningen både genom sin egentyngd samt vid beräkningar med lastspridning. Fyllnadsmaterialet påverkar betongplattans moment främst genom att det utjämnar markytans differenssättningar.
- Vid liten mäktighet på fyllnadsmaterialet är det viktigt att datorprogrammet beaktar lerans egenskaper.
- Reduktion av fyllnadsmaterialets elasticitetsmodul ger en liten förändring på betongplattans moment och sättning.
- Beräkningsmodellen bör byggas upp efter hur säkert resultat som eftersträvas.
- Lastspridningen påverkar sättningen till stor grad och det är viktigt att vara medveten om hur datorprogrammet beräknar lastspridningen. Lastspridningen har störst inverkan på ett litet fundament med punktlaster i förhållande till en stor betongplatta med utbredd last.
- Det är viktigt för användaren att ha en övergripande insikt hos både datorprogrammet och jordmaterialegenskaper, så att simuleringsmodellen byggs upp med korrekta randvillkor och med väl avvägda jordmaterialparametrar.

Litteraturförteckning

Backland Margareta, Edberg Gösta, Rubin Lennart mfl. (1948) *Handboken Geoteknik*, Liber Tryck, Stockholm

Bergdahl Ulf, Ottosson Elvin, Stigson Malmborg Bo, (1993), *Plattgrundläggning*, Tryckeri Balder AB, Stockholm

Bergfeldt Allan, (1997), Kapitelnamn ur *Göteborgs geotekniska*, SGF publikation, Mediaprint, Uddevalla

Brinkgreve R.B.J, (2002), *Plaxis Finite element code for soil and rock analyses*, A.A. Balkema Publishers, Nederländerna

Hartmann Friedel, (1989), *Introduction to Boundary Elements*, Springer-Verlag, Berlin Tyskland

Larsson Rolf, (1994), *Deformationsegenskaper i jord*, institutionen för geoteknik Chalmers tekniska högskola

Marshak Stephen, (2001), *Earth, portrait of a planet*, Norton & Company inc, New York United States of America, 1:a upplagan

Samuelsson Alf, Wiberg Nils-Erik, (1995), *Byggnadsmekanik, Strukturmekanik*, Studentlitteratur, Lund, 2:a upplagan

Sällfors Göran, (2001), *Geoteknik, jordmateriallära – jordmekanik*, 3:e upplagan

Skredkommissionen, (1995), *Anvisningar för släntstabilitet*, Rapport 3:95, Roland Offset, Linköping

Rapporter

Väg Verket, (1994), *Jords hållfasthets- och deformationsegenskaper*

Ramböll Sverige, (2001-08-16), *Skandiahammen Södra kajen, Sammanfattning av beräkningar geoteknik*

Ramböll Sverige, (2002-09-04), *Förstärkning Södra kajen Skandiahammen, metodik för bestämning av laster för statiska beräkningar*

Ramböll Sverige, *Sprickor i Baseportplattan*

Elektroniska källor

<http://www.bem.uni-stuttgart.de/home.htm> (2005-12-20)

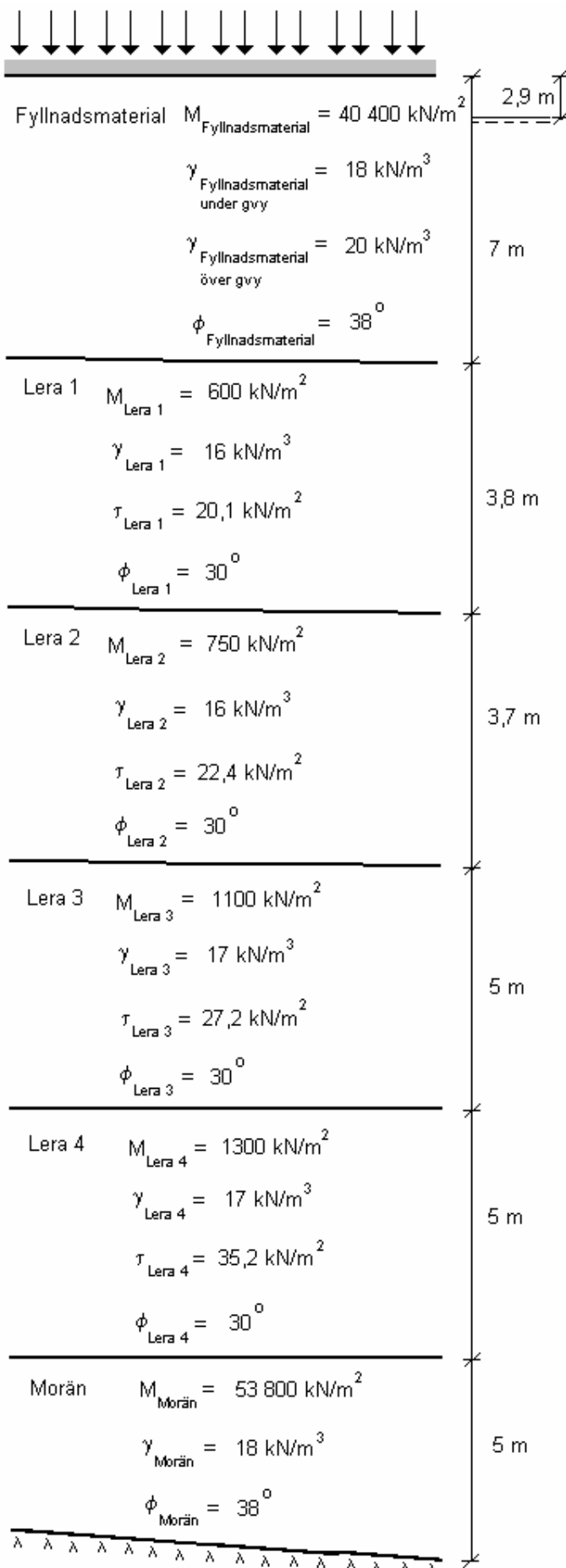
Artiklar

Carl Jonsson, Bygg & Teknik 2/97, *Dimensionering vid grundläggning med hel bottenplatta*

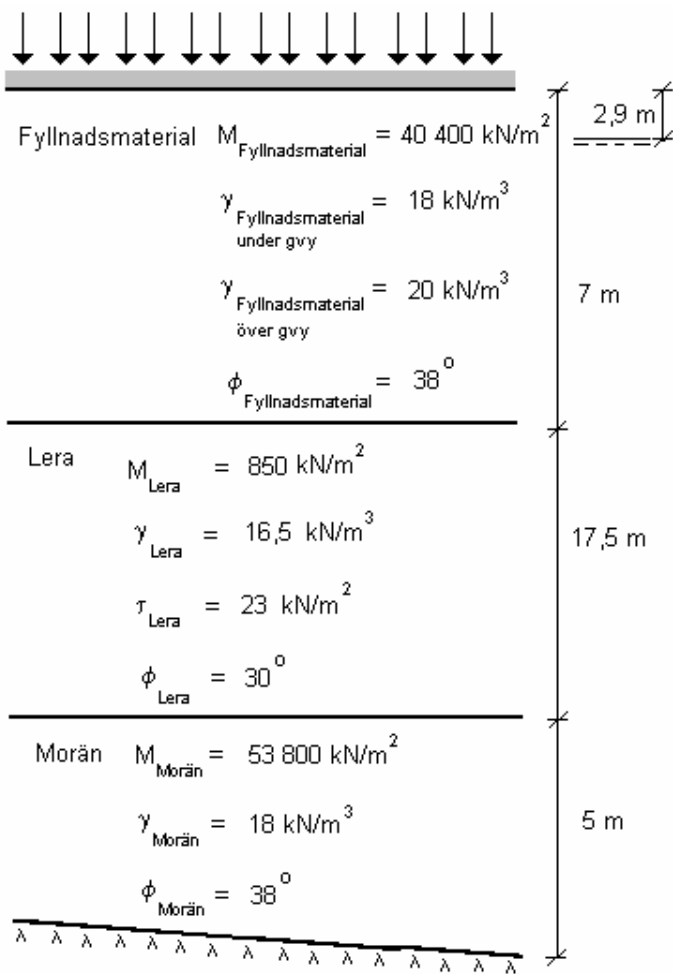
Bilagor

Sammanställning CRS – försök

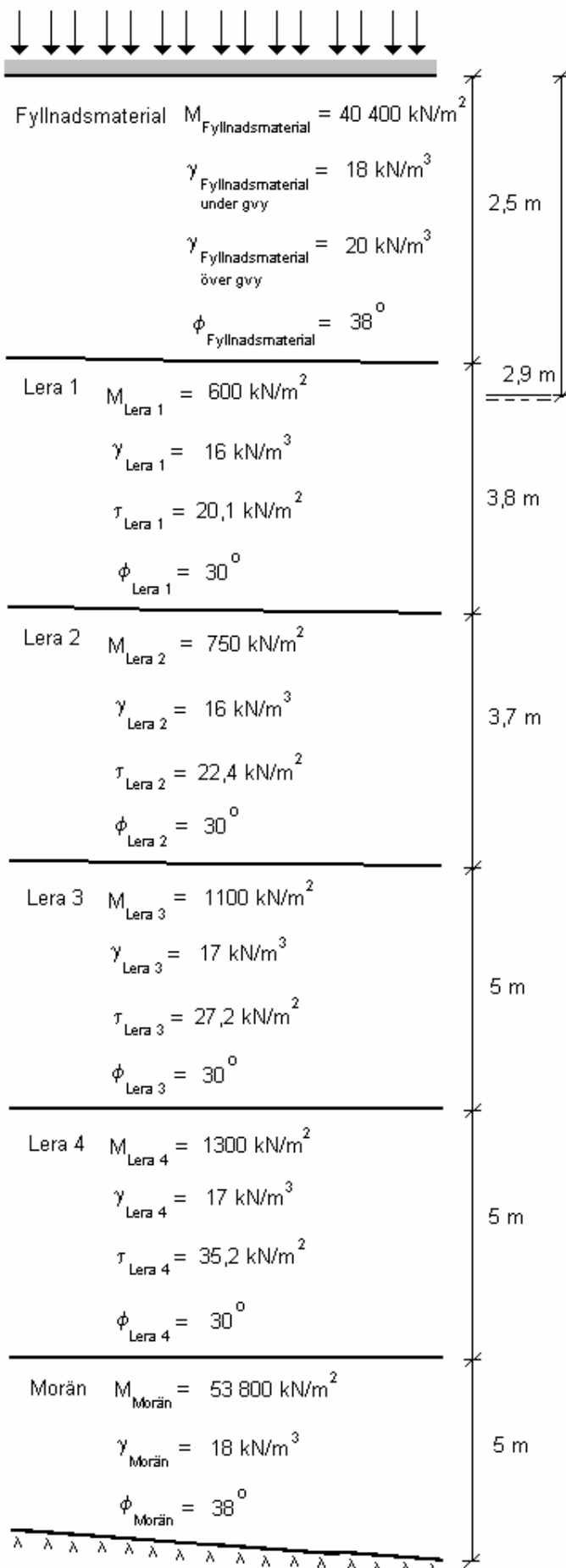
Borrhål	Djup	Densitet	Vattenkvot	σ'_c	M_L	σ'_L	M'	c_v	k_i	β_k
Borrhål 2	9,0	1,56	77	72	617	106	8,4	4,4E-08	1,3E-09	3,4
	13,0	1,59	67	117	780	171	11,5	2,4E-08	5,9E-10	3,1
	17,0	1,67	60	129	1311	205	15,2	3,4E-08	7,0E-10	4,3
Borrhål 11	15,0	1,52	77	94	1067	152	13,2	5,0E-08	7,2E-10	2,0
	17,0	1,60	70	166	700	193	10,9	5,6E-08	1,1E-09	5,0
	20,0	1,61	62	173	936	224	12,0	3,0E-08	5,0E-10	2,6
Borrhål 12	9,0	1,58	69	86	1080	156	9,3	4,0E-08	6,5E-10	2,7
	13,0	1,57	73	96	769	144	9,5	2,9E-08	1,0E-09	3,9
	22,0	1,72	56	185	1213	248	14,0	3,4E-08	5,6E-10	3,8



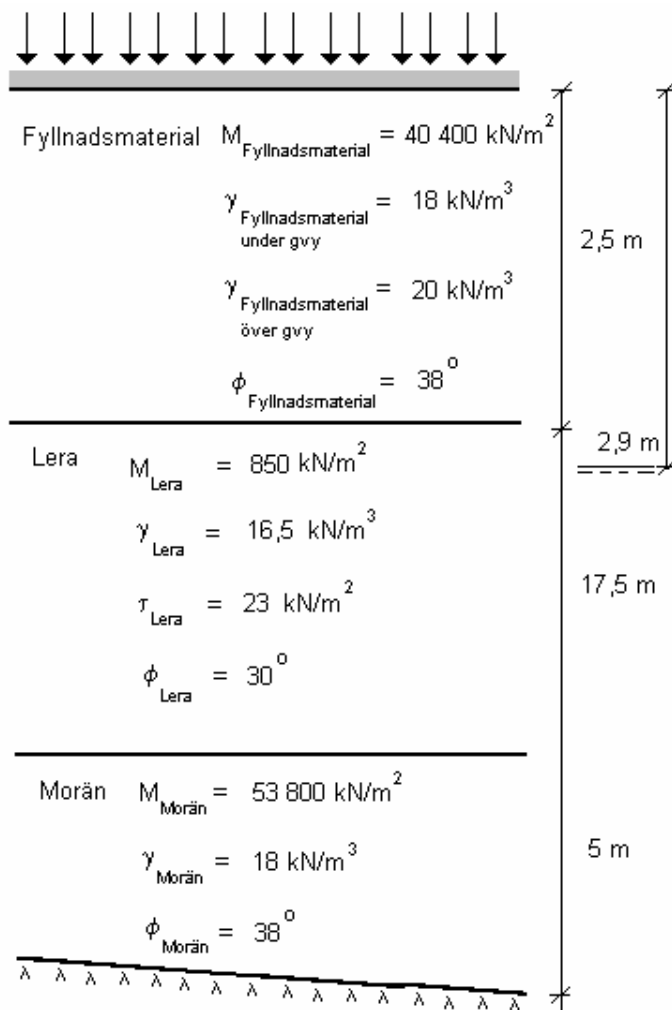
Schematisk bild grundfall A
Ingående materialparametrar



Schematisk bild grundfall B
Ingående materialparametrar

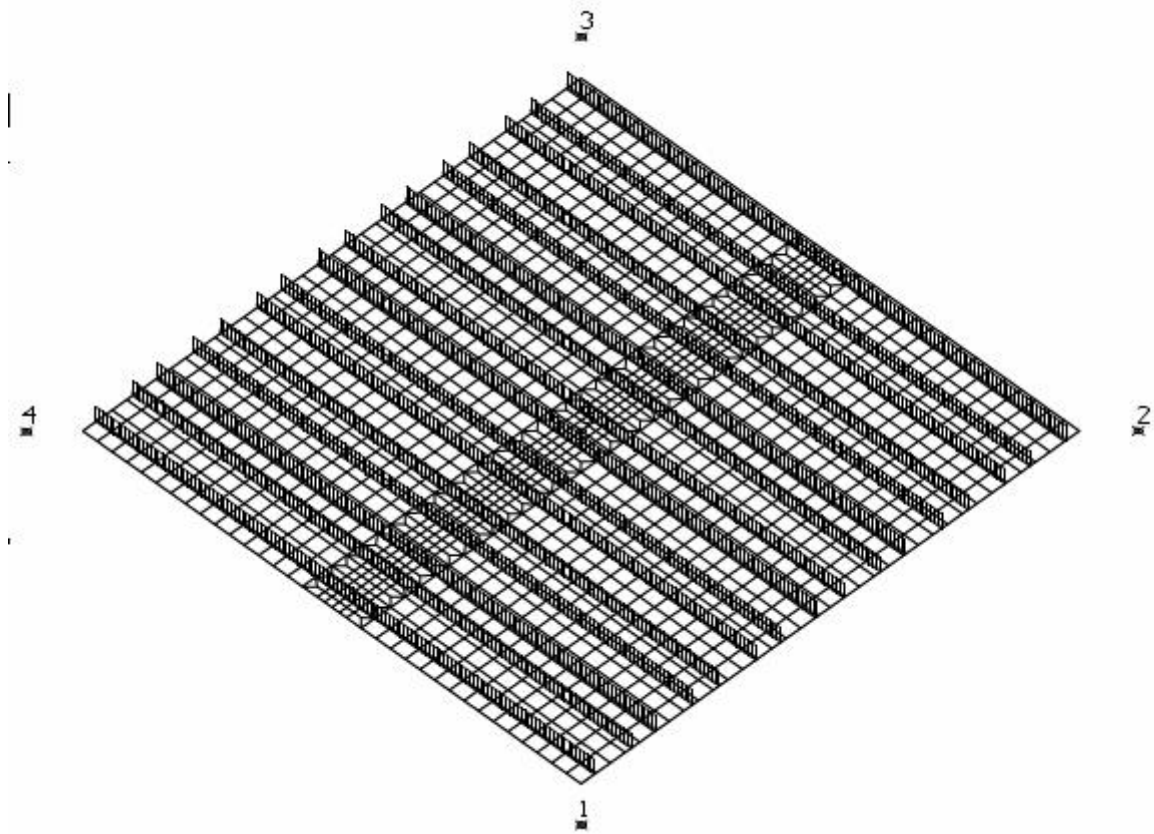


Schematisk bild grundfall C
Ingående materialparametrar



Schematisk bild grundfall D
Ingående materialparametrar

Schematisk figur beräkningsmodell
FEM – design bottenplatta/Raft



Materialparametrar i Plaxis för grundfallen

	Parameter	Fall A och Fall C	Fall B och Fall D	Enhet
Fyllning	$\gamma_{\text{över}}$	18	18	kN/m ³
	γ_{under}	20	20	kN/m ³
	k_x	1	1	m/dag
	k_y	1	1	m/dag
	E_{ref}	30 000	30 000	kN/m ²
	ν	0,3	0,3	
	c_{ref}	1	1	kN/m ²
	φ	38	38	°
	ψ	6	6	°
	R_{inter}	0,67	0,67	
Lera 1	$\gamma_{\text{över}}$	16	16,5	kN/m ³
	γ_{under}	16	16,5	kN/m ³
	k_x	0,00007	0,00007	m/dag
	k_y	0,00007	0,00007	m/dag
	E_{oed}	600	850	kN/m ²
	ν	0,35	0,35	
	c_{ref}	2,01	2,3	kN/m ²
	φ	30	30	°
	ψ	0	0	°
	R_{inter}	0,67	0,67	
Lera 2	$\gamma_{\text{över}}$	16	---	kN/m ³
	γ_{under}	16	---	kN/m ³
	k_x	0,00007	---	m/dag
	k_y	0,00007	---	m/dag
	E_{oed}	750	---	kN/m ²
	ν	0,35	---	
	c_{ref}	2,24	---	kN/m ²
	φ	30	---	°
	ψ	0	---	°
	R_{inter}	0,67	---	

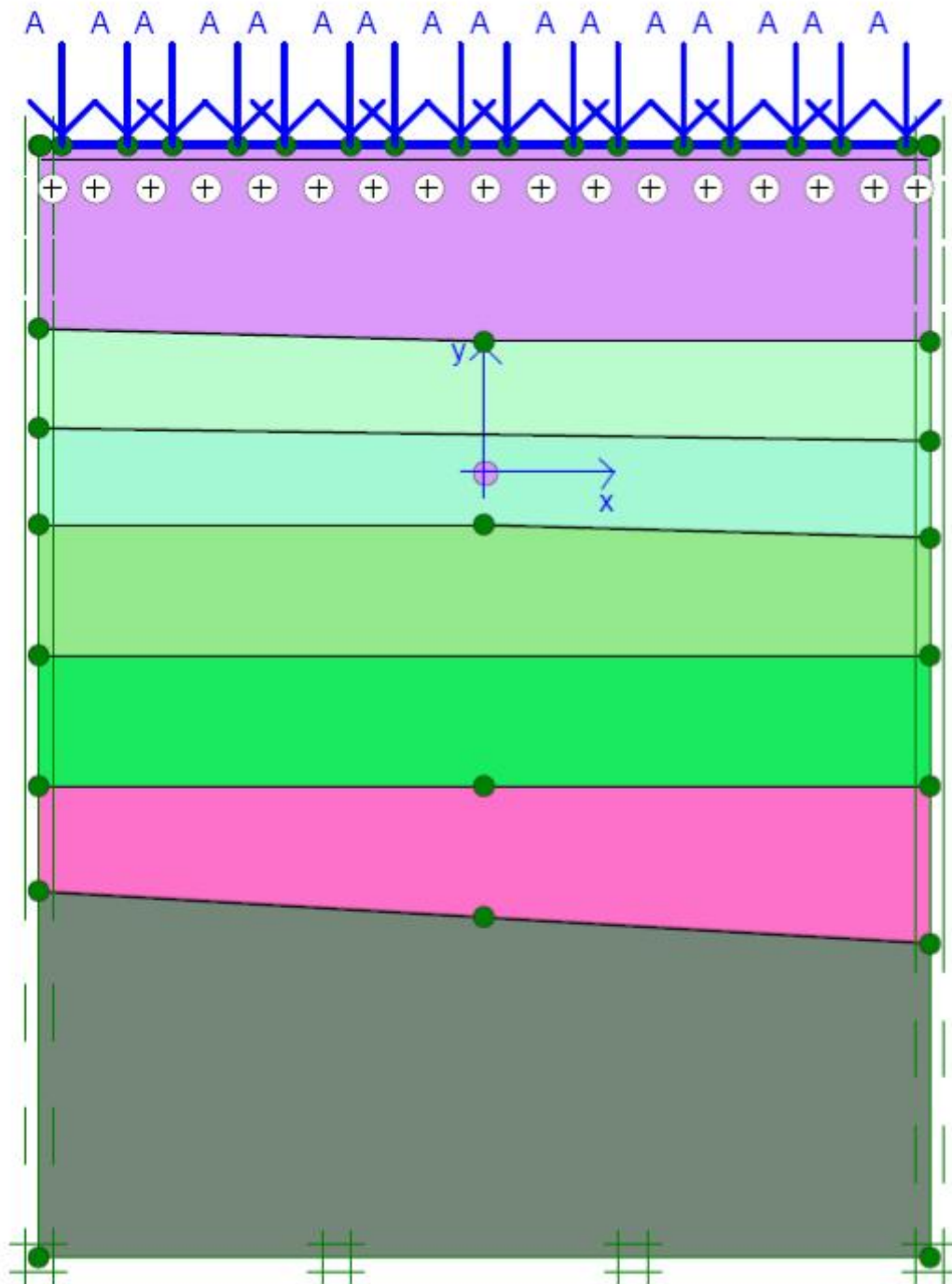
Lera 3	Y _{över}	17	---	kN/m ³
	Y _{under}	17	---	kN/m ³
	k _x	0,00007	---	m/dag
	k _y	0,00007	---	m/dag
	E _{oed}	1100	---	kN/m ²
	v	0,35	---	
	C _{ref}	2,72	---	kN/m ²
	φ	30	---	°
	ψ	0	---	°
	R _{inter}	0,67	---	

Lera 4	Y _{över}	17	---	kN/m ³
	Y _{under}	17	---	kN/m ³
	k _x	0,00007	---	m/dag
	k _y	0,00007	---	m/dag
	E _{oed}	1300	---	kN/m ²
	v	0,35	---	
	C _{ref}	3,52	---	kN/m ²
	φ	30	---	°
	ψ	0	---	°
	R _{inter}	0,67	---	

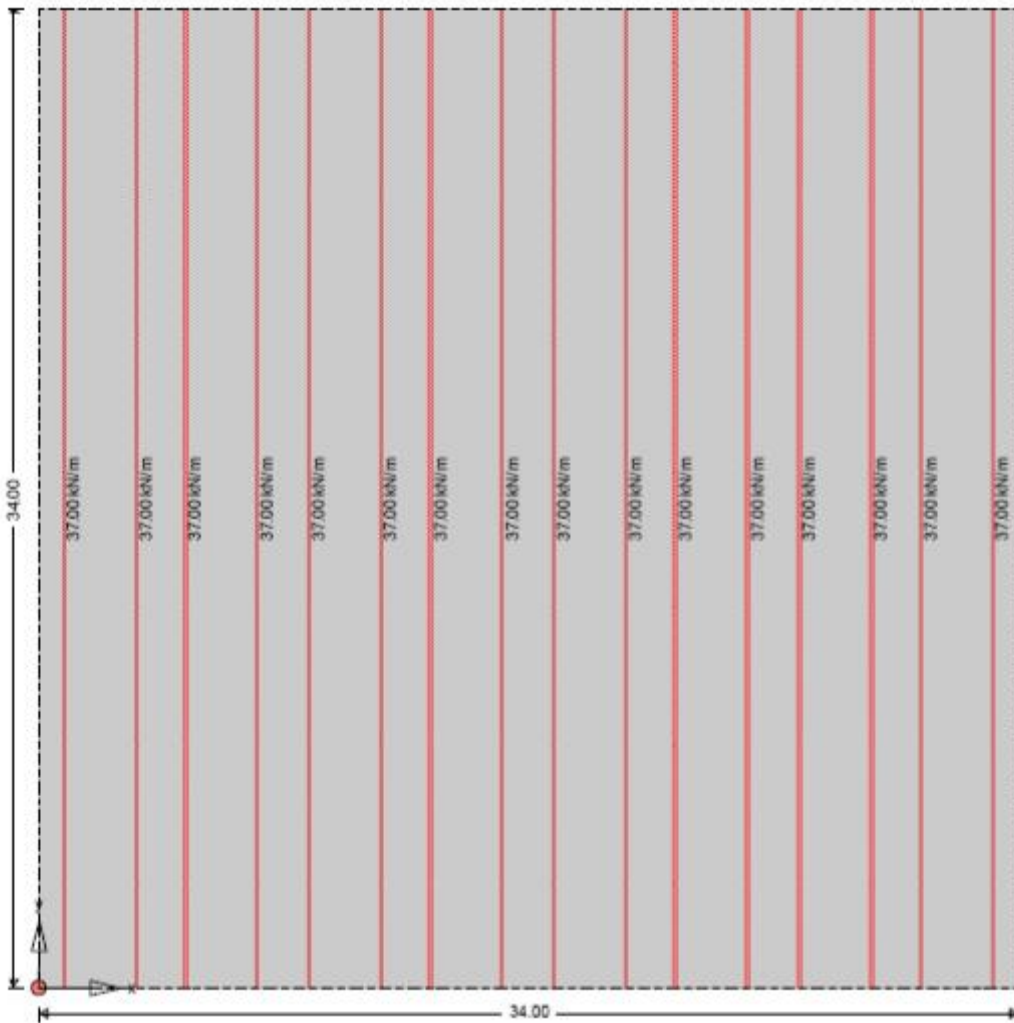
Morän	Y _{över}	18	18	kN/m ³
	Y _{under}	20	20	kN/m ³
	k _x	1	1	m/dag
	k _y	1	1	m/dag
	E _{ref}	40 000	40 000	kN/m ²
	v	0,3	0,3	
	C _{ref}	1	1	kN/m ²
	φ	38	38	°
	ψ	6	6	°
	R _{inter}	0,67	0,67	

Berg	Y _{över}	28	28	kN/m ³
	Y _{under}	28	28	kN/m ³
	k _x	10	10	m/dag
	k _y	10	10	m/dag
	E _{ref}	100 000 000	100 000 000	kN/m ²
	v	0,4	0,4	

Schematisk figur beräkningsmodell Plaxis



Schematisk figur beräkningsmodell
BE – slab

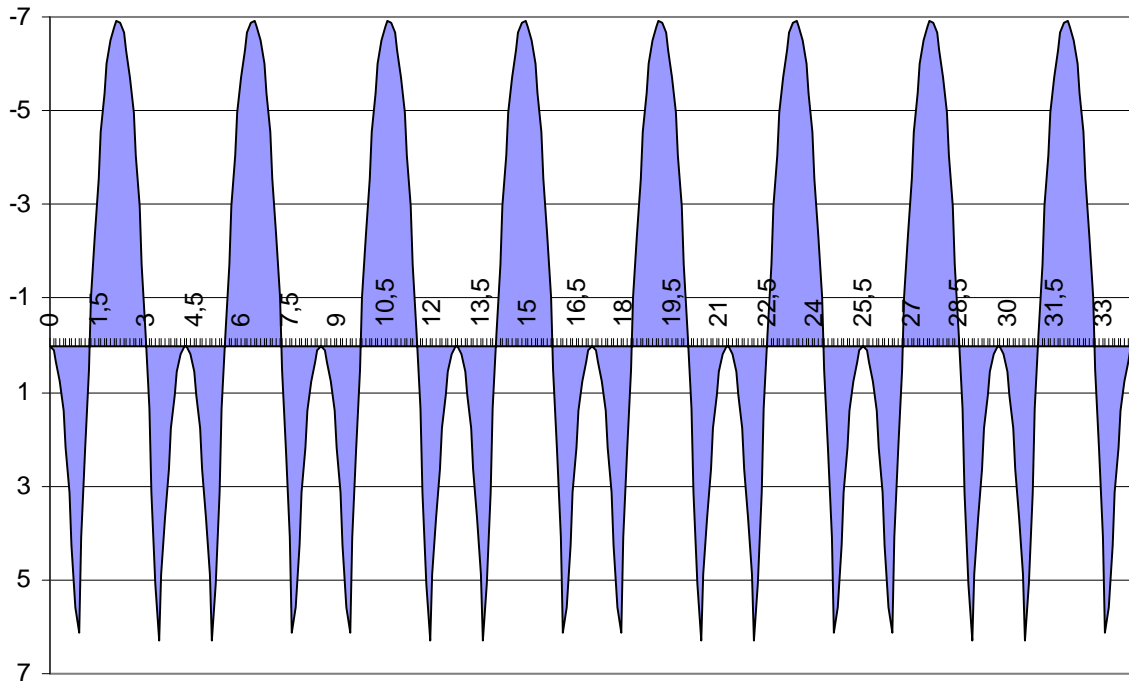


Materialparametrar känslighetsanalys

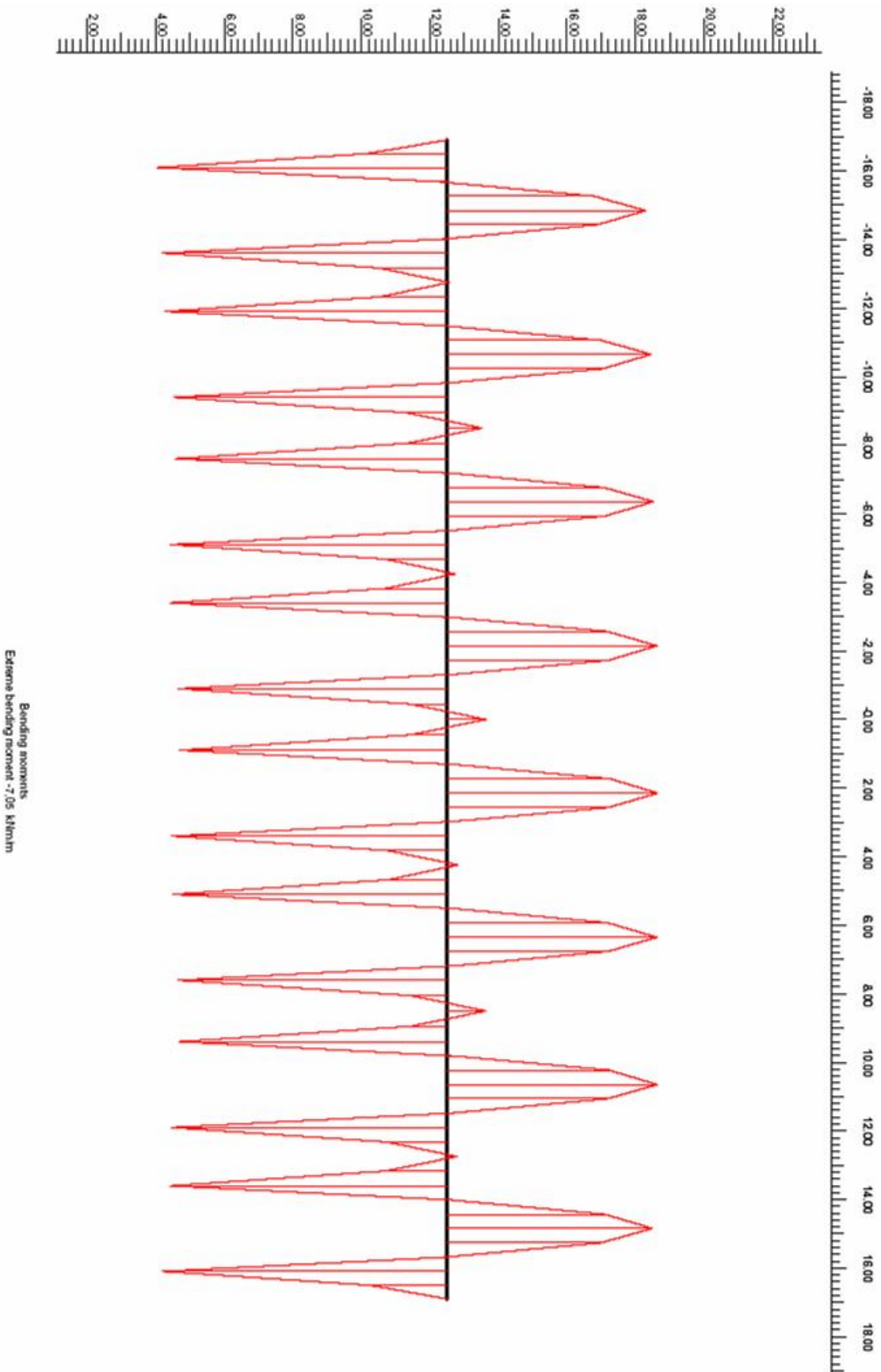
	Ökning av lerans kompressionsmodul med 25 % [kN/m ²]		Minskning av lerans kompressionsmodul med 25 % [kN/m ²]	
	Fall A och Fall C	Fall B och Fall D	Fall A och Fall C	Fall B och Fall D
Lera 1	750	1063	450	638
Lera 2	938	---	563	---
Lera 3	1375	---	825	---
Lera 4	1625	---	975	---

Dåligt fyllnadsmaterial	26 900	kN/m ²
-------------------------	--------	-------------------

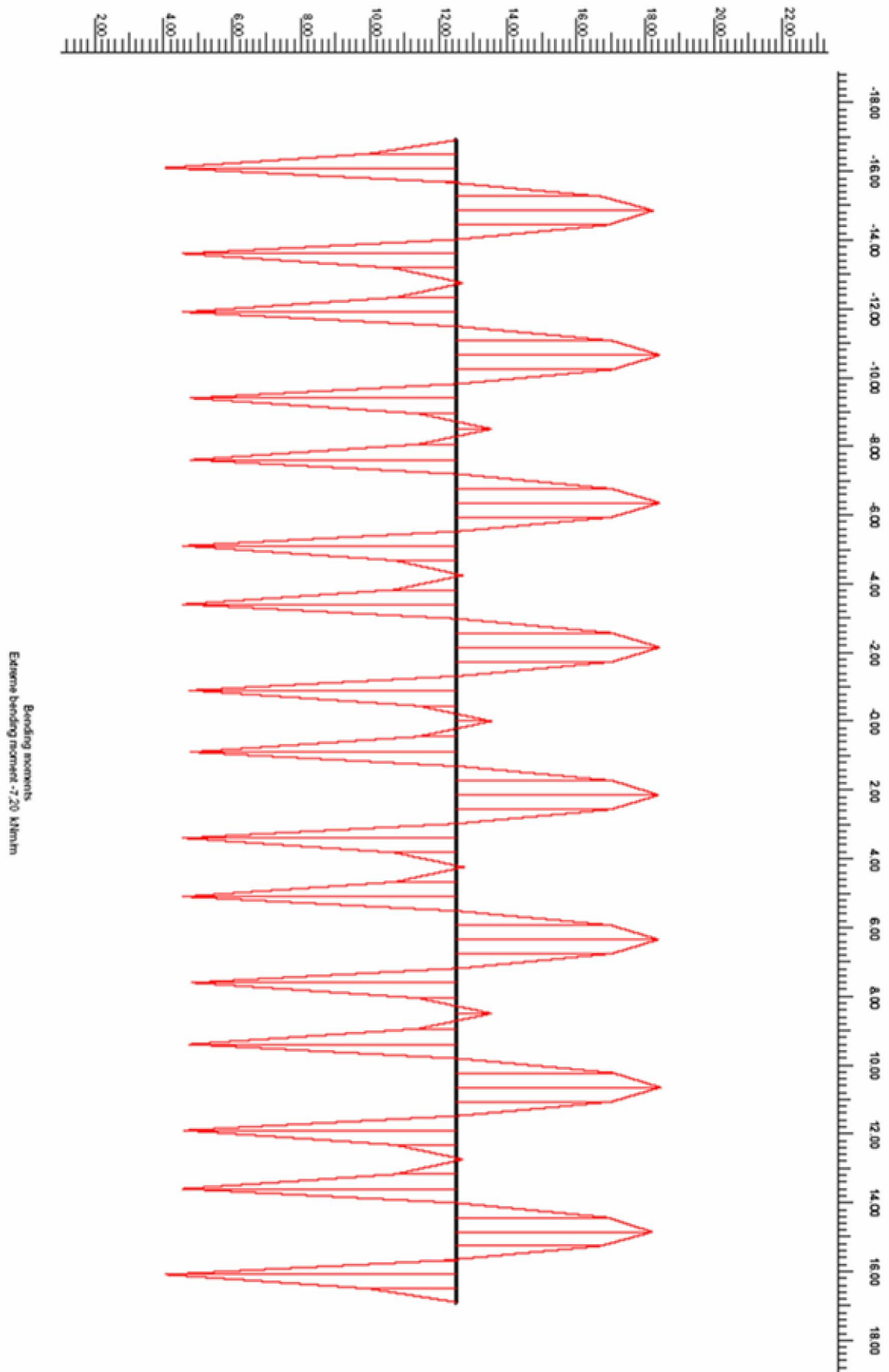
Momentdiagram handberäkning



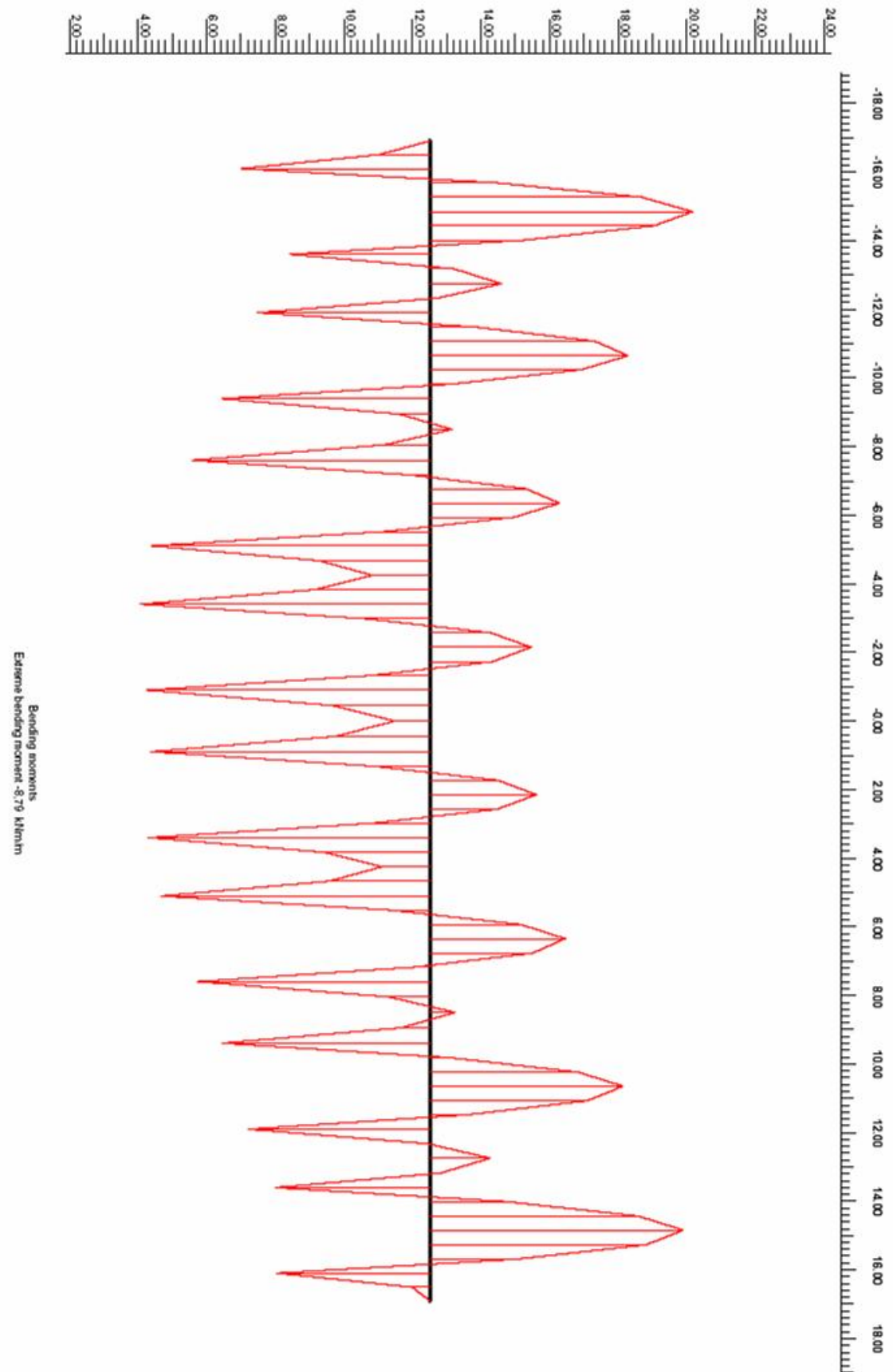
Plaxis
Momentdiagram grundfall A



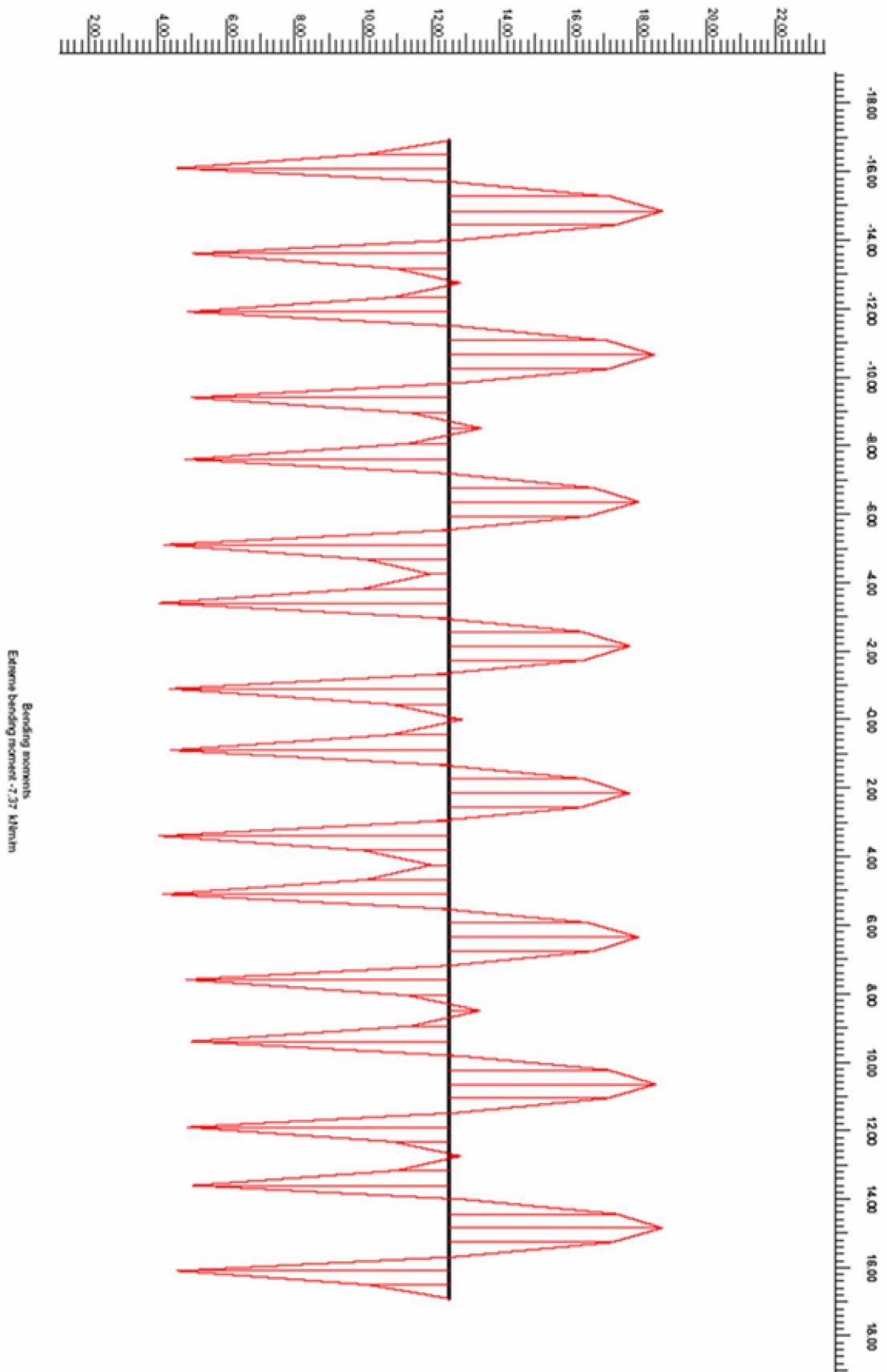
Plaxis
Momentdiagram grundfall B



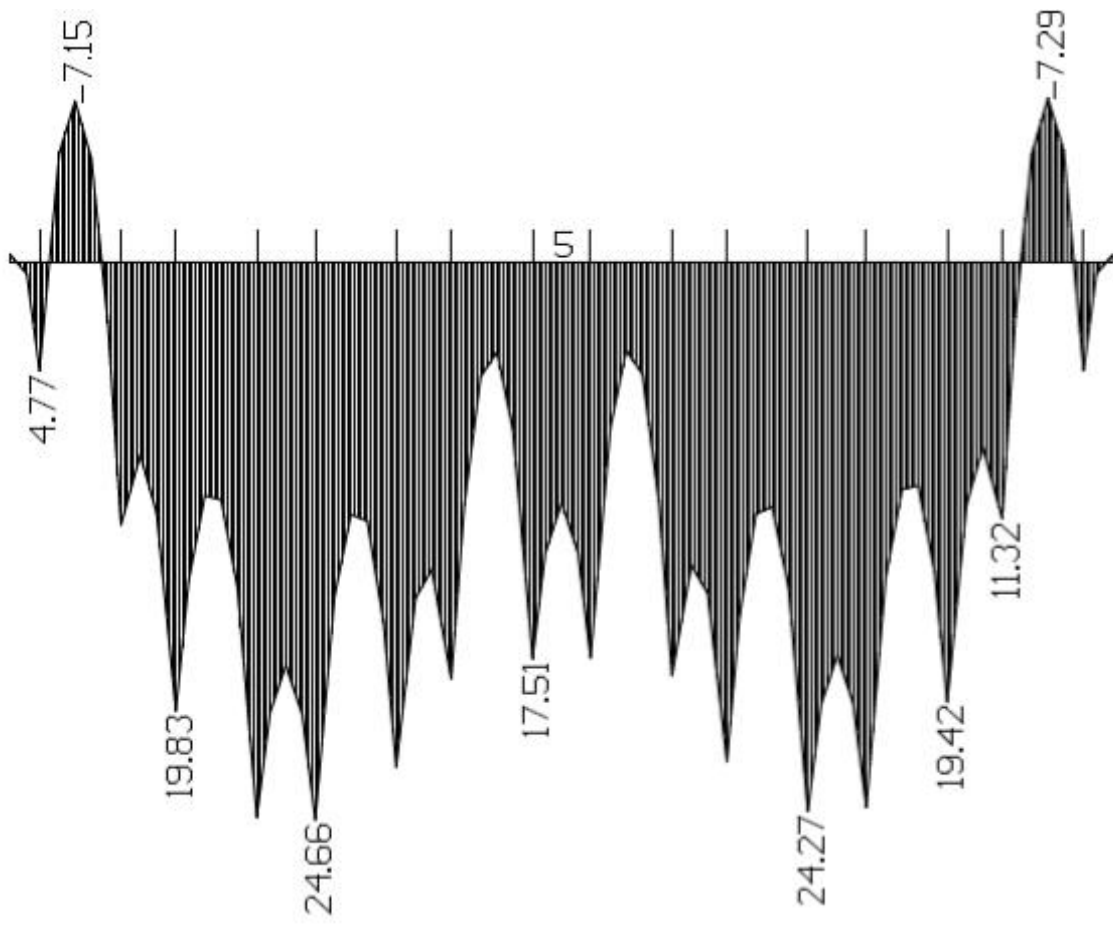
Plaxis
Momentdiagram grundfall C



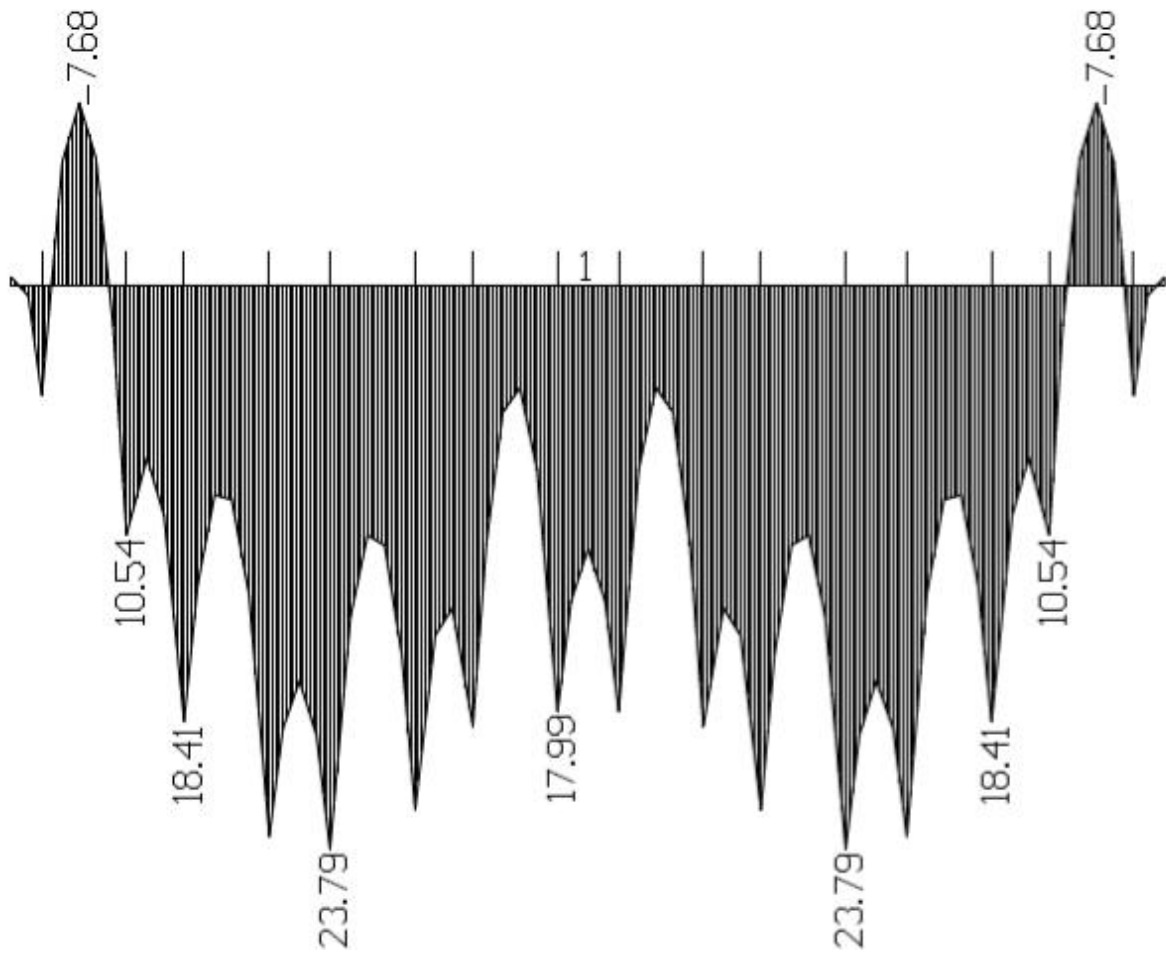
Plaxis
Momentdiagram grundfall D



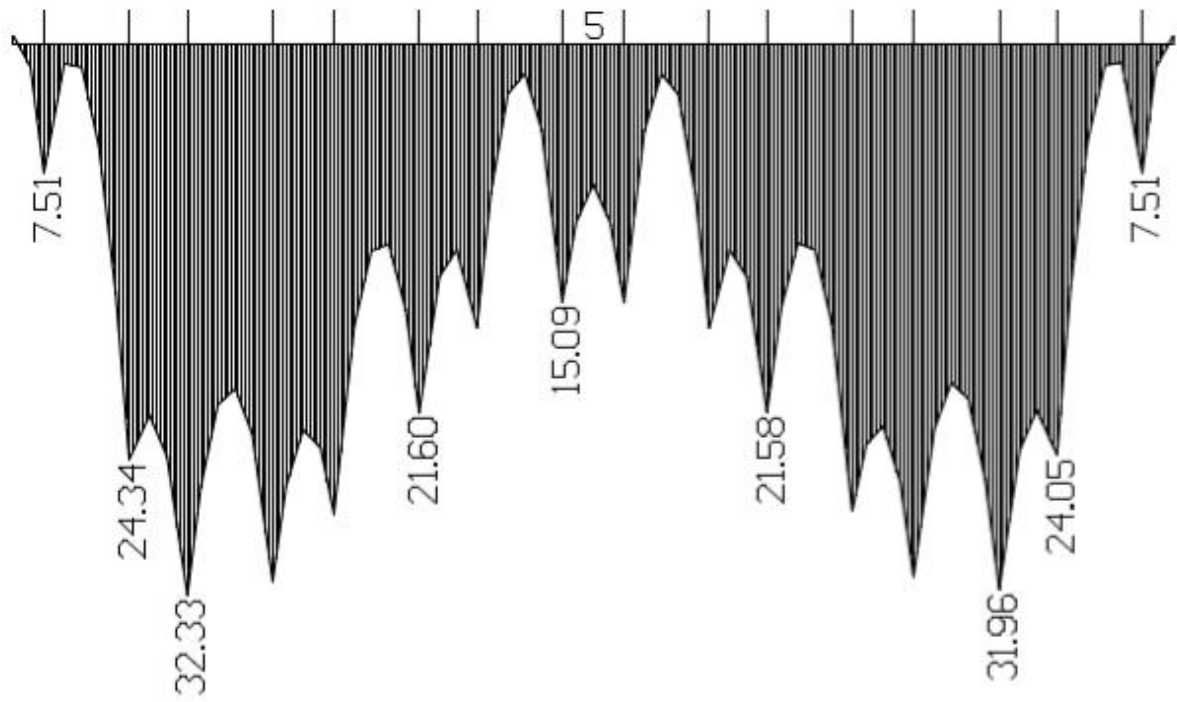
FEM – design bottenplatta/Raft
Momentdiagram grundfall A
Mittskikt



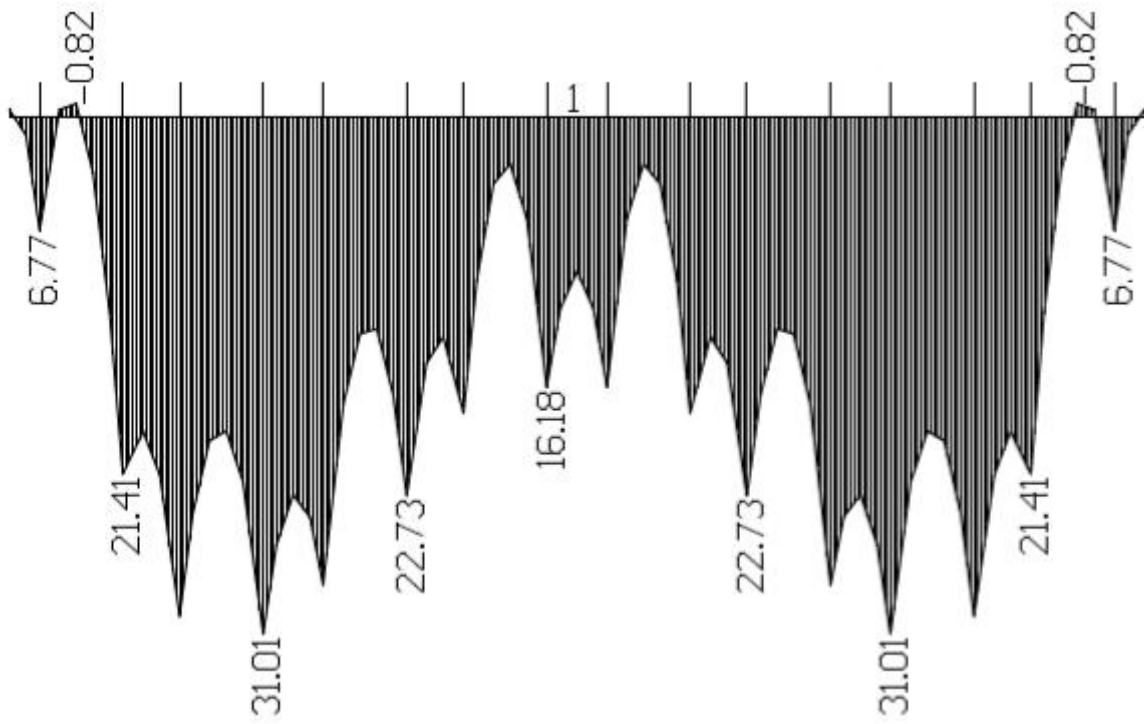
FEM – design bottenplatta/Raft
Momentdiagram grundfall B
Mittskikt



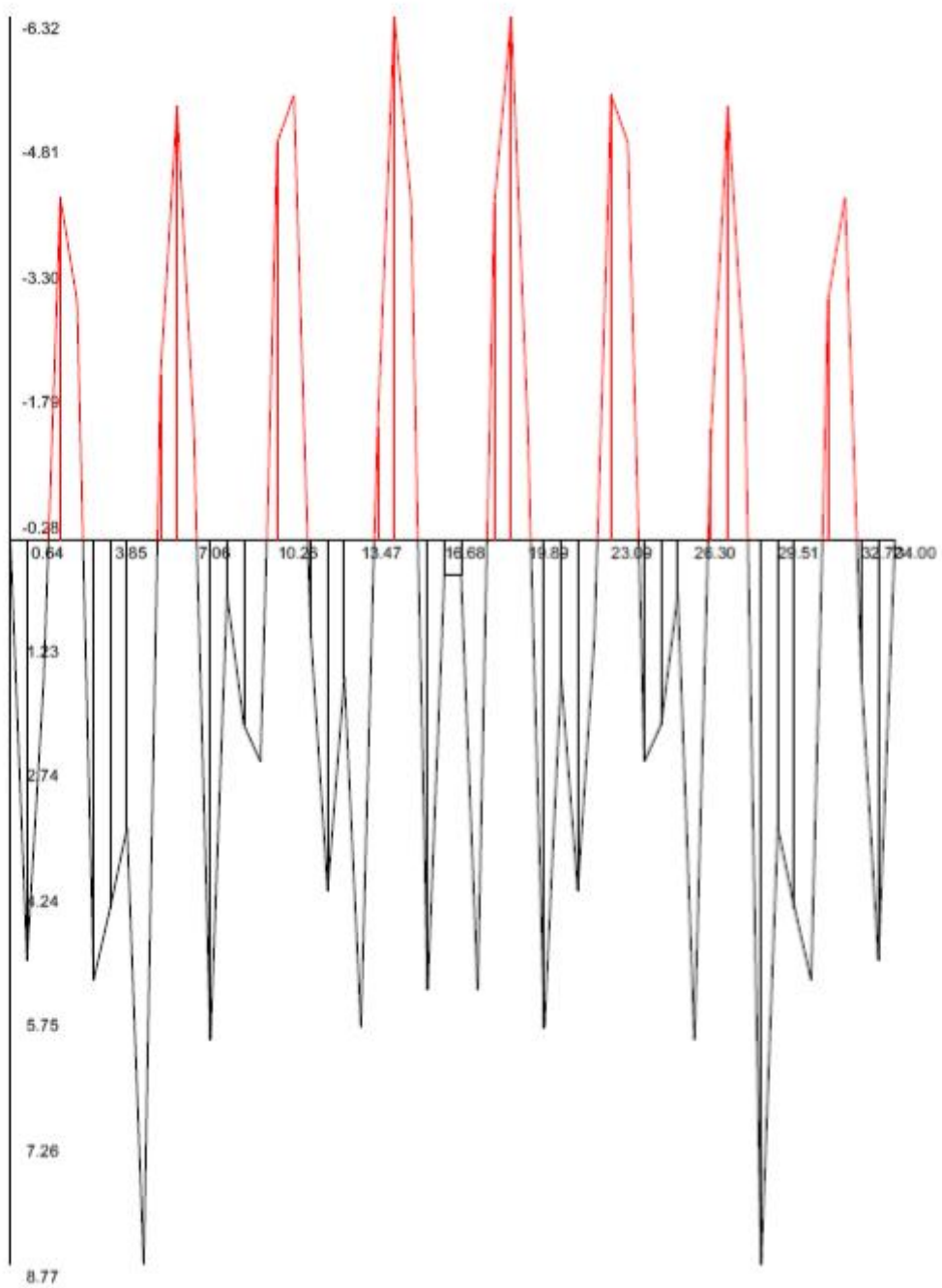
FEM – design bottenplatta/Raft
Momentdiagram grundfall C
Mittskikt



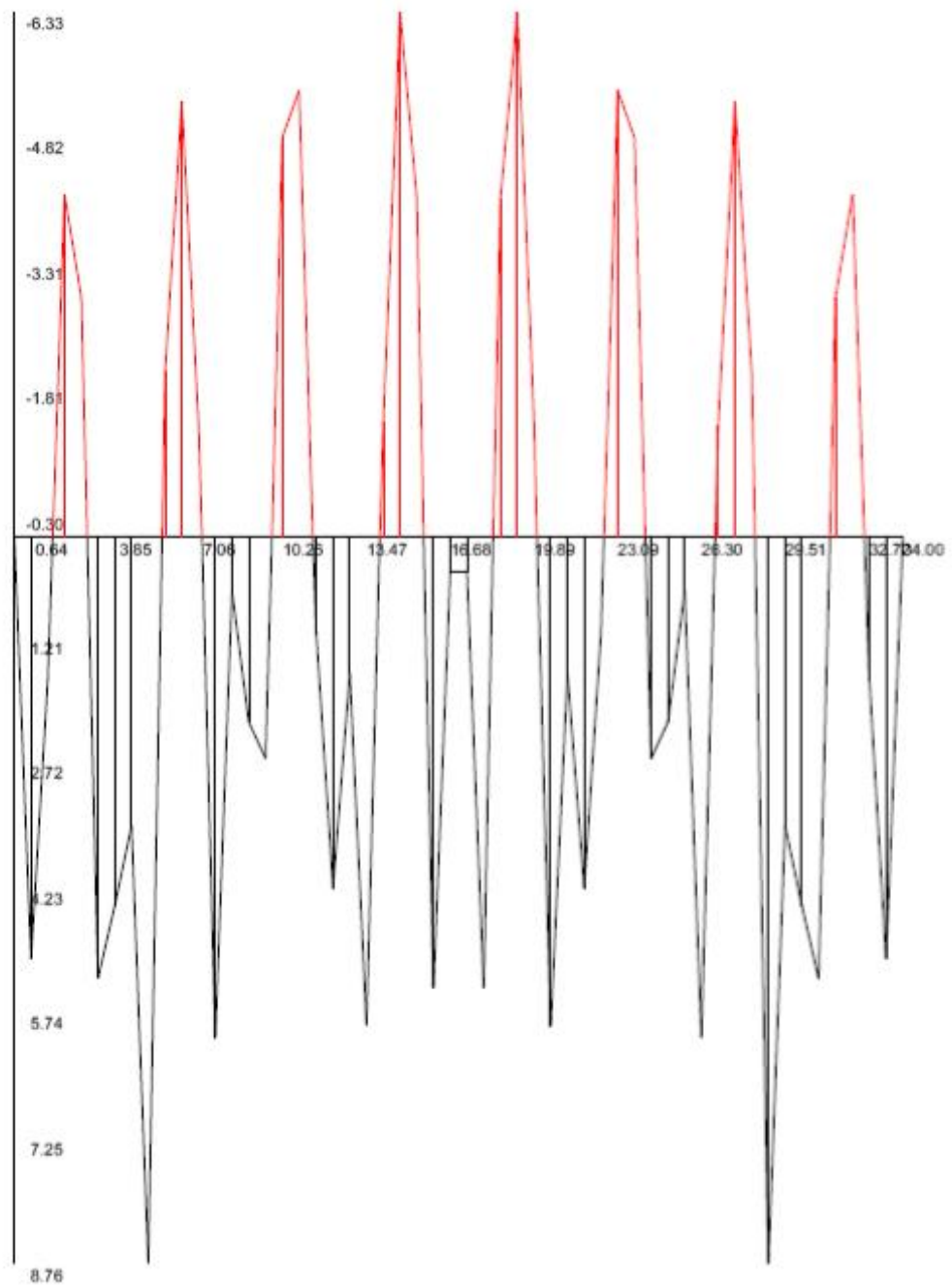
FEM – design bottenplatta/Raft
Momentdiagram grundfall D
Mittskikt



BE - slab
Momentdiagram grundfall A
Mittskikt

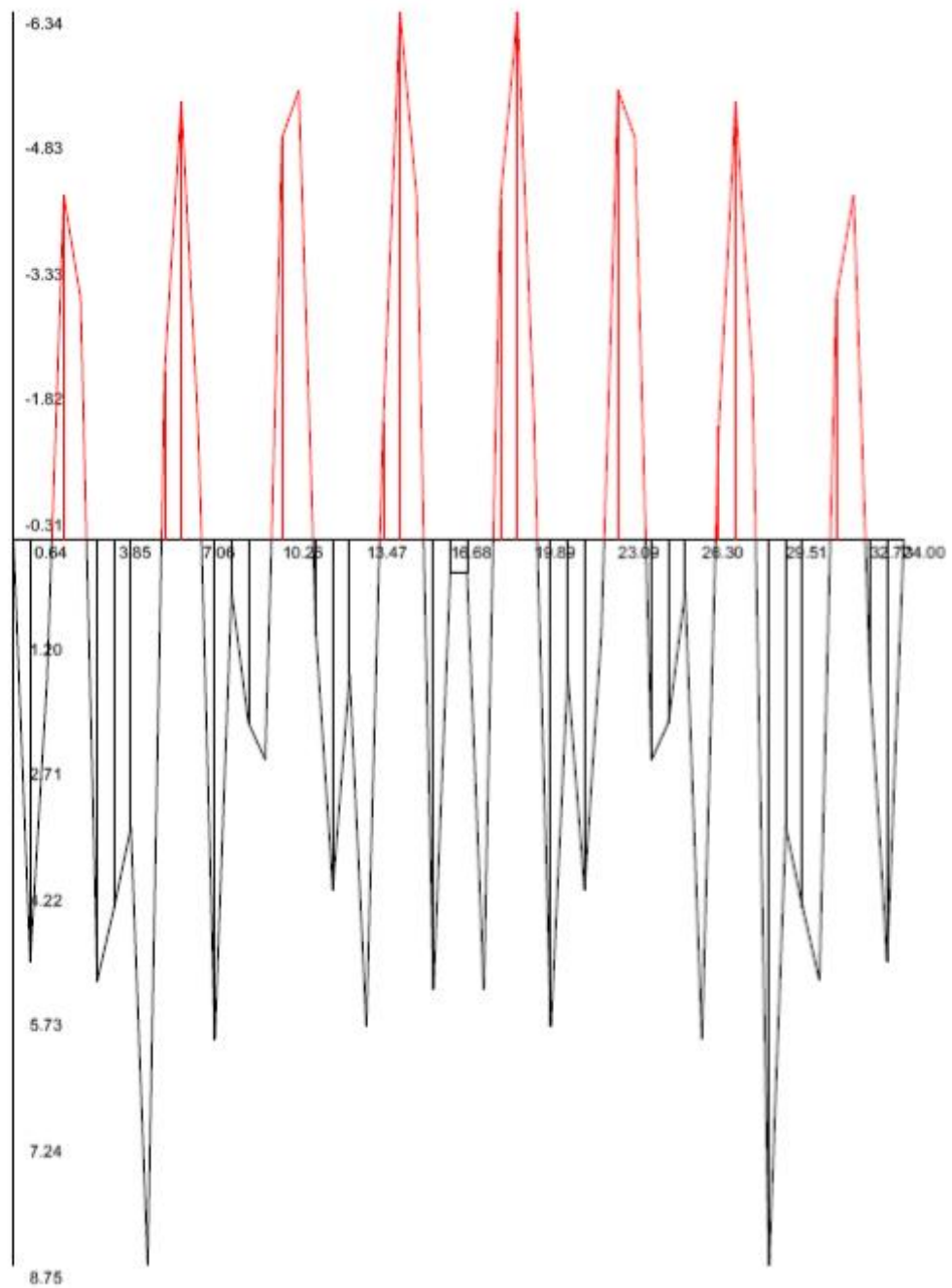


BE - slab
Momentdiagram grundfall B
Mittskikt



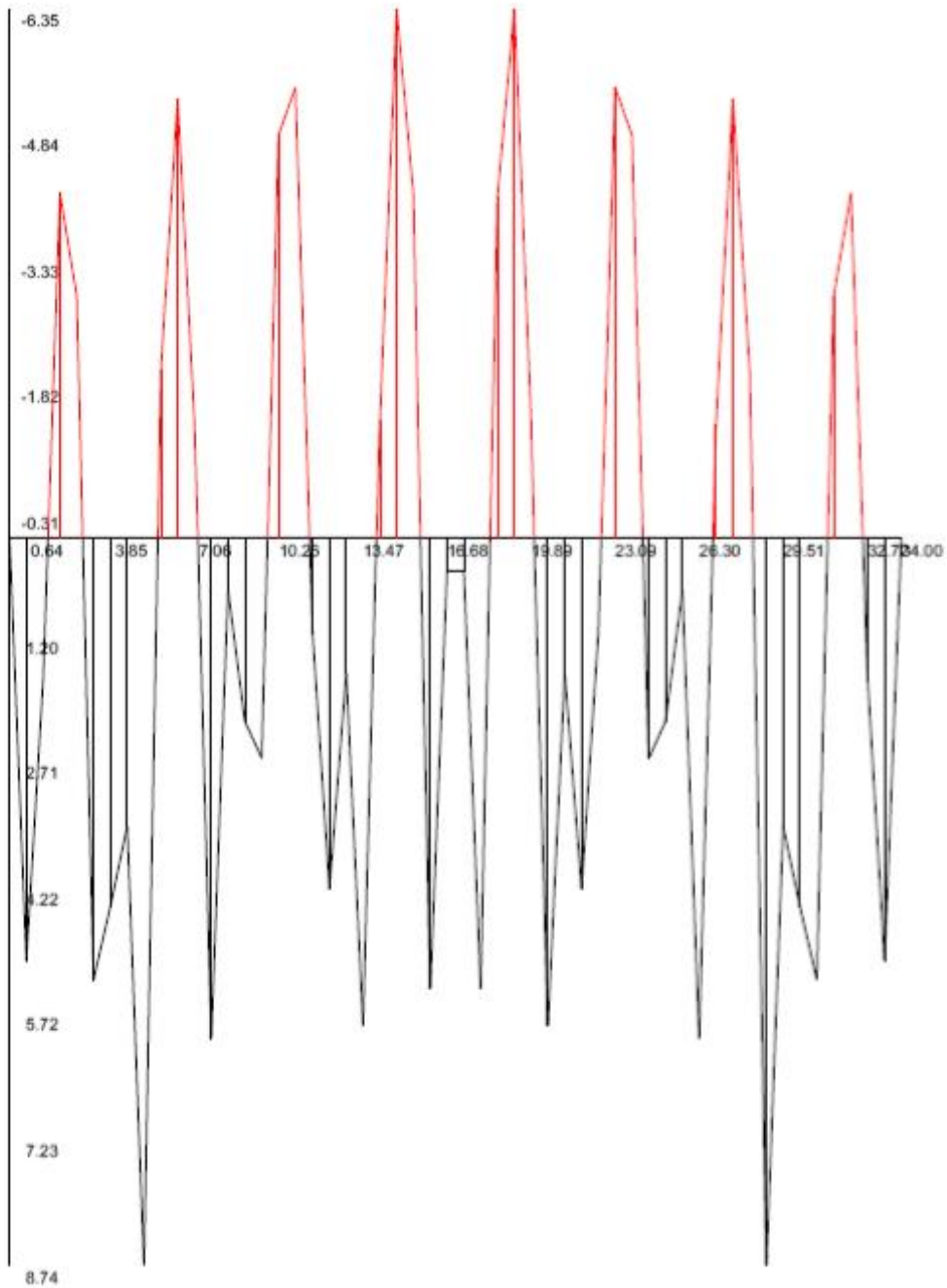
Bilaga 11: 3 (4)

BE - slab
Momentdiagram grundfall C
Mittskikt

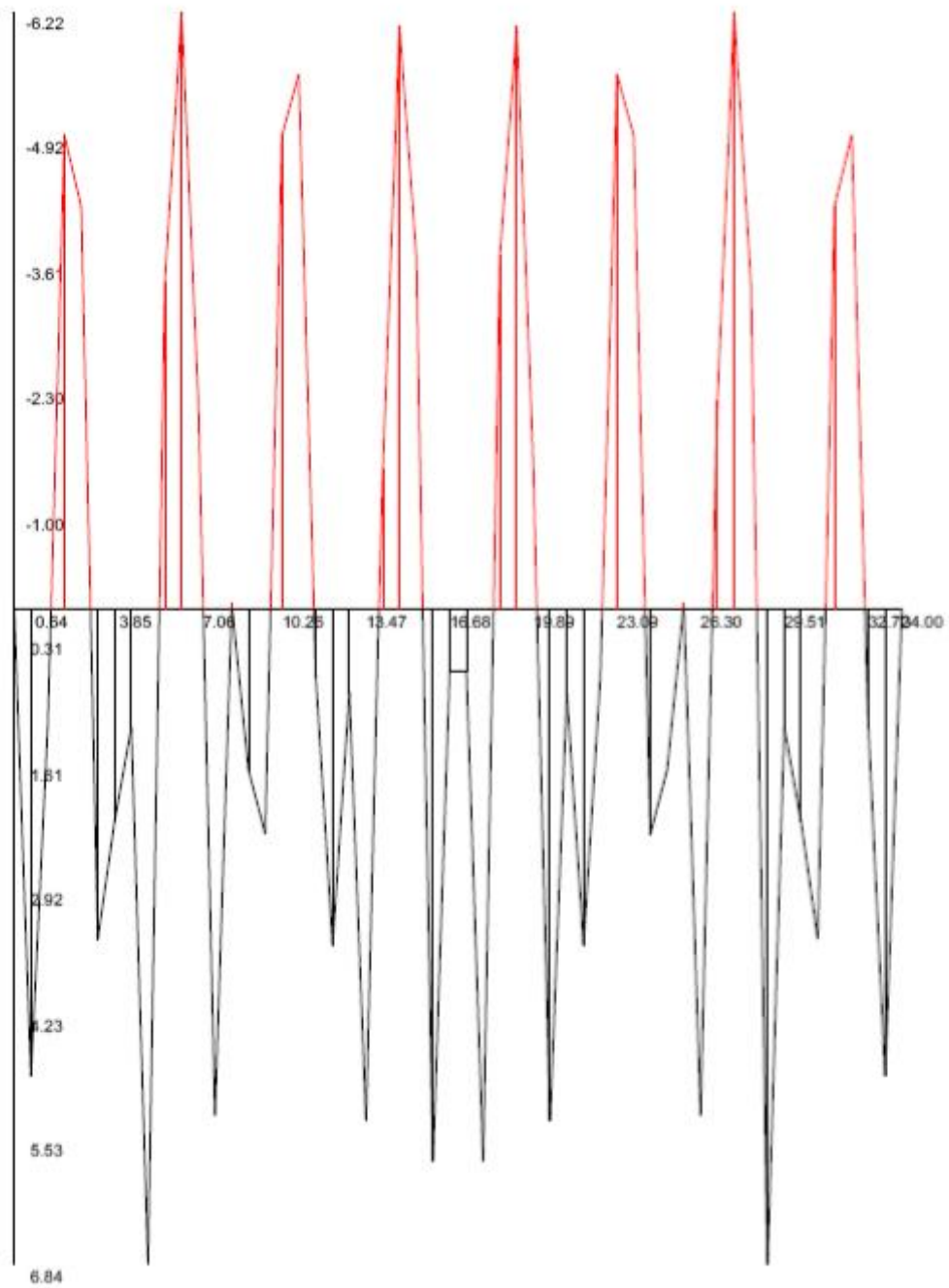


Bilaga 11: 4 (4)

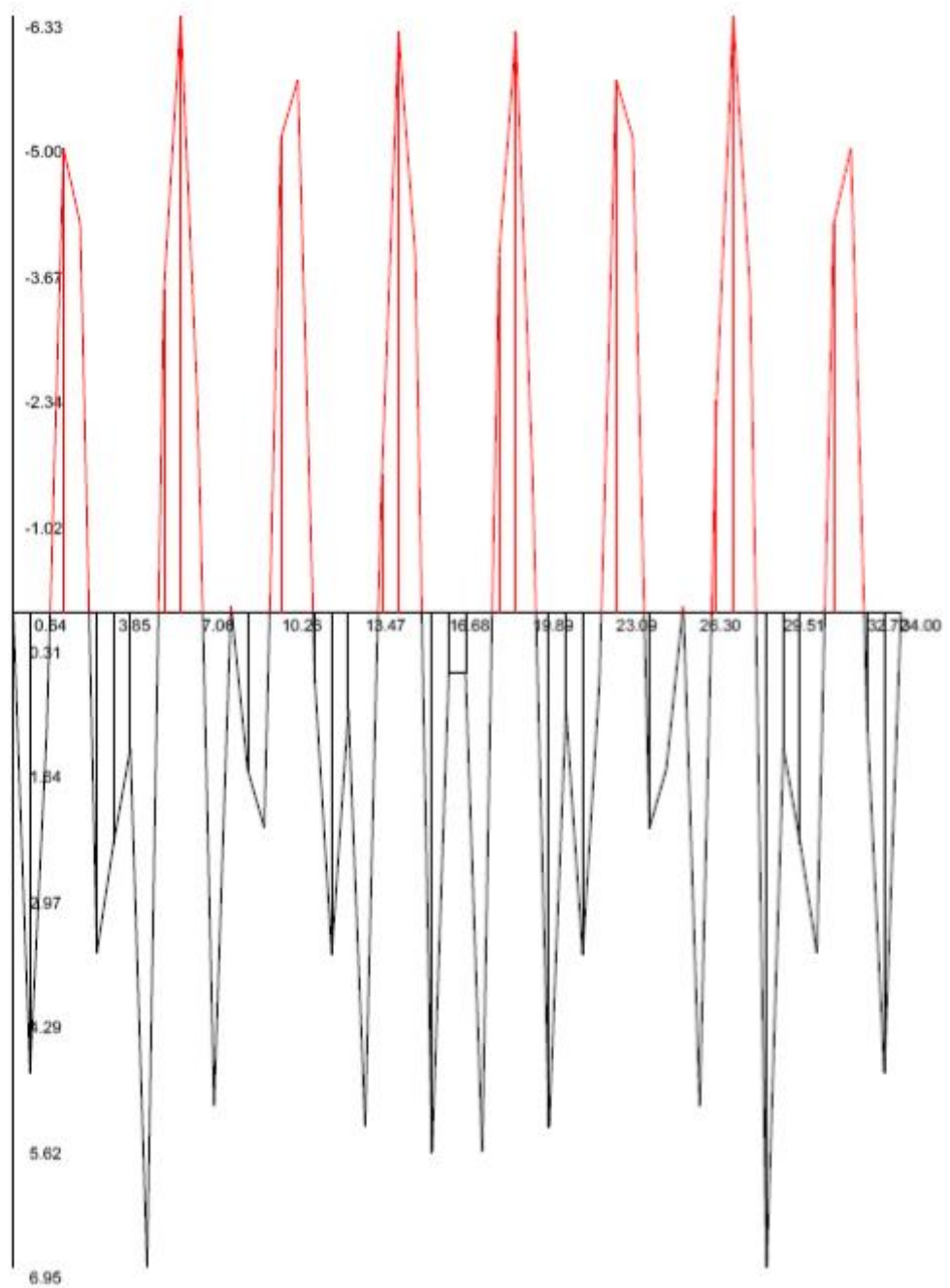
BE - slab
Momentdiagram grundfall D
Mittskikt



BE - slab
Momentdiagram enbart bra fyllnadsmaterial
Mittskikt



BE - slab
Momentdiagram enbart dåligt fyllnadsmaterial
Mittskikt



Momentdiagram för simulering med utdragen jordlagerföljd

