



LUND
UNIVERSITY

BERÄKNING AV BÄRFÖRMÅGA HOS PÅLAR I MORÄNLERA

Svensk och dansk beräkningsmetodik

JESPER JEANSSON

Geotechnical
Engineering

Master's Dissertation

DEPARTMENT OF CONSTRUCTION SCIENCES

GEOTECHNICAL ENGINEERING

ISRN LUTVDG/TVGT--23/5071--SE (1-89) | ISSN 0349-4977

MASTER'S DISSERTATION

BERÄKNING AV BÄRFÖRMÅGA HOS PÅLAR I MORÄNLERA

Svensk och dansk beräkningsmetodik

JESPER JEANSSON

Supervisors: **ERIKA TUDISCO**, Associate Professor, Geotechnical Engineering, LTH, Lund,
Professor **OLA DAHLBLOM**, Dept. of Construction Sciences, LTH, Lund, **LARS MARBOE**, MSc,
HOFORS A/S and **HÅKAN LINDGREN**, Geotechnical Engineer, Sweco Sverige AB.

Examiner: **SUSANNE HEYDEN**, Associate Professor, Dept. of Construction Sciences, LTH, Lund.

Copyright © 2023 Geotechnical Engineering,
Dept. of Construction Sciences, Faculty of Engineering LTH, Lund University, Sweden.

Printed by V-husets tryckeri LTH, Lund, Sweden, June 2023 (PI).

For information, address:

Geotechnical Engineering, Dept. of Construction Sciences,
Faculty of Engineering LTH, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden.

Homepage: www.geoteknik.lth.se

Abstract

The main purpose of this master's thesis was to compare safety factors for the Swedish and Danish calculation methods in the ground conditions sand and clay above moraine clay. The actual bearing capacity in the ground conditions was estimated through CAPWAP-measurements. The safety factor using the Swedish method was found to be 2.7, while the safety factor using the Danish method was found to be 1.3. This shows that there are significant differences in the safety factors between the two methods.

This thesis also includes several secondary purposes. One was to determine the safety factors for the mantle and tip using both the Swedish and Danish methods. This was done to determine their respective impact on the total bearing capacity. The Swedish and Danish methods handle the mantle and tip bearing capacity differently in the ground conditions.

The safety factor for the mantle using the Swedish method was found to be 0.8, and using the Danish method it was also 0.8. This shows that the Swedish and Danish mantle bearing capacity have a similar impact on the total bearing capacity. However, the safety factor for the tip using the Swedish method was found to be ∞ , while the safety factor for the tip using the Danish method was 1.7. This shows that the Swedish tip bearing capacity is neglected in the total bearing capacity, while the Danish tip bearing capacity is included.

Other secondary purposes were to determine how the different partial coefficients in the Swedish and Danish methods impact the safety factors. During the initial process of the thesis, it emerged that the Swedish and Danish methods have the same partial coefficients. However, the Danish method had a higher correlation coefficient than the Swedish method. This means that the Danish method is more conservative than the Swedish method regarding the partial and correlation coefficients' contribution to the safety factors.

In conclusion, the Swedish method manages the contribution from the mantle and tip bearing capacity safely, while the Danish method manages the contribution from the partial and correlation coefficients safely. The Swedish parameters that are on the safe side outweigh the Danish parameters that are on the safe side. These are the reasons why the Swedish method gave a higher safety factor than the Danish method. This thesis also includes bearing capacity calculations using the PLAXIS 2D approximate method and safety calculations with safety indexes to provide a more comprehensive analysis.

Sammanfattning

Detta examensarbets huvudsyfte var att jämföra säkerhetsfaktorerna för den svenska och den danska beräkningsmetodiken i markförhållanden sand och lera ovanpå moränlera. Den verkliga bärförmågan i markförhållandena togs fram genom CAPWAP-mätningar. Säkerhetsfaktorn med den svenska beräkningsmetodiken blev 2.7 och säkerhetsfaktorn med den danska beräkningsmetodiken blev 1.3. Detta visar att den svenska och den danska beräkningsmetodiken ger stora skillnader i säkerhetsfaktorn.

I examensarbetet ingick även ett flertal undersyften. Ett undersyfte var att för den svenska och den danska beräkningsmetodiken avgöra säkerhetsfaktorerna för manteln respektive spetsen. Detta för att avgöra hur stor inverkan mantel- och spetsbärighetskapaciten har på den totala bärighetskapaciteten i respektive land. Den svenska och den danska beräkningsmetodiken hanterar mantel- och spetsbärigheten olika i markförhållandena. Andra undersyften var att avgöra hur den svenska och den danska beräkningsmetodikens olika partialkoefficienter och korrelationskoefficient påverkar säkerhetsfaktorerna.

Säkerhetsfaktorn för manteln med den svenska beräkningsmetodiken blev 0.8 och säkerhetsfaktorn för manteln med den danska beräkningsmetodiken blev 0.8. Detta visar att den svenska och den danska mantelbärigheten har liknande inverkan på den totala bärighetskapaciteten. Säkerhetsfaktorn för spetsen med den svenska beräkningsmetodiken blev ∞ och säkerhetsfaktorn för spetsen med den danska beräkningsmetodiken blev 1.7. Detta visar att den svenska spetsbärigheten försummas på den totala bärighetskapaciteten medan den danska spetsbärigheten medräknas i den totala bärighetskapaciteten.

Under den initiala processen av examenarbetet framgick det att den svenska och den danska beräkningsmetodiken för pålning under byggnader har lika partialkoefficienter. Däremot har den danska beräkningsmetodiken en högre korrelationskoefficient än den svenska beräkningsmetodiken. Detta innebär att den danska beräkningsmetodiken ligger mer på säkra sidan än den svenska beräkningsmetodiken när det gäller partialkoefficienternas och korrelationskoefficientens totala bidrag till säkerhetsfaktorerna.

Slutsatsen är att den svenska beräkningsmetodiken ligger på säkra sidan gällande hur bidraget från mantel- och spetsbärigheten hanteras medan den danska beräkningsmetodiken ligger på säkra sidan gällande hur partialkoefficienter och korrelationskoefficienter hanteras. De svenska parametrarna som ligger på säkra sidan överväger de danska parametrarna som ligger på säkra sidan. Detta är anledningarna till att den svenska beräkningsmetodiken gav en högre säkerhetsfaktor än den danska beräkningsmetodiken.

Utöver beräkningar med svensk och dansk beräkningsmetodik så genomfördes även en beräkning med den numeriska metoden PLAXIS 2D. Utöver beräkningar av säkerhetsfaktorer så beräknades även säkerhetsindex. Detta för att få ett större analysunderlag.

Förord

Detta examensarbete genomfördes i samarbete med Erika Tudisco och Ola Dahlblom vid Avdelningen för geoteknik på LTH, med Håkan Lindgren vid Sweco Sverige AB och med Lars Marboe vid HOFOR A/S.

Jag vill ge ett stort tack till alla handledarna för deras råd och stöd under hela detta examensarbete som skett helt på distans. Jag har en stor beundran för alla civilingenjörer verksamma inom det komplexa området pålning!

Till väg- och vattenbyggnad studenter vill jag ge rådet att läsa mycket under utbildningens gång för att underlätta allt läsande och skrivande som behöver göras när man genomför sitt examensarbete! Under årskurs 1 fick vi av en gästföreläsare rådet att under utbildningens gång, på fritiden, läsa mycket för att förbereda oss på allt läsande och skrivande som sker ute på arbetsplatser. Jag önskar att jag tidigare lyssnat på detta rådet. Nu läser jag böcker och tidningar dagligen på fritiden!

Jesper Jeansson

Lund, 2023.

Notation

De latinska och grekiska bokstäverna nedan presenteras i ordningen som dem förekommer i examensarbetet.

Latinska bokstäver

E - elasticitetsmodul

c - skjuvhållfasthet

u - porvattentryck

c' - effektiv skjuvhållfasthet

c_u - odränerad skjuvhållfasthet

m - dansk materialfaktor

r - dansk regenerationsfaktor

n - dansk bärighetskapacitetsfaktor

N - svensk bärighetskapacitetsfaktor

N_m - dansk dimensionslös faktor

N_q - svensk bärighetskapacitetsfaktor

N_q - dansk bärighetskapacitetsfaktor

c - utbredningshastighet i material

f - frekvens

T - periodtid

i - infallsvinkel

r - reflektionsvinkel

b - brytningsvinkel

n_s - säkerhetsfaktor

E - verklig bärförmåga

R - beräknad bärförmåga

s - standardavvikelse

u_M - differensen av verklig bärförmåga och beräknad bärförmåga

s_M - standardavvikelse för differensen

s_r - standardavvikelse för verklig bärförmåga

s_r - standardavvikelse för beräknad bärförmåga

R_s - beräknad bärförmåga

A_m - mantelarea

c_u - odränerade skjuvhållfasthet

K_d - svensk diameterfaktor för påle

K_f - svensk formfaktor för påle

K_t - svensk vidhäftningsfaktor för påle

K_{ocr} - svensk faktor relaterad till jords överkonsolideringsgrad

R_k - karaktäristisk bärförmåga

R_d - dimensionerad bärförmåga

f_m - hållfasthet

u_L - kvot beroende av pållängd
 L - pållängd
 OCR - överkonsolideringskvot
 m - materialfaktor beroende av ytstruktur
 r - regenerationsfaktor beroende av jordmaterial
 n - dimensionslös faktor beroende av kohesionsjordarts fasthet
 A_s - pålspetsens tvärsnittsarea
 N_m - dimensionslös faktor beroende av axiell belastningsriktning
 F - kraft
 v - partikelhastighet
 t - tid
 B - tvärsnitts bredd
 H - tvärsnitts höjd
 O - tvärsnitts omkrets
 z - markdjup

Grekiska bokstäver

σ - normalspänning
 τ - skjuvspänning
 E - elasticitetsmodul
 ε - töjning
 ν - tvärkontraktionstal
 ϕ - friktionsvinkel
 ψ - dilatansvinkel
 α - vinkel
 c' - effektiv kohesion
 σ' - effektiv spänning
 ϕ' - inre friktionsvinkel
 c_u - odränerad skjuvhållfasthet
 α - svensk vidhäftningsfaktor
 β - svensk betafaktor
 ξ - kontinuerlig stokastisk variabel
 μ - väntevärde
 β - säkerhetsindex
 α - vidhäftningsfaktor
 α_{okorr} - okorrigerade vidhäftningsfaktor
 γ_{Rd} - svensk partialkoefficient för modellosäkerheten vid en totalspänningsanalys
 ξ - korrelationskoefficient för geundersökningar
 γ_s - partialkoefficient för en slagen mantelbärande påle
 σ'_v - effektiv överlagringspänning
 β - svensk mantelbärförmågefaktor
 σ'_c - effektiv förkonsolideringspänning
 σ'_{v0} - effektiv in situ spänning
 γ_t - svensk partialkoefficient för en slagen mantelbärande påle
 σ'_{om} - medelvärdet av effektiv vertikal överlagringspänning längs en påles mantelyta

β - svensk faktor beroende av pällängden och lagringstätheten
 q'_s - är den effektiva överlagringsspänningen bestämt i mitten av det betraktade lagret
 γ_b - dansk partialkoefficient för en slagen spetsburen påle
 γ - tyngd
 γ_m - mättnadstyngd

Innehåll

Abstract	I
Sammanfattning	III
Förord	V
Notation	VII
Innehåll	XII
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Frågeställningar	2
1.4 Metod	2
1.5 Avgränsningar	2
1.6 Målgrupp	3
2 Teori	5
2.1 Jordarter	5
2.1.1 Mineraljordarter	5
2.2 Spänningar	6
2.3 Materialmekanik	8
2.3.1 Hookes lag	8
2.4 Jordmekanik	9
2.4.1 Mohrs spänningscirkel	10
2.4.2 Mohr Coulombs brottkriterium	11
2.5 Pålmeکانik	13
2.5.1 Tryckbelastning	13
2.6 Vågmekanik	17
2.6.1 Reflektion	18
2.6.2 Transmission	18
2.6.3 Absorption	19
2.7 Säkerhetskontroller	20
2.7.1 Säkerhetsfaktor	20
2.7.2 Säkerhetsindex	20
3 Metod	23
3.1 Analytisk beräkningsmetodik	23
3.1.1 Svensk beräkningsmetodik för kohesionsjordarter	23

3.1.2	Svensk beräkningsmetodik för friktionsjordarter	26
3.1.3	Svenska korrelationskoefficienter	28
3.1.4	Svenska partialkoefficienter	28
3.1.5	Dansk beräkningsmetodik för kohesionsjordarter	29
3.1.6	Dansk beräkningsmetodik för friktionsjordarter	31
3.1.7	Dansk korrelationskoefficient	32
3.1.8	Danska partialkoefficienter	33
3.2	PLAXIS 2D	33
3.2.1	Indata	33
3.2.2	Utdata	35
3.3	CAPWAP-mätning	36
3.3.1	Korrelationskoefficienter	38
3.4	Säkerhetskontroller	40
3.4.1	Säkerhetsfaktorer	40
3.4.2	Säkerhetsindex	41
4	Referensprojekt	43
4.1	Referensprojekt i analytisk beräkningsmetodik	46
4.2	Referensprojekt i PLAXIS 2D	48
5	Resultat	53
5.1	Analytisk beräkningsmetodik	53
5.1.1	Svensk beräkningsmetodik	53
5.1.2	Dansk beräkningsmetodik	55
5.1.3	Sammanställning av analytiska beräkningsmetodiker	56
5.2	PLAXIS 2D-beräkningar	57
5.3	CAPWAP-mätningar	64
5.4	Säkerhetsfaktorer och säkerhetsindex	65
5.4.1	Svensk beräkningsmetodik	66
5.4.2	Dansk beräkningsmetodik	67
5.4.3	Sammanställning av säkerhetsfaktorer och säkerhetsindex	69
5.4.4	Diagram för säkerhetsfaktorer	70
5.4.5	Diagram för säkerhetsindex	73
5.4.6	CAPWAP-mätningar	75
6	Diskussion	77
6.1	Pålmeکانik analys	77
6.2	Partial- och korrelationskoefficienter	78
6.3	Vidare studier	79
7	Slutsatser	81
	Litteratur	83
A	CAPWAP-mätningarnas grafer	85

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Pålning används som förstärkningsåtgärd vid grundläggning i syfte att överföra vertikala och horisontella krafter till ett mer bärkraftigt jordlager eller till ett berg. Pålar används även i en mindre utsträckning för att förhindra ras och förskjutningar [1].

Det finns ett flertal olika pålningsmetoder. I Eurokod 7 definieras tre pålningsmetoder och dessa tre pålningsmetoder är slagna pålar, grävpålar och CFA pålar [2]. Det finns även ett flertal olika pålmaterial. I Sverige har sextio procent av pålar konstruerats av betong, trettiosex procent av pålar konstruerats av stål och fyra procent av pålar konstruerats av trä [3].

Slagna pålar används för markförhållandena sand och lera ovanpå moränlera. Dessa markförhållandena förekommer både i Skåne och i Danmark och samarbeten har ökat mellan verksamma inom geoteknik i Sverige och Danmark. Av dessa två anledningar har ett intresse uppstått för hur bärighetsberäkningarna skiljer sig mellan dessa båda länder.

Båda länderna använder sig av Eurokod men resultatet från en bärighetsberäkning med Eurokod varierar mellan länderna. Detta eftersom Eurokod erbjuder möjligheten att välja tillämpade partialkoefficienter inom ett intervall. Svensk respektive dansk beräkningsmetodik använder inte samma tillämpning av partialkoefficienter. Dessutom varierar det hur länderna hanterar bidragen från mantelbärighet respektive spetsbärighet i kohesionsjord. Svensk beräkningsmetodik utgår ifrån att mantelbärigheten står för majoriteten av bärförmågan. Dansk beräkningsmetodik utgår ifrån att både mantelbärigheten och spetsbärigheten bidrar till bärförmågan. Även korrelationsfaktorerna varierar mellan länderna.

1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att kalkylera två säkerhetsfaktorer. En säkerhetsfaktor för dansk beräkningsmetodik och en säkerhetsfaktor för svensk beräkningsmetodik. Med dessa säkerhetsfaktorer ska en utvärdering ske för att få en indikation ifall svensk beräkningsmetodik systematiskt underskattar bärighetskapaciteten jämfört mot dansk beräkningsmetodik i aktuella markförhållanden. Utöver de traditionella säkerhetsfaktorerna som används inom geoteknik kalkyleras även säkerhetsindex. Dessutom ska en utvärdering ske över hur ländernas olika val påverkar säkerhetsfaktorerna.

1.3 Frågeställningar

- Vad är säkerhetsfaktorerna för svensk respektive dansk beräkningsmetodik i aktuella markförhållanden?
- Hur påverkar mantelbärigheten respektive spetsbärigheten säkerhetsfaktorerna?
- Vad är säkerhetsindexet för svensk respektive dansk beräkningsmetodik i aktuella markförhållanden?
- Hur påverkar svenska respektive danska partialkoefficienter säkerhetsfaktorerna?
- Hur påverkar svenska respektive danska korrelationsfaktorer säkerhetsfaktorerna?

1.4 Metod

Det aktuella examensarbetet utgår ifrån oidentifierad pålningsdata från ett husbyggnadsprojekt i Danmark. Markförhållandena vid grundläggningen utgörs av fyllning, sand och lera liggandes ovanpå den fasta jordarten moränlera. Djupa lager sand och lera innebär att åtgärden shacktning gett höga kostnader varför åtgärden slagna betongpålar nyttjats.

Två analytiska bärighetsberäkningar för slagna pålar genomförs följaktligen med Eurokod i detta examensarbete. En analytisk bärighetsberäkning genomförs med tillämpning av svenska partialkoefficienter och en med tillämpning av danska partialkoefficienter. De analytiska bärighetsberäkningarna utförs som handberäkningar. De olika metoderna som används till de analytiska bärighetsberäkningarna presenteras i avsnitt 3.1.

Utöver de analytiska bärighetsberäkningarna kommer även en approximativ bärighetsberäkning att genomföras med finita elementmetoden i programmet PLAXIS 2D. Denna beräkning i PLAXIS 2D genomförs för att tillhandahålla ett större analysunderlag till jämförelsen mellan bärighetsberäkningarna och in situ-resultatet från CAPWAP mätningen.

Efter jämförelsen av bärighetsberäkningarna och in situ-resultatet från CAPWAP mätningen tas avslutningsvis säkerhetsfaktorer och säkerhetsindex fram för de båda ländernas bärighetsberäkningar.

1.5 Avgränsningar

I detta examensarbetet avgränsas beräkningarna till brottgränstillståndet. I brottgränstillståndet avgränsas dessutom beräkningarna för bärighetskapaciteten dvs. lastkapaciteten för pålen beaktas ej. Detta eftersom resultatet från CAPWAP-mätningen visar att ingen påle knäcks vid belastning dvs. lastkapaciteten överskrids inte.

1.6 Målgrupp

Detta examensarbetet är anpassat för väg- och vattenbyggnad studenter på grundläggande nivå som inte läst pålmekanik. Resultatet av examensarbetet är främst riktat åt aktiva inom geoteknikbranschen.

2 Teori

I detta kapitel presenteras all teori som behövs för att förstå grunderna bakom metoderna i kapitel 3. Teorierna som behandlas i detta kapitel är teorier som behövs för att förstå den svenska och den danska analytiska beräkningsmetodikerna, den approximativa beräkningsmetodikerna i PLAXIS 2D, mätningsmetoden i CAPWAP, säkerhetsfaktormetodiken och säkerhetsindexmetodikerna.

Först presenteras jordarter, spänningar, materialmekanik, jordmekanik och pålmekanik som behövs för att förstå grunderna bakom de två analytiska beräkningsmetodikerna och den approximativa beräkningsmetodikerna. Kunskap om jordarter behövs för att kunna genomföra de analytiska beräkningarna och den approximativa beräkningen med korrekta faktorer. Pålmekniken bygger på de fyra tidigare avsnitten jordarter, spänningar, materialmekanik och jordmekanik. Därefter presenteras vågmekanik som behövs för att förstå grunderna bakom mätningsmetoden i CAPWAP. Det vågbaserade CAPWAP programmet används för att ta fram den verkliga bärförmågan. Avslutningsvis presenteras den grundläggande teorin för säkerhetsfaktorer och säkerhetsindex som den utformade säkerhetsfaktormetodikerna och säkerhetsindexmetodikerna baseras på.

2.1 Jordarter

En jordart kan vara en mineraljordart eller en humusjordart [4]. Humusjordarter beaktas inte i detta examensarbete.

2.1.1 Mineraljordarter

En mineraljordarts funktion beror främst av kornstorlek och kornfördelning i den aktuella jorden. Med utgångspunkt från kornstorleken delas inom geoteknik mineraljordarter in i de två grupperna friktionsjordart och kohesionsjordart [4]. Sand och grus definieras som friktionsjordarter medan lera definieras som en ren kohesionsjordart. Silt definieras delvis som en kohesionsjordart. Friktionsjordarter har generellt en mer grovkornig struktur. Friktionsjordarters hållfasthet domineras därmed av friktionskrafter av de grova kornen [5]. En ren kohesionsjordarts hållfasthet domineras av de molekylära attraktionskrafterna mellan de mindre kornen [5]. Friktionsjordarternas och kohesionsjordarternas fraktionsgränser redovisas i tabell 2.1 där friktionsjordarter beskrivs som grov jord och kohesionsjordarter beskrivs som finjord.

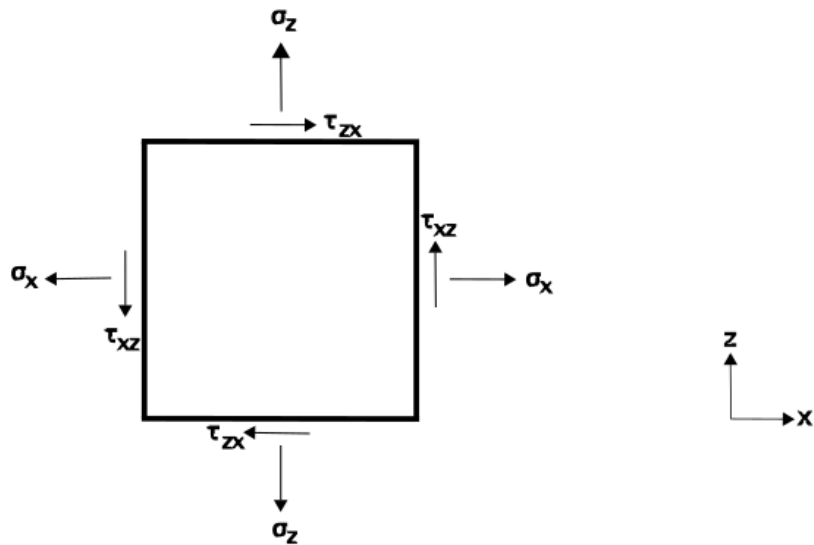
En kohesionsjordarts hållfasthet kan dock bero av friktionskrafter när inslag av grövre korn finns inom kornfördelningen av jordarten, tex moränjordar. Morän är en jordart bestående av korn från ett flertal av huvudfraktionerna i tabell 2.1 [5].

Tabell 2.1: Mineraljordars fraktionsgränser.

Storleksområde	Huvudfraktioner	Underfraktioner	Fraktionsgränser [mm]
Mycket grov jord			
	Stora block		> 630
	Block		200 - 630
Grov jord	Sten		63 - 200
	Grus		2 - 63
		Grovgrus	20 - 63
		Mellangrus	6.3 - 20
		Fingrus	2 - 6.3
		Sand	0.063 - 2.0
		Grovsand	0.63 - 2.0
		Mellansand	0.2 - 0.63
Finjord		Finsand	0.063 - 0.2
	Silt		0.002 - 0.063
		Grovsilt	0.02 - 0.063
		Mellansilt	0.0063 - 0.02
		Finsilt	0.002 - 0.0063
	Ler		≤ 0.002

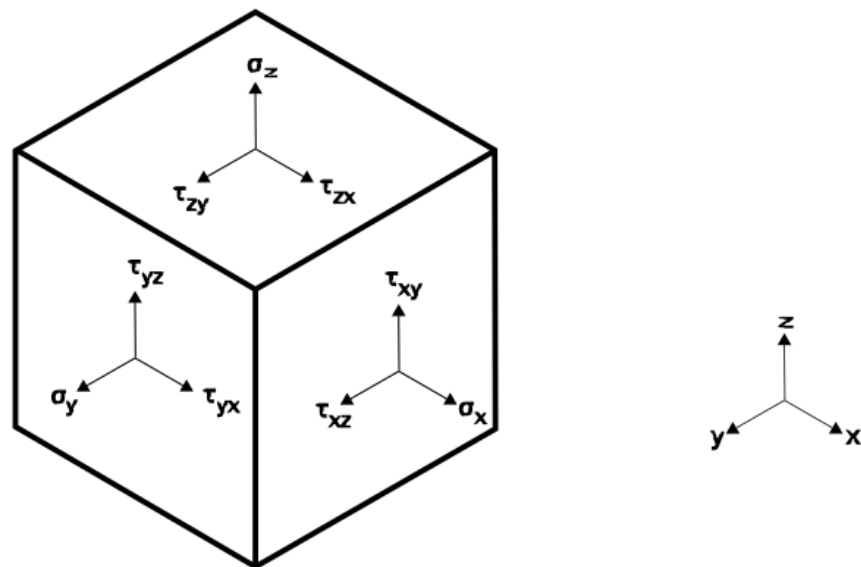
2.2 Spänningar

Spänningar bildas i jordarters olika plan. Normalspänning, oftast bara betecknat som spänning, innebär normalkraft per ytenhet i ett materials plan. Förutom normalspänning, σ , finns i ett materials plan dessutom skjuvspänningar, τ . Förhållandet mellan spänningar och skjuvspänningar i ett tvådimensionellt materials plan illustreras i figur 2.1 där spänningskomponenterna vinkelrät mot snittlinjerna är σ_x och σ_z och skjuvspänningskomponenterna parallellt med snittlinjerna är τ_{xz} och τ_{zx} [6]



Figur 2.1: Ett tvådimensionellt materials spänningar.

I ett tredimensionellt material har man tre huvudplan. Förhållandet mellan spänningar och skjuvspänningar för huvudplanen i ett tredimensionellt material illustreras i figur 2.2 där spänningskomponenterna vinkelrät mot snittytorna är σ_x , σ_y och σ_z och skjuvspänningskomponenterna parallellt med snittytorna är τ_{yz} , τ_{yx} , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{zy} och τ_{zx} [6]



Figur 2.2: Ett tredimensionellt materials spänningar.

Spänningar kan vara tryckspänningar eller dragspänningar. I materialmekanikens teckenkonvention gäller att tryckspänningar betecknas som negativa och dragspänningar betecknas som positiva [6]. I jordmekanikens teckenkonvention gäller det motsatta det

vill säga tryckspänningar betecknas som positiva och dragspänningar betecknas som negativa [7].

2.3 Materialmekanik

I alla material finns det en relation mellan spänningen och deformationen som uppstår. Dessa relationer kallas för konstitutiva samband. Några exempel på konstitutiva samband är elasticitet, plasticitet, viskoelasticitet och viskoplasticitet [8]. Teorin för det konstitutiva sambandet elasticitet beskrivs i avsnittet 2.3.1.

2.3.1 Hookes lag

Hookes lag används för att få fram spänningen, σ , i ett material såsom betong genom att vid belastning mäta den deformerade formens töjning. Spänningen kan tas fram genom en sådan mätning eftersom att Hookes lag baseras på det konstitutiva sambandet elasticitet som har ett linjärt samband. Under en ökad belastning gäller för ett linjärt elastiskt material att spänningen är proportionell mot töjningen. När belastningen avlägnas återgår ett linjärt elastiskt material till den odeformerade formen. [6]. För ett endimensionellt material fås spänningen enligt

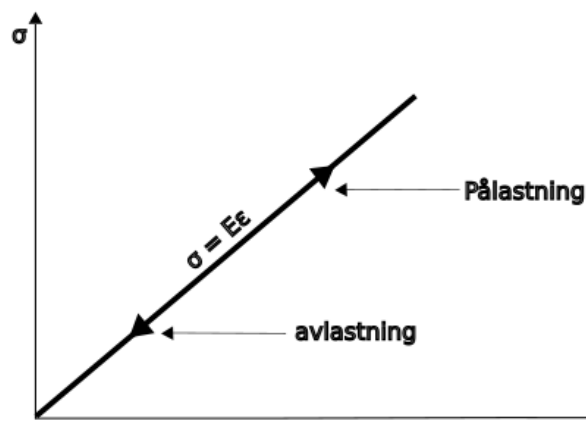
$$\sigma_x = E\varepsilon_x \quad (2.1)$$

där

E är elasticitetsmodulen och

ε_x är töjningen.

En illustration av Hookes lag ges i figur 2.3.



Figur 2.3: Illustration av Hookes lag.

För ett tvådimensionellt eller ett tredimensionellt material gäller dessutom att alla dimensioners töjningar beror av ett tvärkontraktionstal, även kallat Poissons tal. Spänningen beror av töjningen och följaktligen beror alla dimensioners spänningar också av ett tvärkontraktionstal.

Ett tvärkontraktionstal beskriver hur ett material, genom töjning, blir tjockare om det utsätts för en axiell tryckspänning och hur ett material, genom töjning, bli smälare om det utsätts för en axiell dragspänning. Hur töjningarna varierar beroende av tvärkontraktionstalen benämns Hookes generaliserade lag [6]. För ett tredimensionellt material fås töjningarna i respektive riktning enligt

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_y = -\frac{\nu\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \quad (2.4)$$

där

ν är tvärkontraktionstalet,

E är elasticitetsmodulen och

σ_i är spänningen i respektive riktning.

2.4 Jordmekanik

Den maximala spänningen i ett jordmaterial beror utöver elasticitetmodulen och tvärkontraktionstalet även på skjuvhållfastheten, c , friktionsvinkeln, ϕ och dilatansvinkeln, ψ . Kohesionen och friktionsvinkeln beror av jordarterna i ett jordmaterial som har beskrivits ovan i avsnitt 2.1. Kohesionen och friktionsvinkeln kan användas för att bedöma hur spänningen begränsas med hjälp av det empiriska sambandet Mohr Coulombs brottkriterium som presenteras i avsnitt 2.4.2. Det empiriska sambandet i avsnitt 2.4.2 bygger på spänningsförhållandet mellan normalspänningarna och skjuvspänningen i ett godtyckligt plan som presenteras i avsnitt 2.4.1.

Jord är dessutom ett tvåfas material vilket innebär att jord utöver jordarter består av vatten. Detta leder till att ett nytt spänningsbegrepp behöver införas som kallas effektivspänning. Effektivspänningen tar hänsyn till att spänningen i jordarterna i vertikalled och horisontalled avbelastas av vattnet som också bär spänning [7]. För ett tredimensionellt material fås effektivspänningarna enligt

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.5)$$

där

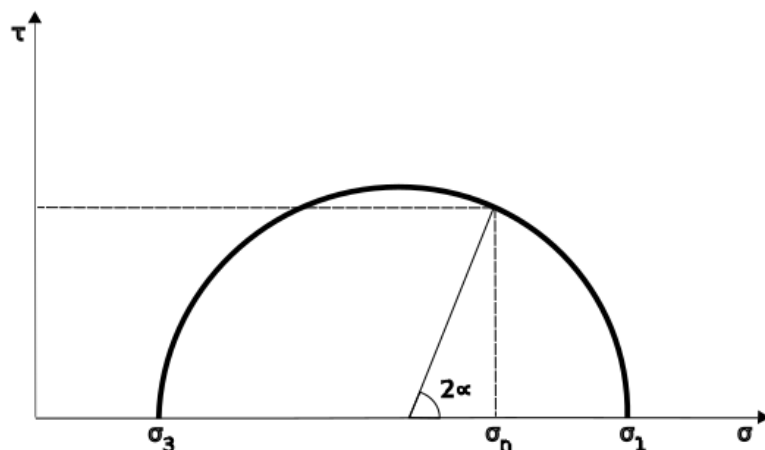
u är porvattentrycket och

σ är totalspänningen

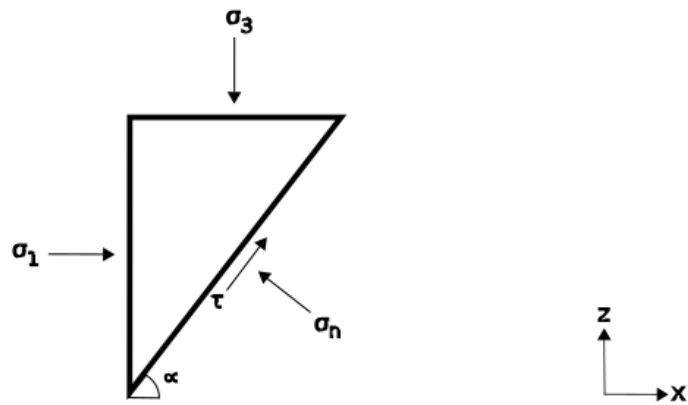
Spänningen som bärs av vattnet, det vill säga av porvattentrycket, kan vara tidsberoende. För kohesionsjordarter avlastar till exempel porvattentrycket jordmaterialets spänning under ett antal dagar efter pålastning eftersom kohesionsjordarter dräneras sakta. För friktionsjordarter avlastar porvattentrycket inte jordmaterialets spänning eftersom friktionsjordarter dräneras snabbt [7].

2.4.1 Mohrs spänningscirkel

Mohrs spänningscirkel visar spänningsförhållandet mellan normalspänningarna och skjuvspänningen i ett godtyckligt plan. Detta illustreras i figur 2.4. I Mohrs spänningscirkel är σ_1 och σ_3 huvudspänningarna. I jordmekanik är vanligtvis σ_1 lika med den vertikala spänningen och σ_3 lika med den horisontella spänningen. I Mohrs spänningscirkel kan spänningen σ_n i ett godtyckligt plan avläsas där α är lika med planets vinkel som illustreras i figur 2.5 [7].



Figur 2.4: Mohrs spänningscirkel.



Figur 2.5: Spänningsfördelning i ett godtyckligt plan.

2.4.2 Mohr Coulombs brottkriterium

Mohr Coulombs brottkriterium är ett empiriskt samband som används för att få fram brottspänningen τ_f i Mohrs spänningscirkel för dränerade och odränerade förhållanden [7]. För dränerade förhållanden fås Mohr Coulombs brottkriterium enligt

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.6)$$

där

c' är den effektiva skjuvhållfastheten,

σ' är den effektiva spänningen och

ϕ' är jordens effektiva inre friktionsvinkeln.

För odränerade förhållanden fås Mohr Coulombs brottkriterium enligt

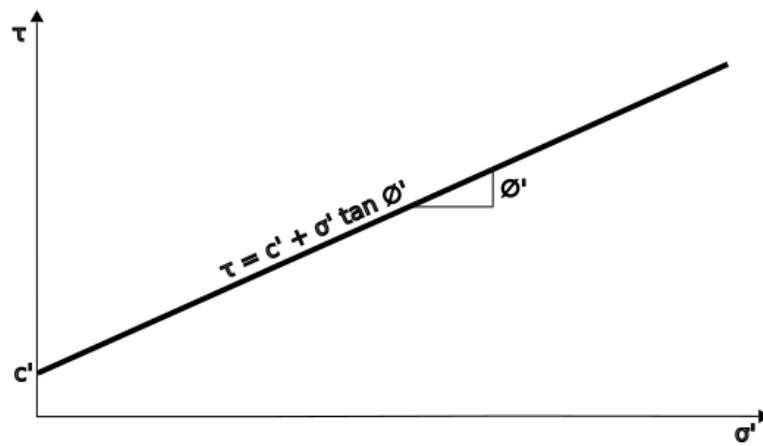
$$\tau_f = c_u \quad (2.7)$$

där

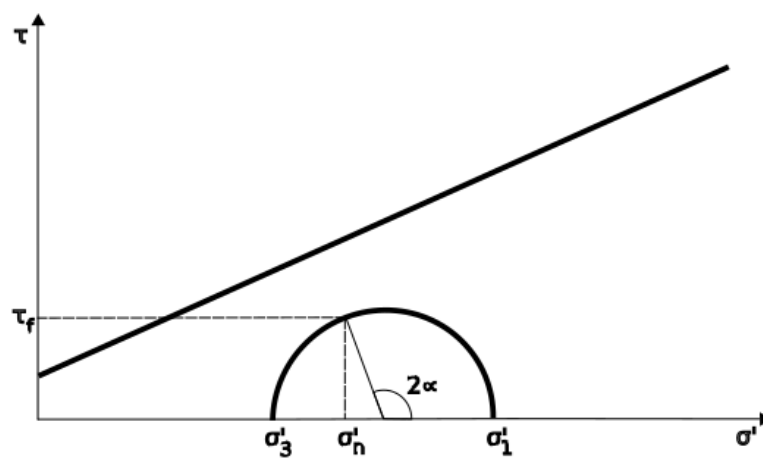
c_u är den odränerade skjuvhållfastheten.

Mohr Coulombs brottkriterium illustreras i figur 2.6. Genom att kombinera Mohr Coulombs brottkriterium med Mohrs spänningscirkel enligt figur 2.7 kan brottspänningen och tillhörande specifika plan identifieras enligt figur 2.8 . Brottspänningen ges i den

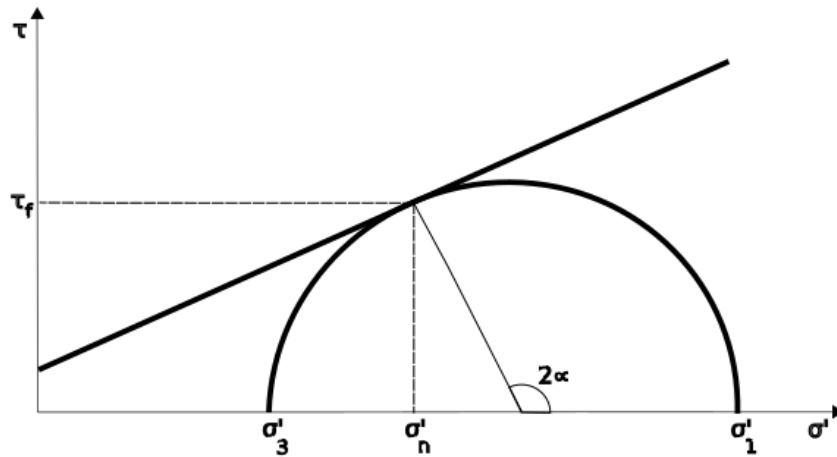
punkt där Mohr Coulombs brottkriterium och Mohrs spänningscirkel först överlappas när den vertikala spänningen, σ_z , ökas alternativt när de horisontella spänningarna, σ_x och σ_y , ökas eller minskas.



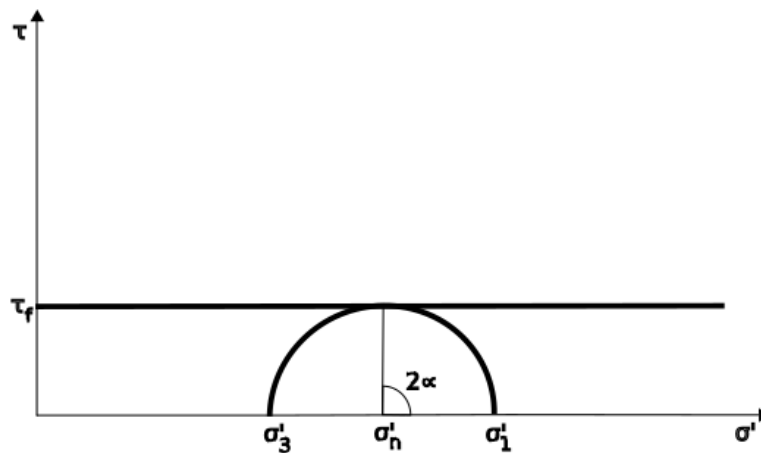
Figur 2.6: Mohr Coulombs brottkriterium för dränerade förhållanden i en friktionsjordart illustrerat som en rät linje. Den räta linjen ges av $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$.



Figur 2.7: Mohr Coulombs brottkriterium för dränerade förhållanden i en friktionsjordart och Mohrs spänningscirkel.



Figur 2.8: Mohr Coulombs brottkriterium för dränerade förhållanden i en friktionsjordart och Mohrs spänningscirkel vid brott.



Figur 2.9: Mohr Coulombs brottkriterium för odränerade förhållanden i en kohesionsjordart och Mohrs spänningscirkel vid brott.

2.5 Pålmeکانیک

En påle kan belastas med tryckbelastning eller dragbelastning [9]. Dragbelastade pålar beaktas inte i detta examensarbete.

2.5.1 Tryckbelastning

De olika mekaniska verkningsätten som finns för pålar vid modellering av tryckbelastade pålar är spetsburna pålar, kohesionsburna pålar och friktionsburna pålar [3]. Vilken modellering som är lämpligast beror på aktuella jordarter eftersom jordarterna bidrar till bärförmågan på olika sätt.

I en friktionjordart ges bidrag till bärförmågan genom interaktion mellan mantelarean och jordarten samt genom interaktion mellan spetsen och jordarten [9].

I en kohesionjordart ges ett bidrag till bärförmågan genom interaktion mellan mantelarean och jordarten. I en kohesionsjordart ges i teorin även ett bidrag till bärförmågan genom interaktion mellan spetsen och jordarten [9]. Bidraget till bärförmågan genom interaktion mellan spetsen och jordarten är dock mycket mindre. Svensk beräkningsmetodik har följaktligen i sin tillämpning av teorin valt att försumma detta bidrag. Det är dock möjligt att använda detta bidraget i sin tillämpning av teorin i svensk beräkningsmetodik. [9]. Dansk beräkningsmetodik däremot har i sin tillämpning av teorin valt att behålla detta bidrag [10].

Nedan presenteras de tre mekaniska verkningsätten samt specifika faktorer för kohesionsburna pålar och friktionsburna pålar. I svensk beräkningsmetodik finns många metoder för respektive verkningsätt och följaktligen beror de specifika faktorerna på vilken metod som tillämpas eftersom att beräkningsförfarandet varierar mellan metoderna [9]. För en fullständig redovisning av hur de svenska och de danska specifika faktorerna tillämpas i detta examensarbete hänvisas läsaren till kapitel 3.

Spetsburna pålar

Spetsburna pålar är pålar där lasten överförs från pålen via spetsen. Spetsburna pålar är fast inspända i ett bärkraftigt jordlager eller i ett berg. Denna typ av pålar beaktas inte i detta examensarbete.

Kohesionsburna pålar

Kohesionsburna pålar förekommer i kohesionsjordarter. Den lastöverförande förmågan via mantelytan beror huvudsakligen av kohesionsjordens odränerade skjuvhållfasthet [11]. Denna lastöverförande förmåga analyseras genom en totalspänningsanalys [9].

Faktorn som används specifikt för en totalspänningsanalys av mantelytan i svensk beräkningsmetodik är vidhäftningsfaktorn, α . Storleken av vidhäftningsfaktorn, α , beror på vilken totalspänningsanalys inom svensk beräkningsmetodik som tillämpas. Exempel på svensk beräkningsmetodik är pålkommisionens metod och pålgrundläggning handbokens metod. Faktorerna som används specifikt för en totalspänningsanalys av mantelytan i dansk beräkningsmetodik är materialfaktorn, m och regenerationsfaktorn, r [10].

Den lastöverförande förmågan via spetsen beror av spänningarna i en volym av kohesionsjordarten omkring spetsen, som beror av kohesionsjordartens odränerade skjuvhållfasthet. Denna lastöverförande förmåga via spetsen analyseras genom en totalspänningsanalys [9].

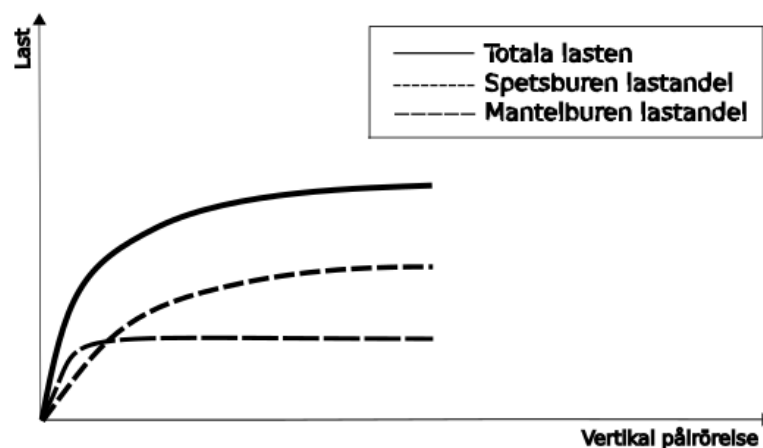
Faktorn som används specifikt för en totalspänningsanalys av spetsen i svensk beräkningsmetodik är bärighetskapacitet faktorn, N . Storleken av bärighetskapacitetfaktorn,

N , beror på vilka inom svensk beräkningsmetodik totalspänningsanalysmetoder som tillämpas. Faktorn som används specifikt för en totalspänningsanalys av spetsen i dansk beräkningsmetodik är bärighetskapacitetsfaktorn, n [10]. Den danska bärighetskapacitetsfaktorn, n , skiljer sig från den svenska bärighetskapacitetsfaktorn, N .

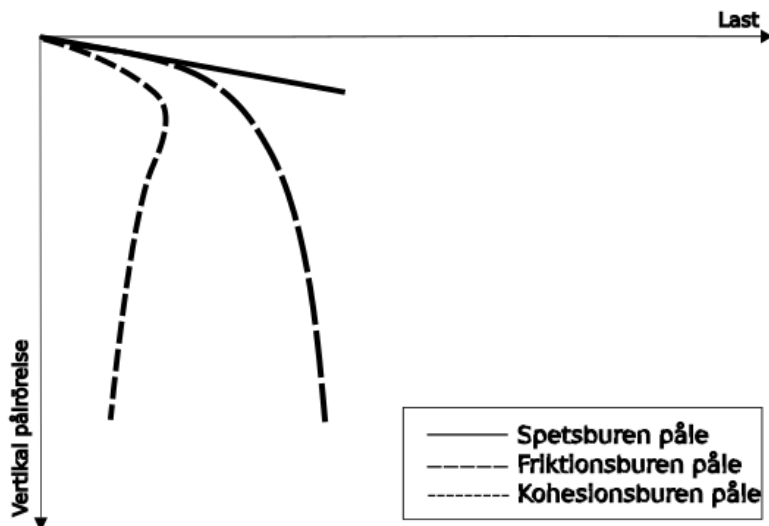
Friktionsburna pÅlar

Friktionsburna pÅlar förekommer i friktionsjord. Friktionsburna pÅlar är inte fast inspÅnda i ett bÅrkraftigt jordlager eller i ett berg som spetsburna pÅlar. Friktionsburna pÅlar är trots detta spetsburna till en stor andel. Den teoretiska grunden till att friktionsburna pÅlar kan överföra en stÅrre last via spetsen Ån kohesionsburna pÅlar År att friktionsburna pÅlar kan genomgÅ en stÅrre rÅrelse Ån kohesionsburna pÅlar utan att bÅrfÅrmÅgan Åverskrids. Detta eftersom att det hos friktionsjordar finns stÅrre friktionskrafter Ån hos kohesionsjordar. Lastandelarna under en Åkande rÅrelse fÅr mantelytan och fÅr spetsen illustreras i figur 2.10. Mantelytan aktivieras efter rÅrelsen 0.5-2 % av pÅlens diameter medan spetsen aktiveras efter rÅrelsen 5-10 % av pÅlens diameter [12].

Detta leder fÅljaktligen till att en friktionsburen pÅle har ett mindre sprÅtt brott Ån en kohesionsburen pÅle vilket illustreras i figur 2.11. Ett sprÅtt brott innebÅr ett plÅtsligt stopp av den lastupptagande fÅrmÅgan. I figur 2.11 illustreras Åven verkningsstÅttet fram till brott fÅr en spetsburen pÅle. Eftersom en kohesionsburen pÅle frÅmst År mantelburen och en spetsburen pÅle frÅmst År spetsburen sÅ presenteras inte lastandelarna i ett last-rÅrelse samband fÅr dessa pÅlvarianter.



Figur 2.10: Friktionburna pÅlars last-rÅrelse samband.



Figur 2.11: Olika pålars verkningssätt.

Den lastöverförande förmågan via mantelarean beror av friktionjordartens friktionvinkel och den horisontella spänningen. Denna lastöverförande förmågan via mantelarean analyseras genom en effektivspänningsanalys [9]. Den horisontella spänningen kan inte beräknas direkt och därför introduceras en faktor som multipliceras med den vertikala spänningen vilket ger den horisontella spänningen.

Faktorn som används specifikt för en effektivspänningsanalys av mantelytan inom svensk beräkningsmetodik är betafaktorn, β . Storleken av betafaktorn, β , beror på vilken effektivspänningsanalys inom svensk beräkningsmetodik som tillämpas. Exempel på svensk beräkningsmetodik är Meyerhofs metod och Flaate & Selnes metod. Faktorerna som används specifikt för en effektivspänningsanalys av mantelytan inom dansk beräkningsmetodik är faktorn, N_m [10].

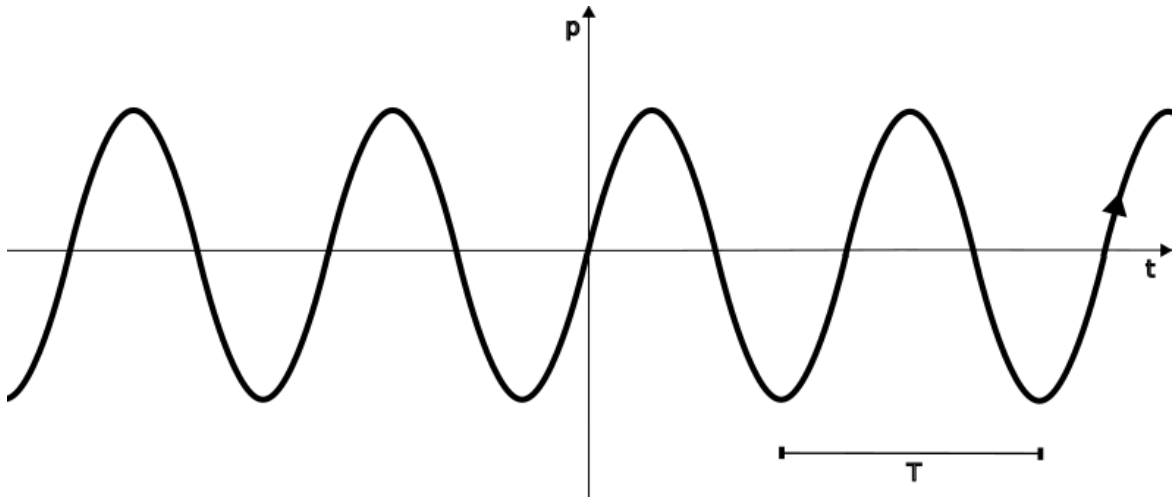
Den lastöverförande förmågan via spetsen beror av spänningarna i en volym av friktionjordarten omkring spetsen, som i sin tur beror av friktionjordartens friktionsvinkel. Denna lastöverförande förmågan via spetsen analyseras genom en effektivspänningsanalys [9] [10].

Faktorn som används specifikt för en effektivspänningsanalys av spetsen inom svensk beräkningsmetodik är bärighetskapacitetsfaktorn, N_q . Storleken av bärighetskapacitetsfaktorn, N_q , beror på vilken av effektivspänningsanalysmetoderna som tillämpas. Faktorn som används specifikt för en effektivspänningsanalys av spetsen inom dansk teori är bärighetskapacitetsfaktorn, N_q [10]. Denna bärighetskapacitetsfaktorn, N_q , skiljer sig från den svenska alternativa bärighetskapacitetsfaktorn, N_q .

Teorin för en friktionsburen påle gäller även för en spetsburen påle i ett fast bärlager. I detta fallet är dock andel av lasten som överförs av spetsen betydligt större än andelen av lasten som överförs av mantelytan [1]. Spetsburna pålar beaktas inte i detta examensarbete.

2.6 Vågmekanik

Vågor uppstår i ett mediums partiklar. Vågor kan uppstå både i ett medium som inte har ett skjuvmotstånd och i ett medium som har ett skjuvmotstånd. Grundvillkoren för att vågor ska uppstå är att mediet har en massa och att mediet är elastiskt. De elastiska krafterna söker återföra partiklarna till sina ursprungliga lägen när de förskjutits. Partiklarna håller sig följaktligen kvar vid sitt jämviktsläge medan rörelsen sprids vidare till partiklarna intill. I ett medium utan skjuvmotstånd sprids rörelsen endast vidare i utbredningsriktningen medan rörelsen i ett medium med skjuvmotstånd sprids vidare både i utbredningsriktningen och vinkelrätt mot utbredningsriktningen som en följd av skjuvhållfastheten. Vågor som endast har en rörelse i utbredningsriktningen kallas longitudinella vågor och vågor som även har en rörelse vinkelrätt mot utbredningsriktningen kallas transversella vågor. Både longitudinella vågor och transversella vågor kan beskrivas som en funktion, $p = f(t)$, enligt figur 2.12 [13].



Figur 2.12: Vågfunktion för longitudinella vågor och transversella vågor.

En vågs rumsliga längd i ett material fås av våglängden, λ , enligt [13]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.8)$$

där

c är utbreddningshastigheten i materialet och

f är frekvensen som kan beräknas enligt

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.9)$$

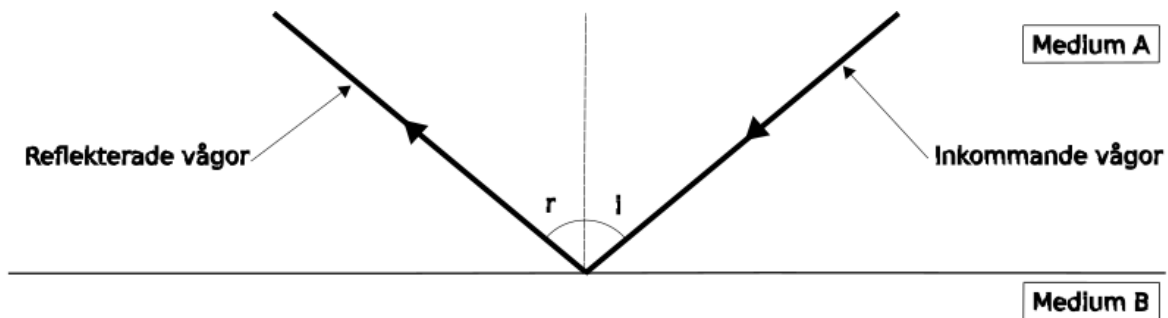
där

T är periodtiden enligt figur 2.12.

När vågor kommer till en gräns mellan två olika medium påverkas vågornas utbredningsriktning av vilka material de två olika mediumerna består av. Hur vågornas utbredningsriktning förändras mellan två olika mediums gräns kan beskrivas med reflektion, transmission eller absorption [14].

2.6.1 Reflektion

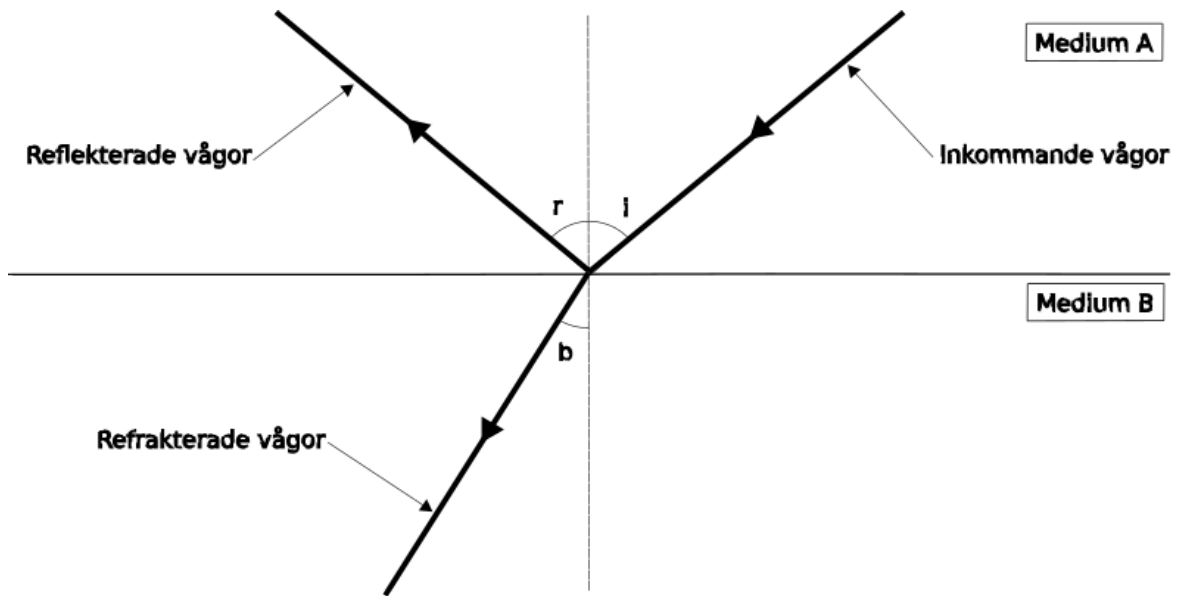
Reflektion innebär att vågor som transporteras i ett medium A reflekteras tillbaka i medium A när vågorna stöter på gränsen till ett medium B. Reflektionslagen säger att infallsvinkeln, i , är lika stor som reflektionsvinkeln, r [15]. Reflektionslagen illustreras i figur 2.13 .



Figur 2.13: Illustration av reflektionslagen för vågor.

2.6.2 Transmission

Transmission är motsatsen till reflektion. Transmission betyder att vågor fortsätter förbi gränsen mellan medium A och medium B vilket kallas för brytning. Ett tydligt exempel på transmission av vågor är när ljusvågor träffar ett fönster [14]. Brytningen ger en brytningsvinkel, b , i medium B som beror av utbredningshastigheten i medium A och medium B [15]. Hur stor andel av vågorna som transmitteras respektive reflekteras vid gränsen mellan medium A och medium B beror på vågornas egenskaper och på materialerna i medium A och medium B [14]. Brytningslagen, som lagen för fenomenet brytning kallas, illustreras i figur 2.14.



Figur 2.14: Illustration av brytningslagen för vågor.

Brytningslagens faktorer ges enligt

$$\frac{v_A}{v_B} = \frac{\sin i}{\sin b} \quad (2.10)$$

där

v_A är utbredningshastigheten i medium A,

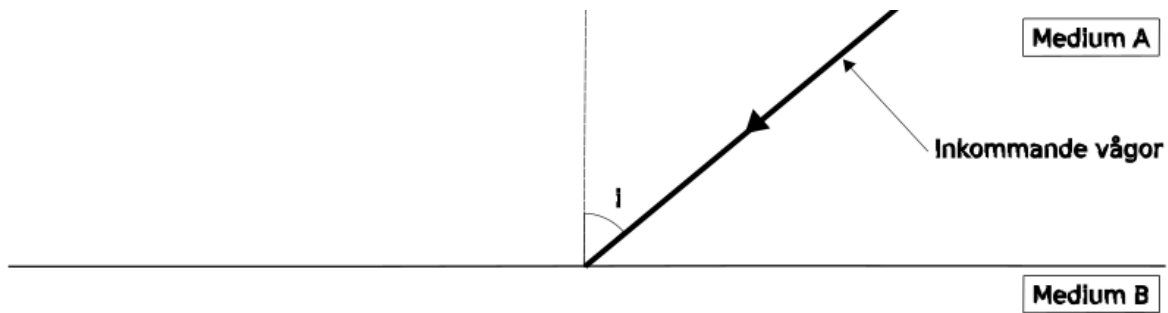
v_B är utbredningshastigheten i medium B,

i är infallsvinkeln i medium A och

b är brytningsvinkeln i medium B.

2.6.3 Absorption

Absorption sker när vågor varken reflekteras eller transmitteras när vågorna kommer till gränsen mellan två olika medium. Ett tydligt exempel på absorption av vågor är när vågorna träffar en strand. Det som sker är att vågornas energi lagras i strandens jordmaterial intill vattengränsen [14]. Absorptionsfenomenet illustreras i figur 2.15.



Figur 2.15: Illustration av absorption för vågor.

2.7 Säkerhetskontroller

Vid dimensionering mot brott kan en säkerhetskontroll ske antagligen med det icke-statistiska begreppet säkerhetsfaktor eller med det statistiska begreppet stokastiska variabler [16]. Säkerhetskontrollen med det statistiska begreppet stokastiska variabler benämns säkerhetsindex [1].

2.7.1 Säkerhetsfaktor

En säkerhetsfaktor n_s fås enligt

$$n_s = E/R \quad (2.11)$$

där

E är den uppmätta bärförmågan och

R är den beräknade bärförmågan.

2.7.2 Säkerhetsindex

Det finns diskreta stokastiska variabler och det finns kontinuerliga stokastiska variabler. Diskreta stokastiska variabler ger fördelningar med ett ändligt antal värden, det vill säga diskreta fördelningar. Kontinuerliga stokastiska variabler ger fördelningar med ett oändligt antal värden, det vill säga kontinuerliga fördelningar. För fallet med en belastad påle används den kontinuerliga fördelningen normalfördelning [16].

En normalfördelning av en kontinuerlig stokastisk variabel har ett förväntat värde, som kallas för väntevärde, och en förväntad avvikelse av värdet, som kallas för standardavvikelse. En normalfördelning är symmetrisk kring väntevärdet. Normalfördelningens väntevärde motsvarar följaktligen normalfördelningens medelvärde. En normalfördelningens standardavvikelser s , $2s$ och $3s$ avgör hur stor spridning 68.3 %, 95.4 % och 99.7 % av de statistiska fallen har från väntevärdet [16]. Standardavvikelsen, s , fås av

$$s = \sqrt{\sum_i (x_i - \mu)^2 P(\xi = x_i)} \quad (2.12)$$

där

ξ är den kontinuerliga stokastiska variabeln,

x_i är den kontinuerliga stokastiska variabelns värde,

$P(\xi = x_i)$ är sannolikheten för den kontinuerliga stokastiska variabelns värde och

μ är väntevärdet.

Ett säkerhetsindex, β , som är baserat på en normalfördelning med kontinuerliga stokastiska variabler, fås följaktligen enligt [1]

$$\beta = \frac{\mu_M}{s_M} \quad (2.13)$$

där

μ_M är differensen mellan den uppmätta bärförmågans väntevärde och den beräknade bärförmågans väntevärde och

s_M är standardavvikelsen för μ_M som kan beräknas enligt

$$s_M = \sqrt{s_r^2 + s_s^2} \quad (2.14)$$

där

s_r är standardavvikelsen för den uppmätta bärförmågan och

s_s är standardavvikelsen för den beräknade bärförmågan.

3 Metod

I detta kapitel presenteras först den svenska analytiska beräkningsmetodiken, den danska analytiska beräkningsmetodiken och den approximativa beräkningsmetodiken i PLAXIS 2D. Därefter presenteras mätningmetoden i CAPWAP som används för att ta fram säkerhetsfaktorer och säkerhetsindex för de analytiska beräkningsmetodikerna och den approximativa beräkningsmetodiken. Avslutningsvis presenteras säkerhetsfaktor-metodiken och säkerhetsindex-metodiken som används.

3.1 Analytisk beräkningsmetodik

I detta avsnitt presenteras de svenska och danska analytiska metoderna samt tillhörande korrelationskoefficienter och partialkoefficienter som används för att ta fram de analytiska bärförmågorna.

3.1.1 Svensk beräkningsmetodik för kohesionsjordarter

Inom svensk beräkningsmetodik genomförs för pålar i kohesionsjordarter en totalspänningsanalys och en effektivspänningsanalys. I rena kohesionsjordarter genomförs endast en totalspänningsanalys. För kohesionsjordarter med inslag av friktionjordarter genomförs både en totalspänningsanalys och en effektivspänningsanalys. Den minsta utav totalspänningsanalysen och effektivspänningsanalysen är dimensionerande [2].

För effektivspänningsanalysen används metoden utvecklad av Flaate & Selnes [1]. För totalspänningsanalysen används metoden utvecklad av pålkommissionen [11]. Det används dock även andra metoder regelbundet. En vanlig strategi är att olika metoder används och medelvärdet av alla metoder används.

För pålar i kohesionsjordarter inom svensk beräkningsmetodik räknas endast mantelytans bidrag till bärighetskapaciteten. Det vill säga spetsens bidrag till bärighetskapaciteten försummas [2].

Totalspänningsanalys av mantelytans bärighetskapacitet:

Den beräknade bärförmågan fås enligt

$$R_s = \alpha c_u A_s \quad (3.1)$$

där

A_s är arean för den överförande mantelytan,

c_u är jordens odränerade skjuvhållfasthet i mitten av det betraktade jordlagret och

α är en vidhäftningsfaktor som kan beräknas enligt

$$\alpha = \alpha_{okorr} K_D K_f K_T K_{OCR} \quad (3.2)$$

där

α_{okorr} är den okorrigerade vidhäftningsfaktorn, α_{okorr} sätts vanligtvis till 1.0 [11],

K_D är beroende av pålens diameter, K_D sätts till 0.9 för påldiametrar mellan 0.2 och 0.35 meter [11],

K_f är beroende av pålens form, K_f sätts till 1.0 för pålar med konstant tvärsnitt, till 1.2 för pålar med nedåt avtagande tvärsnitt och till mindre än 1.0 för pålar med nedåt tilltagande tvärsnitt [11],

K_T är beroende av vidhäftningsförmågan som beror av tiden efter installationen av pålen, K_T sätts till 1.0 en viss tid efter pålinstallationen [11] och

K_{OCR} är beroende av jordens överkonsolideringsgrad, OCR, som beskriver relationen mellan den största spänningen som en jord utsatts för och in situ spänningen, K_{OCR} sätts till 1 om $OCR < 1.25$ och till 0.4 om $OCR > 1.25$ [11].

Den karaktäristiska bärförmågan fås enligt

$$R_{k,i} = \frac{R_s}{(\gamma_{Rd} \cdot \xi_i / 1.1)} \quad (3.3)$$

där

γ_{Rd} är en partialkoefficient för modellosäkerheten vid en totalspänningsanalys enligt avsnitt 3.1.4 och

ξ_i är en av korrelationskoefficienterna ξ_3 och ξ_4 för geundersökningar enligt avsnitt 3.1.3.

Den dimensionerande bärförmågan fås enligt

$$R_d = \frac{R_{s,k,i}}{\gamma_s} \quad (3.4)$$

där

γ_s är en partialkoefficient för mantelytan av en påle enligt avsnitt 3.1.4.

Effektivspänningsanalys av mantelytans bärighetskapacitet:

Den beräknade bärförmågan fås enligt

$$R_s = A_s q'_s \beta \quad (3.5)$$

där

A_s är arean för den överförande mantelytan,

q'_s är den effektiva överlagringsspänningen i mitten av det betraktade jordlagret och

β är en mantelbärförmågefaktor som fås enligt

$$\beta = 0.4 u_L \sqrt{OCR} \quad (3.6)$$

$$u_L = \frac{(L + 20)}{(2L + 20)} \quad (3.7)$$

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{v0}} \quad (3.8)$$

där

L är pålens längd i meter,

σ'_c är den effektiva förkonsolideringsspänningen i mitten av det betraktade jordlagret, förkonsolideringsspänningen är den största spänningen som en jord utsatts för och

σ'_{v0} är den effektiva in situ spänningen i mitten av det betraktade jordlagret.

Den karaktäristiska bärförmågan fås enligt

$$R_{k,i} = \frac{R_s}{(\gamma_{Rd} \cdot \xi_i / 1.1)} \quad (3.9)$$

där

γ_{Rd} är en partialkoefficient för modellosäkerheten vid en effektivspänningsanalys enligt avsnitt 3.1.4 och

ξ_i är en av korrelationskoefficienterna ξ_3 och ξ_4 för geoundersökningar enligt avsnitt 3.1.3.

Den dimensionerande bärförmågan fås enligt

$$R_d = \frac{R_{t,k,i}}{\gamma_s} \quad (3.10)$$

där

γ_s är en partialkoefficient för mantelytan av en påle enligt avsnitt 3.1.4.

3.1.2 Svensk beräkningsmetodik för friktionsjordarter

Inom svensk beräkningsmetodik genomförs för pålar i friktionsjordarter en effektivspänningsanalys enligt metoden utvecklad av Meyerhof [1]. Det används dock även andra metoder regelbundet. En vanlig strategi är att olika metoder används och medelvärdet av alla metoder används.

För pålar i friktionsjordarter inom svensk beräkningsmetodik räknas både mantelytans och spetsens bidrag till bärlighetskapaciteten. Det vill säga den totala bärlighetskapaciteten för pålar i friktionsjordarter är summan av mantelytans bärlighetskapacitet och spetsens bärlighetskapacitet [1].

Effektivspänningsanalys av mantelytans bärlighetskapacitet:

Den beräknade bärförmågan fås enligt

$$R_s = A_s q'_s \beta \quad (3.11)$$

där

A_s är arean för den överförande mantelytan,

q'_s är den effektiva överlagringsspänningen i mitten av det betraktade jordlagret och

β är en mantelbärförmågefaktor som är beroende av pållängden och lagringstätheten, mantelbärförmågefaktorn varierar inom intervallet 0.11 till 0.35 [1].

Mantelbärförmågefaktorn, β , kan alternativt fås enligt

$$\beta = K_m \tan \delta \quad (3.12)$$

där

K_m är en jordtryckskoefficient och

δ är en friktionsvinkel mellan påle och jord.

Den karaktäristiska bärförmågan fås enligt

$$R_{k,i} = \frac{R_s}{(\gamma_{Rd} \cdot \xi_i / 1.1)} \quad (3.13)$$

där

γ_{Rd} är en partialkoefficient för modellosäkerheten vid en effektivspänningsanalys enligt avsnitt 3.1.4 och

ξ_i är en av korrelationskoefficienterna ξ_3 och ξ_4 för geundersökningar enligt avsnitt 3.1.3.

Den dimensionerande bärförmågan fås enligt

$$R_d = \frac{R_{t,k,i}}{\gamma_s} \quad (3.14)$$

där

γ_s är en partialkoefficient för mantelytan av en påle enligt avsnitt 3.1.4.

Effektivspänningsanalys av spetsens bärighetskapacitet:

Den beräknade bärförmågan fås enligt

$$R_b = A_b N_q q'_b \quad (3.15)$$

där

A_b är pålspetsens tvärsnittsarea,

q'_b är den effektiva överlagringsspänningen vid spetsen och

N_q är en bärförmågefaktor som är beroende av en friktionskoefficient, bärförmågefaktorn varierar inom intervallet 1 till 100 [1].

Den karaktäristiska bärförmågan fås enligt

$$R_{k,i} = \frac{R_s}{(\gamma_{Rd} \cdot \xi_i / 1.1)} \quad (3.16)$$

där

γ_{Rd} är en partialkoefficient för modellosäkerheten vid en effektivspänningsanalys enligt avsnitt 3.1.4 och

ξ_i är en av korrelationskoefficienterna ξ_3 och ξ_4 för geundersökningar enligt avsnitt 3.1.3.

Den dimensionerande bärförmågan fås enligt

$$R_d = \frac{R_{t,k,i}}{\gamma_b} \quad (3.17)$$

där

γ_b är en partialkoefficient för spetsen av en påle enligt avsnitt 3.1.4.

3.1.3 Svenska korrelationskoefficienter

När den beräknade bärförmågan är beräknad utifrån data från geotekniska undersökningar i fältet behöver två korrelationskoefficienter tags fram, ξ_3 och ξ_4 , för att avgöra den karaktäristiska bärförmågan. Korrelationskoefficienten ξ_3 är en konstant som appliceras på medelvärdet av de beräknade bärförmågorna och korrelationskoefficienten ξ_4 är en konstant som appliceras på minimivärdet av de beräknade bärförmågorna [2]. Både korrelationskoefficienterna, ξ_3 och ξ_4 , är beroende av antalet geotekniska undersökningar som skett i fältet. Detta illustreras i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Svenska korrelationskoefficienter.

Antalet Undersökningar:	1	2	3	4	5	7	≥ 10
ξ_3 :	1.40	1.35	1.33	1.31	1.29	1.27	1.25
ξ_4 :	1.40	1.27	1.23	1.20	1.15	1.12	1.08

Den minsta karaktäristiska bärförmågan av 3.18 och 3.19 ska användas för att ta fram den dimensionerande bärförmågan.

$$R_{k,3} = \frac{R_{medel}}{(\gamma_{Rd} \cdot \xi_3 / 1.1)} \quad (3.18)$$

$$R_{k,4} = \frac{R_{min}}{(\gamma_{Rd} \cdot \xi_4 / 1.1)} \quad (3.19)$$

3.1.4 Svenska partialkoefficienter

När bärförmågan är framtagen från en analytisk beräkningsmetodik behöver en partialkoefficient tillämpas på bärförmågan för att ta hänsyn till osäkerheter i den analytiska beräkningsmetodiken. Partialkoefficienterna presenteras i tabell 3.2. Värdena

på partialkoefficienterna har valts enligt Boverkets föreskrifter. α -metoden är en beteckning för en totalspänningsanalys och β -metoden är en beteckning för en effektivspänningsanalys. [2].

Tabell 3.2: Svenska partialkoefficienter.

Parameter	Slagna pålar	CFA och grävpålar
Bärförmågan vid spetsen, γ_b	1.30	1.40
Bärförmågan vid manteln, γ_s	1.30	1.40
Totala bärförmågan, γ_t	1.30	1.40
Bärförmågan för en dragen påle, $\gamma_{s,t}$	1.40	1.50
Modellfaktor för α -metoden, γ_{Rd}	1.10	1.10
Modellfaktor för β -metoden, γ_{Rd}	1.20	1.20

3.1.5 Dansk beräkningsmetodik för kohesionsjordarter

Inom dansk beräkningsmetodik genomförs för pålar i kohesionsjordarter en totalspänningsanalys. För både rena kohesionsjordarter och kohesionsjordarter med inslag av friktionsjordarter genomförs endast totalspänningsanalysen. Det vill säga det genomförs ingen effektivspänningsanalys för pålar i kohesionsjordarter som inom svensk beräkningsmetodik. För totalspänningsanalysen används metoden i boken Lærebog i Geoteknik [10].

För pålar i kohesionsjordarter inom dansk beräkningsmetodik räknas både mantelytans och spetsens bidrag till bärighetskapaciteten. Det vill säga den totala bärighetskapaciteten för pålar i kohesionsjordarter är summan av mantelytans bärighetskapacitet och spetsens bärighetskapacitet [10].

Totalspänningsanalys av mantelytans bärighetskapacitet:

Den beräknade bärförmågan fås enligt

$$R_b = A_s c_u m r \quad (3.20)$$

där

A_s är arean för den överförande mantelytan,

c_u är jordens odränerade skjuvhållfasthet i mitten av det betraktade jordlagret,

m är en materialfaktor som är beroende av ytans struktur, m sätts till 1 för trämaterial, till 0.9 för betong och till 0.7 för stål [10] och

r är en regenerationsfaktor som är beroende av jordmaterialet, r sätts till 1.2 för lös lera, till 1.0 för mjuk normalkonsoliderad lera och till 0.4 för fast moränlera [10].

Den karaktäristiska bärförmågan fås enligt

$$R_k = \frac{R_b}{\xi} \quad (3.21)$$

där

ξ är en korrelationskoefficient för geundersökningar enligt avsnitt 3.1.7.

Den dimensionerande bärförmågan fås enligt

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_s} \quad (3.22)$$

där

γ_s är en partialkoefficient för mantelytan av en påle enligt avsnitt 3.1.8.

Totalspänningsanalys av spetsens bärighetskapacitet:

Den beräknade bärförmågan fås enligt

$$R_b = n c_u A_b \quad (3.23)$$

där

n är en faktor som är beroende av kohesionsjordartens fasthet, n sätts till 9 för leror och till 18 för moränlera [10],

c_u är jordens odränerade skjuvhållfasthet vid spetsen och

A_b är pålspetsens tvärsnittsarea.

Den karaktäristiska bärförmågan fås enligt

$$R_k = \frac{R_b}{\xi} \quad (3.24)$$

där

ξ är en korrelationskoefficient för geundersökningar enligt avsnitt 3.1.7.

Den dimensionerande bärförmågan fås enligt

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_b} \quad (3.25)$$

där

γ_b är en partialkoefficient för spetsen av en påle enligt avsnitt 3.1.8.

3.1.6 Dansk beräkningsmetodik för friktionsjordarter

Inom dansk beräkningsmetodik genomförs för pålar i friktionsjordarter en effektivspänningsanalys. För effektivspänningsanalysen används metoden i boken Lærebog i Geoteknik [10].

För pålar i friktionsjordarter inom dansk beräkningsmetodik räknas både mantelytans och spetsens bidrag till bärighetskapaciteten. Det vill säga den totala bärighetskapaciteten för pålar i friktionsjordarter är summan av mantelytans bärighetskapacitet och spetsens bärighetskapacitet [10].

Effektivspänningsanalys av mantelytans bärighetskapacitet:

Den beräknade bärförmågan fås enligt

$$R_b = A_s q'_s N_m \quad (3.26)$$

där

A_s är arean för den överförande mantelytan,

q'_s är den effektiva överlagringsspänningen i mitten av det betraktade jordlagret och

N_m är en bärförmågefaktor som är beroende av den axiella belastningsriktningen, N_m sätts till 0.6 för tryckbelastade pålar och till 0.2 för dragbelastade pålar [10].

Den karaktäristiska bärförmågan fås enligt

$$R_k = \frac{R_b}{\xi} \quad (3.27)$$

där

ξ är en korrelationskoefficient för geundersökningar enligt avsnitt 3.1.7.

Den dimensionerande bärförmågan fås enligt

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_s} \quad (3.28)$$

där

γ_s är en partialkoefficient för mantelytan av en påle enligt avsnitt 3.1.8.

Effektivspänningsanalys av spetsens bärighetskapacitet:

Den beräknade bärförmågan fås enligt

$$R_b = 2A_b N_q q'_b \quad (3.29)$$

där

A_b är pålens spetsarea,

q'_b är den effektiva överlagringsspänningen vid spetsen och

N_q är en bärförmågefaktor som är beroende av friktionsvinkeln, bärförmågefaktorn varierar inom intervallet 1 och 140 [10].

Den karakteristiska bärförmågan fås enligt

$$R_k = \frac{R_s}{\xi} \quad (3.30)$$

där

ξ är en korrelationskoefficient för geundersökningar enligt avsnitt 3.1.7.

Den dimensionerande bärförmågan fås enligt

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_b} \quad (3.31)$$

där

γ_b är en partialkoefficient för spetsen av en påle enligt avsnitt 3.1.8.

3.1.7 Dansk korrelationskoefficient

När brottgränsen är beräknad utifrån en geoteknisk undersökning krävs en korrelationskoefficient, ξ . Korrelationskoefficienten, ξ , är inom dansk beräkningsmetodik en konstant som har värdet 1.5 [17].

3.1.8 Danska partialkoefficienter

När bärförmågan är framtagen från en analytisk beräkningsmetodik behöver en partialkoefficient tillämpas på bärförmågan för att ta hänsyn till osäkerheter i den analytiska beräkningsmetodiken. Partialkoefficienterna presenteras i tabell 3.3 [17].

Tabell 3.3: Danska partialkoefficienter.

Parameter	
Bärförmågan vid spetsen, γ_b	1.30
Bärförmågan vid manteln, γ_s	1.30
Totala bärförmågan, γ_t	1.30
Bärförmågan för en dragen påle, $\gamma_{s;t}$	1.30

3.2 PLAXIS 2D

PLAXIS 2D är ett numeriskt program avsett för geotekniska tillämpningar och är baserat på finita elementmetoden som ger en approximativ lösning av spänningsfördelningen. Teorin bakom finita elementmetoden kan studeras i t ex [8]. En approximativ lösning är en alternativ lösningsmetod till en analytisk lösning. PLAXIS 2D består av indata, beräkningar och utdata. Beräkningarna som ge utdatan kan utföras med ett flertal olika indatamodeller för jordens och materialens beteende [18].

3.2.1 Indata

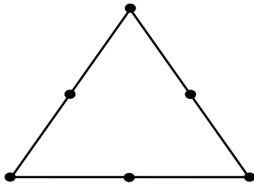
I indata fastställs först geometrmodellen och det finita elementnätet. Därefter fastställs materialmodeller och dräneringsvillkor. Avslutningsvis definieras materialegenskaper, elements geometri och randvillkor i det tvådimensionella planet i den valda geometrmodellen. Vid behov placeras gränssnitt ut emellan geometrier i den valda geometrmodellen.

Geometrmodell och det finita elementnätet

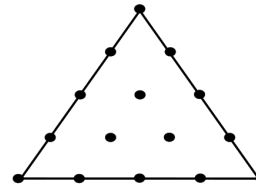
I PLAXIS 2D kan geometrmodellen modelleras antagligen som plan töjning eller som axialsymmetrisk. Geometrmodellen plan töjning används för strukturer med enhetliga tvärsnitt och geometrmodellen axialsymmetrisk används för cirkulära strukturer med enhetliga tvärsnitt. I geometrmodellen plan töjning är de tangentiella töjningarna noll på grund av symmetri medan geometrmodellen axialsymmetrisk tar hänsyn till tangentiella förskjutningar och töjningar. I detta examensarbete används följaktligen geometrmodellen axialsymmetrisk.

PLAXIS 2D genererar automatiskt ett finit elementnät av triangulära element med antingen 6 eller 15 noder [19]. Se figur 3.1 och figur 3.2. I detta examensarbete används

15 noder.



Figur 3.1: Illustration av ett 6-nods element i ett elementnät.



Figur 3.2: Illustration av ett 15-nods element i ett elementnät.

Materialmodeller och dräneringsvillkor

I PLAXIS 2D finns det ett stort antal materialmodeller för jord. För en lista över alla materialmodeller för jord hänvisas läsaren till PLAXIS 2D-manualen av Bentley [18]. För en första analys i PLAXIS 2D av jorden rekommenderas att materialmodellen Mohr-Coulomb för jord används. Teorin för denna materialmodell presenterades i kapitel 2 avsnitt 2.4. Vid behov görs en eller flera analyser med mer avancerade materialmodeller för jord. För en analys i PLAXIS 2D av pålen rekommenderas att materialmodellen linjär elastisk för jord används med en anpassad styvhet som simulerar pålens material ifall man i första hand är intresserad av reaktionen i jordlagerna. Teorin för denna materialmodell presenterades i kapitel 2 avsnittet 2.3. Om man i första hand är intresserad av reaktionerna i pålen kan man istället använda ett balkelement när man modellerar pålens geometri i det tvådimensionella planet. I detta fallet kan man avläsa snittkrafter längs pålen. För mer information om detta hänvisas till PLAXIS-2D manualen av Bentley [18].

I PLAXIS 2D finns det vid fallet att jorden är odränerad tre alternativa kompletterande dräneringsmodeller till materialmodellen [19]. De dräneringsmodeller som används i detta examensarbetet redovisas i kapitel 4 avsnitt 4.2. De tre alternativa dräneringsmodellerna som finns är de följande

Dräneringsmodell A:

I denna dräneringsmodell används en effektivspänningsmodell med effektiva styvhetsparametrar och effektiva styrkeparametrar. Som ingångsparameter i denna dräneringsmodell används ϕ' och eventuellt c' . Porvattnet genererar ett portryck i denna dräneringsmodellen.

Dräneringsmodell B:

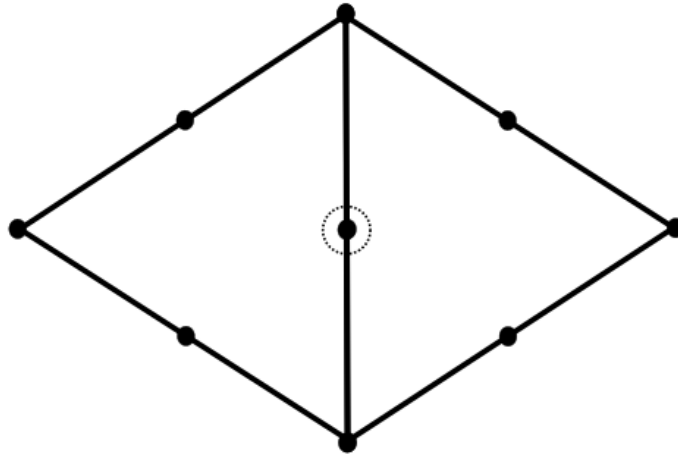
I denna dräneringsmodell används en effektivspänningsmodell med effektiva styvhetsparametrar och odränerade styrkeparametrar. Som ingångsparameter i denna dräneringsmodell används c_u . Porvattnet genererar ett portryck i denna dräneringsmodellen.

Dräneringsmodell C:

I denna dräneringsmodell används en totalspänningsmodell med odränerade styvhetsparametrar och odränerade styrkeparametrar. Som ingångsparameter i denna dräneringsmodell används c_u . Porvattnet genererar inte ett portryck i denna dräneringsmodellen.

Gränssnitt

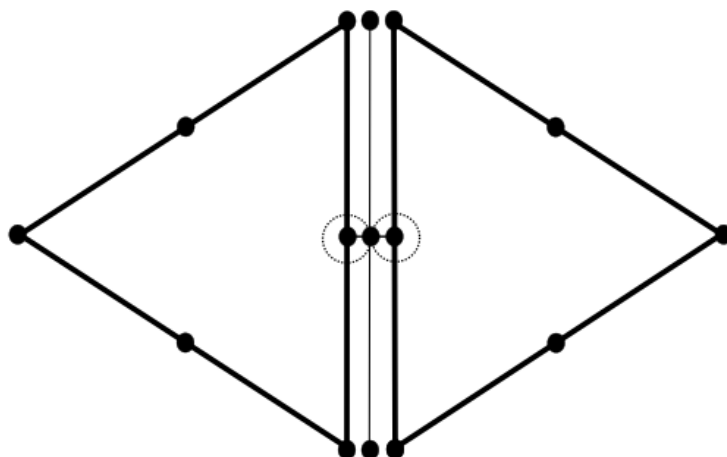
Syftet med att införa ett gränssnitt är att interaktionen mellan två element ska ändras. Utan gränssnitt delar närliggande element kantnoder med varandra och interaktionen är stel enligt figur 3.3. Med gränssnitt skapas en rad noder emellan två elements kantnoder och detta leder till en interaktion som gör förskjutning emellan två element möjligt. Förskjutningen blir möjlig eftersom två nodpar bildas enligt de streckade cirklarna i figur 3.4 [20].



Figur 3.3: Illustration av noders verkningsätt utan ett gränssnitt.

3.2.2 Utdata

I utdatan presenteras förskjutningarna och spänningarna som blivit genererade vid varje randvillkor i beräkningsprocessen. Utdatan presenteras i en egen modul. Man kan illustrera utdatan på flera olika sätt t.ex. så kan man välja att illustrera förskjutningarna för ett specifikt randvillkor i form av ett deformerat finita elementnät eller i form av en nodtabell. I detta examensarbete presenteras förskjutningarna och spänningarna i formen deformerat finita elementnät. Teckenkonventionen för spänningarna i PLAXIS 2D följer inte den allmänna teckenkonventionen för spänningar i jordmaterial. PLAXIS 2D följer i stället den allmänna teckenkonventionen för spänningar i materialmekanik det vill säga tryckspänningar betecknas som negativa och dragspänningar betecknas som positiva [19].



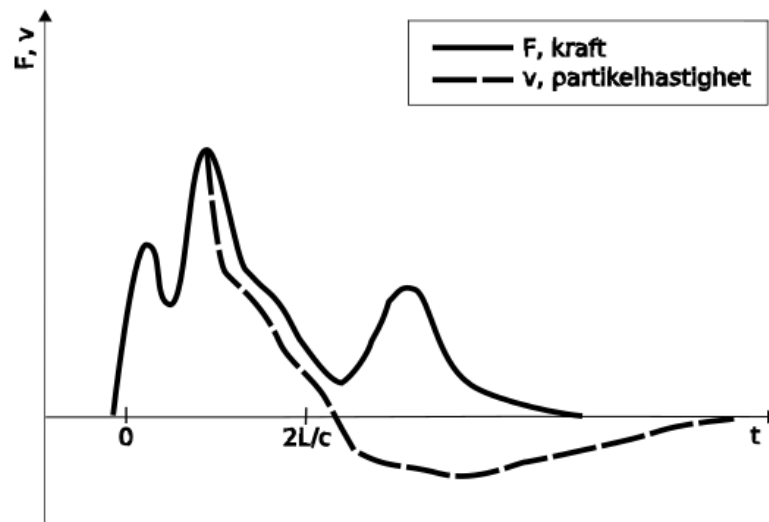
Figur 3.4: Illustration av noders verkningsätt med ett gränssnitt.

3.3 CAPWAP-mätning

I detta avsnitt presenteras programmet baserat på vågmekanik som används för att få fram den uppmätta bärförmågan. Detta program heter CAPWAP. En CAPWAP-mätning sker med hjälp av en stötvågsmätning. Vid en stötvågsmätning mäts initialvågen i pålen och reflekterade stötvågor i pålen och jorden. Vågorna genereras genom att pålen utsätts för en stöt från en fallhejare. Stötvågen kommer att reflekteras som en tryckvåg i pålen under förutsättning att spetsen står mot fast grund där spetsmotstånd förekommer. Stötvågen kommer att reflekteras som en dragvåg i pålen ifall spetsen står i lös jord där spetsmotstånd inte förekommer. Stötvågen kommer även att reflekteras som en tryckvåg i pålen på grund av mantelmotståndet. Stötvågsmätningen ger underlag för att ta fram pålens statiska bärförmåga genom att stötvågsmätningen ger kraft- och partikelhastighetskurvor som funktion av tiden. Dessa kurvor illustreras i figur 3.5 [1].

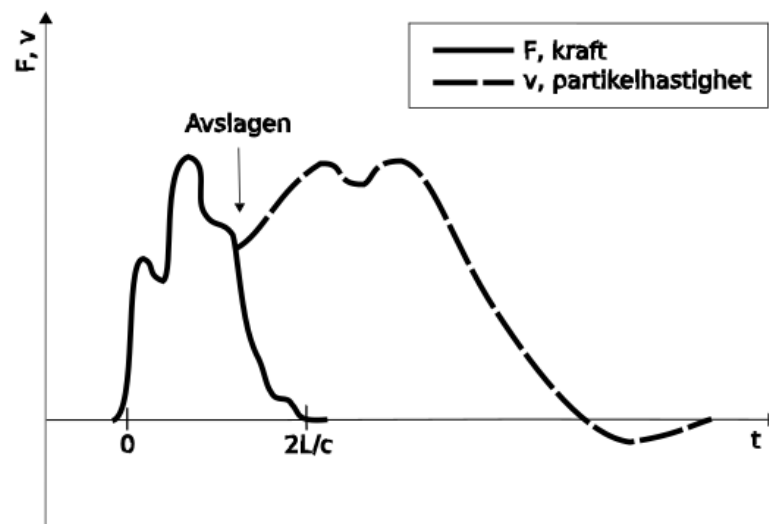
Utrustningen som används för att ta fram dessa kraft- och partikelhastighetskurvor är en påslagningsanalysator med oscilloskop, en töjningsgivare, en accelerometer, en plotter och en bandspelare. Töjningsgivaren och accelerometern är i ena änden fastskruvade till pålspetsen ovanför markytan och i andra änden kopplade till påslagningsanalysatorn. Pålspetsen rekommenderas vara placerad 1 meter ovanpå markytan för att ge ett korrekt resultat. Töjningsgivaren och accelerometern används för att tolka vågsignalerna i pålen och följaktligen ge information om pålens kraft- och partikelhastighet i påslagningsanalysatorn. Töjningsgivaren ger kraften genom ett konstitutivt samband enligt avsnitt 2.3. Det konstitutiva sambandet i avsnitt 2.3.1 är ett av de konstitutiva sambanden som kan användas för betong. Accelerometern ger partikelhastigheten. Plottern och bandspelaren är också kopplade till påslagningsanalysatorn. Plottern används för att i oscilloskopet i påslagningsanalysatorn rita upp kraft- och partikelhastighetskurvorna som funktion av tiden och bandspelaren används för att

kunna lagra kraft- och partikelhastighetskurvorna [1].



Figur 3.5: Kraft- och hastighetskurvor där F står för kraften, v står för partikelhastigheten, t står för tiden, L står för avståndet mellan givarplacering och pålspets och c står för stötvågens utbredningshastighet i pålen.

För att kurvorna i figur 3.5 ska uppstå vid en stötvågsmätning förutsätts dock att pålen inte har knäckts av kraften genererad av fallhejaren. Ifall pålen knäcks vid en stötvågsmätning uppstår istället kurvorna illustrerade i figur 3.6 [1].

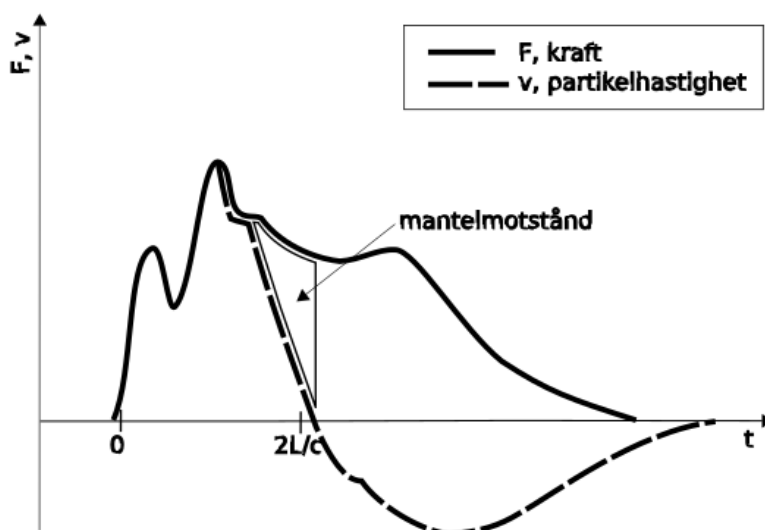


Figur 3.6: Brottillustration i kraft- och hastighetskurvor.

Genom en CAPWAP-mätning kan den statiska bärförmågan tas fram utifrån kraft- och partikelhastighetskurvorna. En CAPWAP-mätning innebär en signalmatchning av kraft- och partikelhastighetskurvorna genererade i påslagningsanalysatorn. Kraft- och partikelhastighetskurvorna genererade i påslagningsanalysatorn överförs till en dator där signalmatchningen genomförs med datorprogrammet CAPWAP [1].

Signalmatchningen genomförs genom att pålen delas in i element med antagna statistiska bärförmågor, som modelleras med fjädringar och viskösa dämpningar med antagna egenskaper. De antagna parametrarnas egenskaper i alla elementen används för att beräkna kraften i pålens topp. Denna beräkning av kraften i pålens topp genomförs med hjälp av den uppmätta partikelhastigheten som funktion av tiden som generades av fallhejaren i stötvågsmätningen. Detta ger den beräknade kraften i pålens topp som en funktion av tiden. Den beräknade kraften jämförs med den uppmätta kraften som generades av fallhejaren i stötvågsmätningen. Ett iterativt beräkningsförfarande där de antagna parametrarna i elementen varieras pågår tills den beräknade kraften i pålens topp och den uppmätta kraften i pålens topp stämmer överens under hela tidsförloppet. När den beräknade kraften och den uppmätta kraften stämmer överens bedöms de antagna parametrarna i elementen vara korrekta [1].

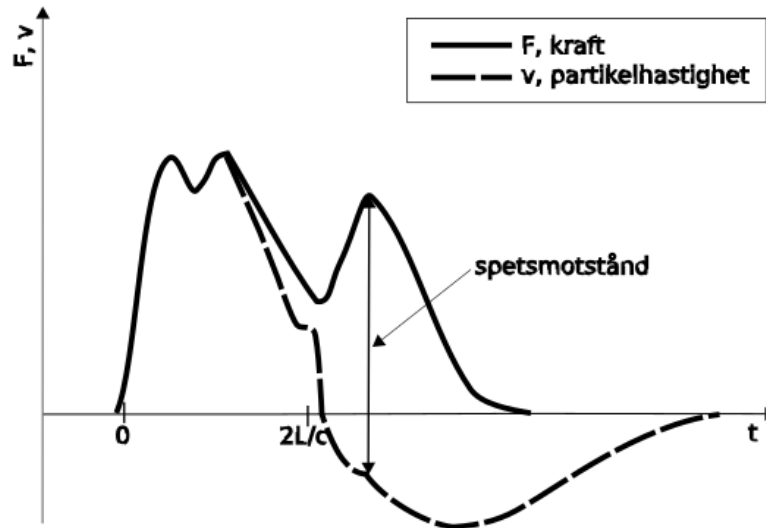
En CAPWAP-mätning resulterar i bra information om den statistiska bärförmågans fördelning mellan mantel och spets. Det vill säga det ges utöver ett resultat för den totala pålen även ett resultat för endast mantelbidraget och ett resultat för endast spetsbidraget. Den statistiska bärförmågans fördelning på mantel och spets avläses ur kraft- och partikelhastighetskurvorna. I fallet presenterat i figur 3.7 är den statistiska bärförmågans fördelning på manteln stor och i fallet presenterat i figur 3.8 är den statistiska bärförmågans fördelning på spetsen stor. När den största andelen av den statistiska bärförmågan fördelas på manteln så är avståndet mellan kraftkurvan och partikelhastighetskurvan större efter de initiala krafttopparna där kraftkurvan och partikelhastighetskurvan överensstämmer. När den största andelen av den statistiska bärförmågan fördelas på spetsen så förekommer en kraftig ökning av kraftkurvan efter de initiala krafttopparna där kraftkurvan och partikelhastighetskurvan överensstämmer [1].



Figur 3.7: Illustration av ett stort mantelmotstånd i kraft- och hastighetskurvor.

3.3.1 Korrelationskoefficienter

När brottgränsen är uppmätt utifrån en CAPWAP-mätning behöver två korrelationskoefficienter tags fram, ξ_5 och ξ_6 . Korrelationskoefficienten, ξ_5 , är en konstant som



Figur 3.8: Illustration av ett stort spetsmotstånd i kraft- och hastighetskurvor.

appliceras på medelvärdet, R_{medel} , av CAPWAP-mätningarna och korrelationskoefficienten, ξ_6 , är en konstant som appliceras på minimivärdet, R_{min} , av CAPWAP-mätningarna. Både korrelationskoefficienterna beror på antalet CAPWAP-mätningar. [2]. Detta förfarande gäller för båda ländernas beräkningsmetodik. Korrelationskoefficienterna illustreras för svensk beräkningsmetodik i tabell 3.4 och för dansk beräkningsmetodik i tabell 3.5.

Tabell 3.4: Svenska korrelationskoefficienter som beror på antalet CAPWAP mätningar [2].

Antalet mätningar:	3	4	≥ 5	≥ 10	≥ 15	≥ 20	≥ 40
ξ_5 :	1.60	1.55	1.50	1.45	1.40	1.35	1.30
ξ_6 :	1.50	1.45	1.35	1.30	1.25	1.25	1.25

Tabell 3.5: Danska korrelationskoefficienter som beror på antalet CAPWAP mätningar [21].

Antalet mätningar:	≥ 2	≥ 5	≥ 10	≥ 15	≥ 20
ξ_5 :	1.60	1.50	1.45	1.42	1.40
ξ_6 :	1.50	1.35	1.30	1.25	1.25

Det minsta karaktäristiska värdet av de följande två formlerna ska följaktligen användas som det karaktäristiska värdet.

$$R_{k,5} = \frac{R_{medel}}{\xi_5} \quad (3.32)$$

$$R_{k,6} = \frac{R_{min}}{\xi_6} \quad (3.33)$$

3.4 Säkerhetskontroller

I detta avsnitt presenteras de säkerhetsfaktorer och säkerhetsindex som används. Säkerhetsfaktorer är numera den vanligaste metoden för att kontrollera säkerheten inom geoteknik men för helhetens skull presenteras även säkerhetsindex. Fyra varianter av säkerhetsfaktorer används för att kunna jämföra hur ländernas korrelationskoefficienter och partialkoefficienter påverkar säkerhetsfaktorerna under beräkningsgången.

3.4.1 Säkerhetsfaktorer

Nedan presenteras de fyra olika säkerhetsfaktorerna som används i detta examensarbete.

Den första säkerhetsfaktoren, $n_{s,1}$, fås enligt

$$n_{s,1} = \frac{E_1}{R_1} \quad (3.34)$$

där

E_1 är värdet av CAPWAP-mätningarna utan korrelationskoefficient och

R_1 är den beräknade bärförmågan.

Den andra säkerhetsfaktoren, $n_{s,2}$, fås enligt

$$n_{s,2} = \frac{E_2}{R_1} \quad (3.35)$$

där

E_2 är värdet av CAPWAP-mätningarna med korrelationskoefficient och

R_1 är den beräknade bärförmågan.

Den tredje säkerhetsfaktor, $n_{s,3}$, fås enligt

$$n_{s,3} = \frac{E_2}{R_2} \quad (3.36)$$

där

E_2 är värdet av CAPWAP-mätningarna med korrelationskoefficient och

R_2 är den karaktäristiska bärförmågan.

Den fjärde säkerhetsfaktoren, $n_{s,4}$, fås enligt

$$n_{s,4} = \frac{E_2}{R_3} \quad (3.37)$$

där

E_2 är värdet av CAPWAP-mätningarna med korrelationskoefficient och

R_3 är den dimensionerande bärförmågan.

3.4.2 Säkerhetsindex

Det säkerhetsindexet, β som används i detta examensarbete fås enligt

$$\beta = \frac{\mu_M}{s_M} \quad (3.38)$$

där

μ_M är differensen mellan värdet av CAPWAP-mätningarna med korrelationskoefficient och den dimensionerande bärförmågan och

s_M är standardavvikelsen för μ_M som kan beräknas enligt

$$s_M = \sqrt{s_r^2 + s_s^2} \quad (3.39)$$

där

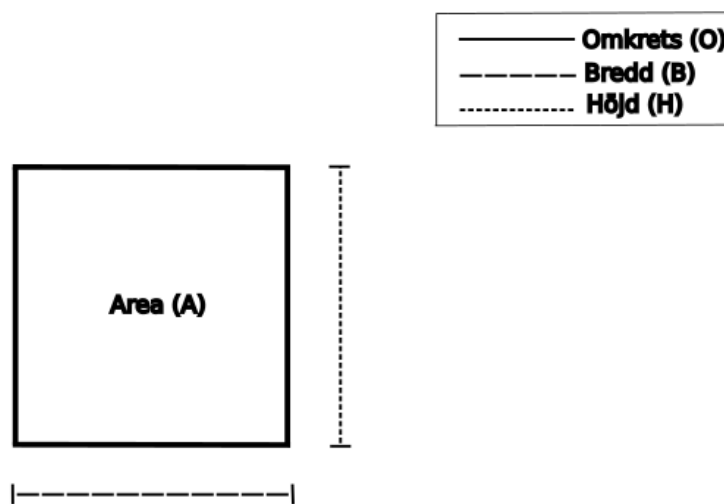
s_r är standardavvikelsen för CAPWAP-mätningarna med korrelationskoefficient och

s_s är standardavvikelsen för den dimensionerande bärförmågan som sätts till noll.

4 Referensprojekt

I detta kapitel presenteras referensprojektet som är ett husbyggnadsprojekt med slagna betongpålar i Danmark. Husbyggnaden ska konstrueras vid hamnområdet Nordhavn som ligger vid Öresunds kust. Det geotekniska underlaget för husbyggnadsprojektet har tillhandahållits av de ansvariga oidentifierade firmorna. Det geotekniska underlaget består av pålgeometri, lagerparametrar, spänningar, grundvattennivå och capwap mätningar. I tabell 4.1 - 4.3 och i figur 4.1 ges det geotekniska underlaget. Grundvattennivån i rådande markförhållanden har i husbyggnadsprojektet antagits ligga vid marknivån. CAPWAP mätningarna som tillhandahölls vid ett senare skede i examensarbetet ligger som en del av resultatet i kapitel 5.

Jordarna som förekommer vid det aktuella hamnområdet är fyllnadsjord, sand och lera ovanpå lermorän. Husbyggnadens grundarea är 1000 m^2 och de slagna betongpålarna placeras med det minsta c/c -avståndet tre pålbredder. Med detta minsta c/c -avståndet bedöms pålarnas vikt inte påverkar varandra. Pålarna är kvadratiska och har pålbredden 350 mm . Pålarna är slagna till djupet, z , -12 m och pålarnas totala längd, L , är 13 m det vill säga 1 m av pålarnas längd, L , är ovanför markytan. Nedan presenteras geometrin för pålens tvärsnitt.



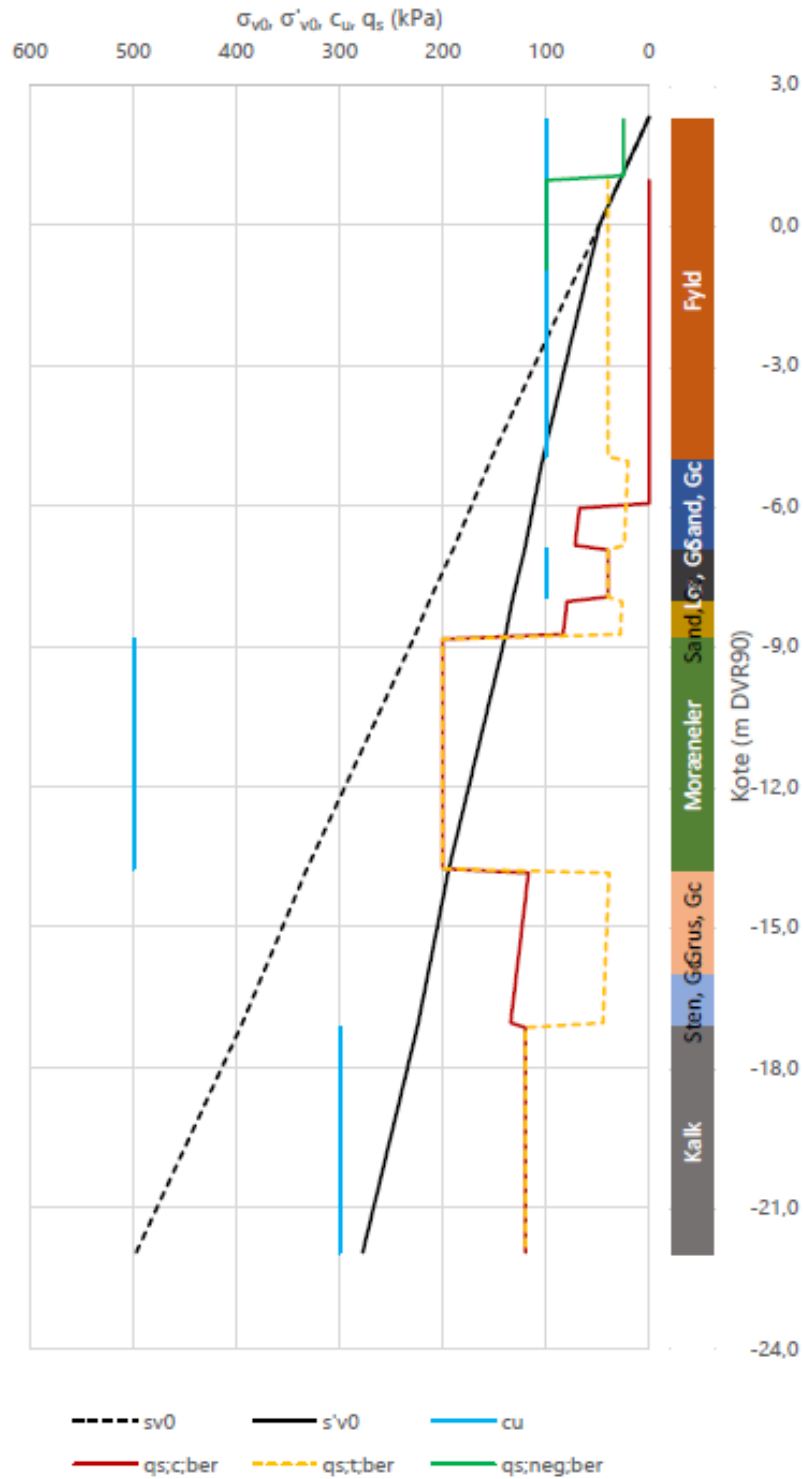
Figur 4.1: Illustration av geometrin för pålens tvärsnitt.

Tabell 4.1: Illustration av måtten för pålens tvärsnitt.

B [mm]	H [mm]	O [mm]	A_b [mm ²]
350	350	1400	122500

Tabell 4.2: Lagerparametrar.

Lager	z [m]	γ [kN/m ³]	γ_m [kN/m ³]	c_u [kPa]	ϕ' [°]	σ_c [MPa]
1. Fyllnadsjord	0 till -5	21	21	100	0	-
2. Sand	-5 till -6.9	19	19	0	38	28.5
3. Ler	-6.9 till -8	21	21	100	0	33.6
4. Sand	-8 till -8.8	19	19	0	38	-
5. Moränlera	-8.8 till -13.8	21	21	500	0	-
6. Grus	-13.8 till -16	19	19	0	38	36.2
7. Sten	-16 till -17.1	19	19	0	38	-
8. Kalk	-17.1 till -22.0	21	21	300	0	-



Figur 4.2: Spänningarna framtagna från den geotekniska undersökningen - I utvärderingen används de följande av spänningarna: σ_{v0} , som är in situ spänningen. s'_{v0} som är den effektiva in situ spänningen. c_u som är den odränerade skjuvhållfastheten. Och q_s som är överlagringsspänningen.

4.1 Referensprojekt i analytisk beräkningsmetodik

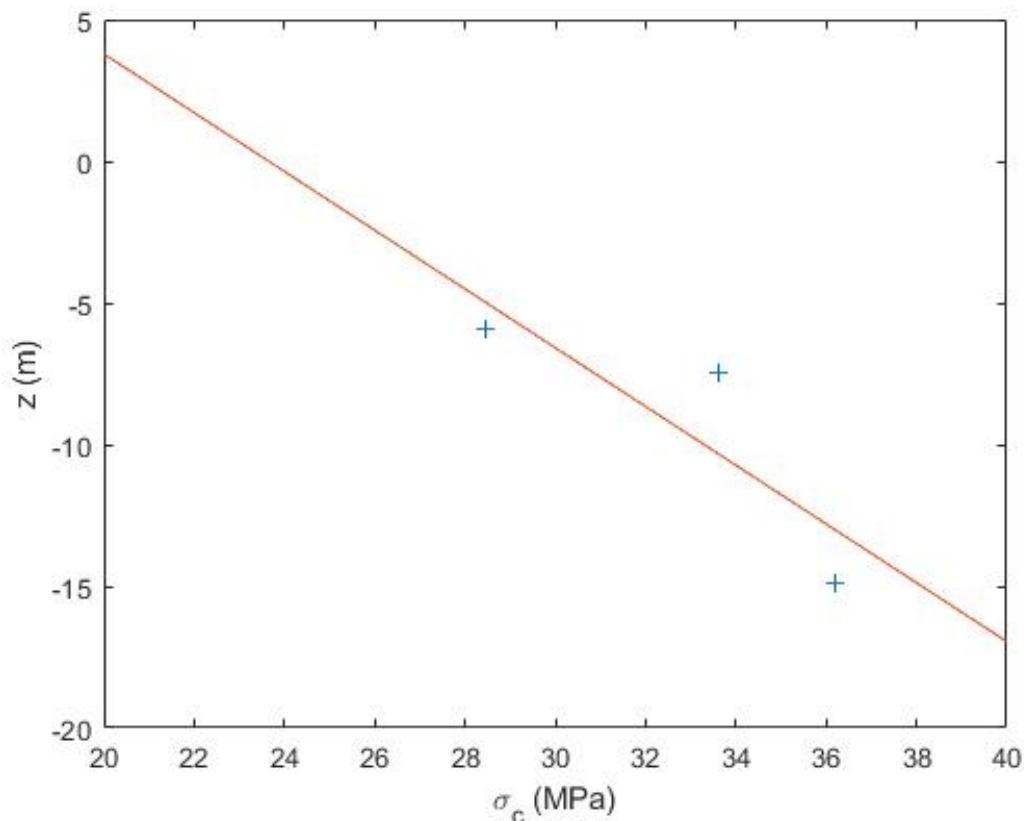
I de analytiska beräkningar görs vissa uppskattningar utifrån referensprojektet. Längden antogs vara 12 meter istället för 13 meter, det vill säga längden ovanför markytan försummas i beräkningsmodellen. Förkonsolideringsspänningen antas öka linjärt precis som in situ spänningen. Den linjära förkonsolideringsspänningen för de två skikten med okänd förkonsolideringsspänning tas följaktligen fram utifrån de tre uppmätta förkonsolideringsspänningarna enligt tabell 4.3 med minsta kvadratmetoden genom användning av MATLAB-funktionen polyfit. Denna MATLAB-funktionen ger den linjära förkonsolideringsspänningsfunktionen. Den linjära förkonsolideringsspänningen, σ_c , i en godtycklig punkt fås följaktligen enligt

$$\sigma_c = \frac{z - 24.5291}{-1.0368} \quad (4.1)$$

där

z är en godtycklig vertikal punkt längs den linjära överkonsolideringsspänningsfunktionen.

En illustration av den framtagna linjära förkonsolideringsspänningsfunktionen ges i figur 4.2.



Figur 4.3: Den linjära förkonsolideringsspänningsfunktionen.

De olika skiktens förkonsolideringsspanning sätts som medelvärdet av den linjära ökningen av förkonsolideringsspanningen i respektive skikt. Bortsett från de tre skikten med uppmätta förkonsolideringsspanningarna som få ha kvar de uppmätta värdena för förkonsolideringsspanningen enligt tabell 4.2. Samma förfarande gäller för spänningarna i figur 4.1 det vill säga de olika skiktens spänningar sätts som medelvärdet av den linjära ökningen av respektive spänningen i respektive skikt.

I de analytiska beräkningarna krävs dessutom ett flertal faktorer utöver uppgifterna från referensprojektet. Dessa faktorer kan tags fram utifrån uppgifterna givna om pålgeometri, pålmaterial och jordmaterial i referensprojektet.

I tabell 4.3 - 4.8 ges alla faktorerna som används till de sex olika analytiska beräkningarna som presenterades i kapitel 3.

Tabell 4.3: Faktorer för totalspänningsanalysen och effektivspänningsanalysen av mantelytan för kohesionsjord med svensk beräkningsmetodik enligt avsnitt 3.1.1.

Lager	L [m]	A_s [m ²]	c_u [kPa]	q'_s [kPa]	σ'_{v0} [kPa]	σ'_c [MPa]
1. Fyllnadsjord	5	7	100	0	50	0
3. Ler	1.1	1.5	100	50	120	33.6
5. Moränlera	3.2	4.5	500	200	170	34.6

Tabell 4.4: Korrektionsfaktorer för totalspänningsanalysen av mantelytan för kohesionsjord med svensk beräkningsmetodik enligt avsnitt 3.1.1.

α_{okorr} [-]	K_d [-]	K_f [-]	K_t [-]	K_{ocr} [-]
1	0.9	1	1	0.4

Tabell 4.5: Faktorer för effektivspänningsanalysen av mantelytan för friktionsjord med svensk beräkningsmetodik enligt avsnitt 3.1.2.

Lager	A_s [m ²]	q'_s [kPa]	β [-]
2. Sand	2.7	70	0.3
4. Sand	1.1	80	0.3

Tabell 4.6: Faktorer för totalspänningsanalysen av mantelytan för kohesionsjord med dansk beräkningsmetodik enligt avsnitt 3.1.5.

Lager	A_s [m ²]	c_u [kPa]	m [-]	r [-]
1. Fyllnadsjord	7	100	0.9	0.4
3. Ler	1.5	100	0.9	0.4
5. Moränlera	4.5	500	0.9	0.4

Tabell 4.7: Faktorer för totalspänningsanalysen av spetsen för kohesionsjord med dansk beräkningsmetodik enligt avsnitt 3.1.5.

Lager	n [-]	c_u [kPa]	A_b [mm ²]
5. Moränlera	18	500	122500

Tabell 4.8: Faktorer för effektivspänningsanalysen av mantelytan för friktionsjord med dansk beräkningsmetodik enligt avsnitt 3.1.6.

Lager	A_s [m ²]	q'_s [kPa]	N_m [-]
2. Sand	2.7	70	0.6
4. Sand	1.1	80	0.6

4.2 Referensprojekt i PLAXIS 2D

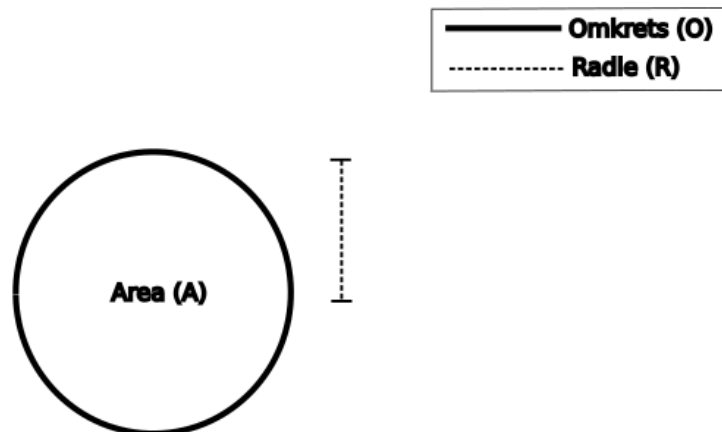
I PLAXIS 2D görs vissa uppskattningar utifrån referensprojektet. Längden antas vara 12 meter istället för 13 meter, det vill säga längden ovanför markytan försummas i beräkningsmodellen.

I referensprojektet används pÅlar med kvadratisk tvÄrsnitt men för att kunna simulera pÅlarna med en axisymmetrisk beräkning antas pÅlarna i den ena uppskattningen ha en cirkulär tvÄrsnittsytan med samma omkrets som den kvadratiske pÅlen i referensprojektet. I den andra uppskattningen antas pÅlarna ha en cirkulär tvÄrsnittsytan med samma area som den kvadratiske pÅlen i referensprojektet. Detta ger två olika radieparametrar r och följaktligen två axialsymmetrisk modeller med en identisk höjdparameter h . Dessa uppskattningar relaterat till den kvadratiske tvÄrsnittsytan ger en axialsymmetrisk modell som tar hänsyn till mantelbÄrigheten och en modell som tar hänsyn till spetsbÄrigheten.

Dessa uppskattningar relaterat till den kvadratiske tvÄrsnittsytan ger en axialsymmetrisk modell pÅ den osÄkra sidan och en axialsymmetrisk modell pÅ den sÄkra sidan. Den axialsymmetrisk modellen som har samma tvÄrsnittsomkrets som den verkliga

kvadratiska tvärsnittsomkretsen är på den osäkra sidan. Detta eftersom denna axial-symmetriska modellen får en tvärsnittsarea som är större än den verkliga kvadratis-ka tvärsnittsarean. Den axialsymmetriska modellen som har samma tvärsnittsarea som den verkliga kvadratiska tvärsnittarean är på den säkra sidan. Detta eftersom den-na axialsymmetriska modellen får en tvärsnittsomkrets som är mindre än den verkliga kvadratiska tvärsnittsomkretsen vilket ger en mindre mantelyta.

I PLAXIS 2D krävs dessutom andra faktorer utöver faktorerna från referensprojektet. De andra faktorerna som krävs för respektive skikt är tvärkontraktionstal, ν , dilatans-vinkel, ψ och elasticitetsmodul, E . Tvärkontraktionstalen antas alla till 0.3 vilket kan anses vara ett medelvärde av olika jordmaterials tvärkontraktionstal. Dilatansvinkeln antas till 0 eftersom detta är på säkra sidan. Elasticitetsmodulerna antas till prax-is värden för olika jordmaterial enligt pålgrundläggningshandboken [1]. Lagerna ovan moränleran, det vill säga fyllnadsjord, sand och ler antas vara löst packade med ett konservativt värde. Detta ger en bärförmåga på säkra sidan för manteln. Moränleran antas vara hårt packad med ett konservativt värde. Ler och moränlera hade dock inte ett elasticitetsmodulvärde i den aktuella tabellen. Däremot fanns elasticitetsmodul för silt och moränsand i den aktuella tabellen. Följaktligen antogs elasticitetsmodulvärdet för ler som elasticitetsmodul för silt och elasticitetsmodulvärdet för moränlera som elasticitetsmodul för moränsand. Nedan presenteras geometrin för pålens tvärsnitt.



Figur 4.4: Illustration av geometrin för pålens tvärsnitt.

Tabell 4.9: Illustration av måtten för pålens tvärsnitt för de två uppskattningarna av tvärsnittsarean.

Pålgeometri	r [mm]	O [mm]	A_b [mm ²]
1	223	1400	156228
2	197	1238	122500

I tabell 4.10 - 4.13 presenteras övriga faktorer som används till de två PLAXIS 2D beräkningarna.

Tabell 4.10: Jordgeometrierna och jordtyngderna enligt avsnitt 4 som antages gälla med radien 6 meter omkring pålen.

Lager	z [m]	γ [kN/m ³]	γ_m [kN/m ³]
1. Fyllnadsjord	0 till -5	21	21
2. Sand	-5 till -6.9	19	19
3. Ler	-6.9 till -8	21	21
4. Sand	-8 till -8.8	19	19
5. Moränlera	-8.8 till -13.8	21	21
6. Grus	-13.8 till -16	19	19
7. Sten	-16 till -17.1	19	19
8. Kalk	-17.1 till -22.0	21	21

Tabell 4.11: Pålens betongparametrar.

E [kPa]	ν [-]	γ [kN/m ³]
30 000 000	0.2	25

Tabell 4.12: Materialmodeller och dräneringsmodeller enligt avsnitt 3.2.2.

Lager	Materialmodell	Dräneringsmodell
1. Fyllnadsjord	Mohr-Coulombs	Odränerad (B)
2. Sand	Mohr-Coulombs	Odränerad (A)
3. Ler	Mohr-Coulombs	Odränerad (B)
4. Sand	Mohr-Coulombs	Odränerad (A)
5. Moränler	Mohr-Coulombs	Odränerad (B)
6. Grus	Mohr-Coulombs	Odränerad (A)
7. Sten	Mohr-Coulombs	Odränerad (A)
8. Kalk	Mohr-Coulombs	Odränerad (B)

Tabell 4.13: Materialmodellparametrar som används för spänningen enligt avsnitt 2.4.

Lager	E [kPa]	ν [-]	ψ [°]	c_u [kPa]	ϕ' [°]
1. Fyllnadsjord	3 000	0.3	0	100	0
2. Sand	5 000	0.3	0	0	38
3. Ler	2 000	0.3	0	100	0
4. Sand	5 000	0.3	0	0	38
5. Moränlera	20 000	0.3	0	500	0
6. Grus	10 000	0.3	0	0	38
7. Sten	10 000	0.3	0	0	38
8. Kalk	20 000	0.3	0	300	0

Utöver faktorer behövs även randvillkor för att genomföra PLAXIS 2D-beräkningarna. Randvillkoren som satts i detta examensarbete är en linjär ökning av spänningen, med inkrementet $\sigma = 2500 \text{ N/m}^2$, på pålens topparea tills brott. Denna linjära ökning av spänningen fås enligt

$$\sigma = 2500x_i \quad (4.2)$$

där

x_i är antalet intervall.

5 Resultat

I detta kapitel presenteras alla resultat utifrån metoderna i kapitel 3 och indatan i kapitel 4. Resultaten som presenteras är i följande ordning: den svenska analytiska beräkningsmetodiken, den danska analytiska beräkningsmetodiken, den approximativa beräkningsmetodiken i PLAXIS 2D, mätningmetoden i CAPWAP, säkerhetsfaktor-metodiken och säkerhetsindex-metodiken

5.1 Analytisk beräkningsmetodik

5.1.1 Svensk beräkningsmetodik

5.1.1.1 Den beräknade bärförmågan

Resultaten för de beräknade bärförmågorna från de två alternativa genomförda analysmetoderna presenteras i varsitt avsnitt nedan. I det ena avsnittet genomförs en totalspänningsanalys för den fasta kohesionsjordarten. I det andra avsnittet genomförs en effektivspänningsanalys för kohesionsjordarten. Avslutningsvis presenteras i ett tredje avsnitt den dimensionerade bärförmågan. Alla faktorer som använts till analysmetoderna är hämtade från kapitel 4 avsnitt 4.1.

Totalspänningsanalys för den fasta kohesionsjorden

Lagernas beräknade bärförmågor för denna alternativa analysmetod ges av beräkningarna nedan. Bärförmågan för lager 1, fyllning, försummas. Beräkningarna nedan består av en totalspänningsanalys av mantelytans bärighetskapacitet för den fasta kohesionsjordarten, en totalspänningsanalys för de lösa kohesionsjordarterna och en effektivspänningsanalys av mantelytans bärighetskapacitet för friktionsjordarterna.

Den beräknade bärförmågan för lager 2, sand, enligt ekvation 3.11 är

$$R_{s,2} = \beta q'_s A_s = 56 \text{ kN}$$

Den beräknade bärförmågan för lager 3, ler, enligt ekvation 3.1 är

$$R_{s,3} = \alpha_{okorr} K_D K_f K_T K_{OCRC_{uk}} A_s = 55 \text{ kN}$$

Den beräknade bärförmågan för lager 4, sand, enligt ekvation 3.11 är

$$R_{s,4} = \beta q'_s A_s = 27 \text{ kN}$$

Den beräknade bärförmågan för lager 5, moränlera, enligt ekvation 3.1 är

$$R_{s,5} = \alpha_{okorr} K_D K_f K_T K_{OCR} c_{uk} A_s = 806 \text{ kN}$$

Den totala beräknade bärförmågan är följaktligen

$$R_{s,tot} = R_{s,1} + R_{s,2} + R_{s,3} + R_{s,4} + R_{s,5} = 945 \text{ kN}$$

Effektivspänningsanalys för den fasta kohesionsjorden

Lagernas beräknade bärförmågor för denna alternativa analysmetod ges av beräkningarna nedan. Bärförmågan för lager 1, fyllning, försummas. Beräkningarna nedan består av en effektivspänningsanalys av mantelytans bärighetskapacitet för den fasta kohesionsjordarten, en totalspänningsanalys för de lösa kohesionsjordarterna och en effektivspänningsanalys av mantelytans bärighetskapacitet för friktionsjordarterna.

Den beräknade bärförmågan för lager 2, $R_{s,2}$, till och med lager 4, $R_{s,4}$, är för en effektivspänningsanalys för den fasta kohesionsjorden samma som för en totalspänningsanalys för den fastakohesionsjorden eftersom det endast är i lager 5 som analysen som genomförs ändras.

Den beräknade bärförmågan för lager 5, moränlera, enligt ekvation 3.5 är

$$R_{s,5} = q'_s 0.4 \frac{(L + 20)}{(2L + 20)} \sqrt{\frac{\sigma'_c}{\sigma'_{v0}}} A_s = 1404 \text{ kN}$$

Den totala beräknade bärförmågan är följaktligen

$$R_{s,tot} = R_{s,1} + R_{s,2} + R_{s,3} + R_{s,4} + R_{s,5} = 1542 \text{ kN}$$

5.1.1.2 Den dimensionerande bärförmågan

För att kunna beräkna de dimensionerande bärförmågorna måste man först beräkna de karakteristiska bärförmågorna. För beräkningarna av de karakteristiska bärförmågorna tas hänsyn till det faktumet att olika γ_{Rd} -faktorer används för totalspänningsanalysen respektive effektivspänningsanalysen. Följaktligen används inte någon av de totala beräknade bärförmågorna direkt.

Vid totalspänningsanalys för den fasta kohesionsjorden blev den karakteristiska bärförmågan enligt ekvationen 3.3 med faktorn enligt avsnitt 3.1.3 den följande

$$R_k = \frac{R_{s,tot}}{(\gamma_{Rd} \cdot \xi_3 / 1.1)} = \frac{55 \cdot 10^3 + 806 \cdot 10^3}{(1.1 \cdot 1.4 / 1.1)} + \frac{56 \cdot 10^3 + 27 \cdot 10^3}{(1.2 \cdot 1.4 / 1.1)} = 670 \text{ kN}$$

Vid effektivspänningsanalys för den fasta kohesionsjorden blev den karakteristiska bärförmågan enligt ekvationen 3.9 med faktorn enligt avsnitt 3.1.3 den följande

$$R_k = \frac{R_{s,tot}}{(\gamma_{Rd} \cdot \xi_3 / 1.1)} = \frac{55 \cdot 10^3}{(1.1 \cdot 1.4 / 1.1)} + \frac{56 \cdot 10^3 + 27 \cdot 10^3 + 1404 \cdot 10^3}{(1.2 \cdot 1.4 / 1.1)} = 1013 \text{ kN}$$

För beräkningarna av de dimensionerande bärförmågorna däremot användes de totala karakteristiska bärförmågorna direkt eftersom alla säkerhetsfaktorerna har lika värde.

Vid totalspänningsanalys för den fasta kohesionsjorden blev den dimensionerande bärförmågan enligt ekvationen 3.4 med faktorerna enligt avsnitt 3.1.4 den följande

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_t} = \frac{670}{1.3} = 515 \text{ kN}$$

Vid effektivspänningsanalys för den fasta kohesionsjorden blev den dimensionerande bärförmågan enligt ekvationen 3.10 med faktorerna enligt avsnitt 3.1.4 den följande

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_t} = \frac{1013}{1.3} = 780 \text{ kN}$$

Den dimensionerande beräknade bärförmågan i svensk beräkningsmetodik gavs följaktligen av alternativet totalspänningsanalys för den fasta kohesionsjorden kombinerat med totalspänningsanalys för de lösa kohesionsjorderna och effektivspänningsanalys för friktionsjorderna.

5.1.2 Dansk beräkningsmetodik

5.1.2.1 Den beräknade bärförmågan

Lagernas beräknade bärförmågorna för denna analysmetod ges av beräkningarna nedan. Bärförmågan för lager 1, fyllning, försummas. Beräkningarna nedan består av en totalspänningsanalys av mantelytans bärighetskapacitet och spetsens bärighetskapacitet för kohesionsjordarter i kombination med en effektivspänningsanalys av mantelytans bärighetskapacitet för friktionsjordarter. Alla faktorer som använts till analysmetoderna är hämtade från kapitel 4 avsnitt 4.1.

Den beräknade bärförmågan för lager 2, sand, enligt ekvation 3.26 är

$$R_{s,2} = A_s q'_s N_m = 112 \text{ kN}$$

Den beräknade bärförmågan för lager 3, ler, enligt ekvation 3.20 är

$$R_{s,3} = A_s c_u m r = 55 \text{ kN}$$

Den beräknade bärförmågorna för lager 4, sand, enligt ekvation 3.26 är

$$R_{s,4} = A_s q'_s N_m = 54 \text{ kN}$$

De beräknade bärförmågorna för lager 5, moränlera, enligt ekvation 3.20 och enligt ekvation 3.23 är

$$R_{s,5} = A_s c_u m r = 806 \text{ kN}$$

$$R_{b,5} = n c_u A_b = 1103 \text{ kN}$$

Den totala beräknade bärförmågan är följaktligen

$$R_{s,tot} = R_{s,1} + R_{s,2} + R_{s,3} + R_{s,4} + R_{s,5} + R_{b,5} = 2130 \text{ kN}$$

5.1.2.2 Den dimensionerande bärförmågan

För att kunna beräkna den dimensionerade bärförmågan måste man först beräkna den karakteristiska bärförmågan. För beräkningarna av både den karakteristiska bärförmågan och den dimensionerande bärförmågan kan den totala beräknade bärförmågan, R_{tot} , användas direkt eftersom att faktorerna som används till att beräkna den karakteristiska bärförmågan respektive den dimensionerade bärförmågan är lika för alla lagers beräknade bärförmågor.

Den karakteristiska bärförmåga enligt ekvationerna 3.21, 3.24 och 3.27 med faktorn enligt avsnitt 3.1.7 är

$$R_k = \frac{R_{s,tot}}{\xi_3} = \frac{2130 \cdot 10^3}{1.5} = 1420 \text{ kN}$$

Den dimensionerande bärförmåga enligt ekvationerna 3.22, 3.25 och 3.28 med faktorerna enligt avsnitt 3.1.8 är

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_t} = \frac{1420 \cdot 10^3}{1.3} = 1092 \text{ kN}$$

5.1.3 Sammanställning av analytiska beräkningsmetodiker

I tabell 5.1 sammanställs jordlagernas beräknade bärförmågor för att kunna överblicka hur de olika jordlagerna påverkar den beräknade bärförmågan.

Tabell 5.1: Resultat från svensk beräkningsmetodik där en totalspänningsanalys för den fasta kohesionsjorden genomförts presenteras i vänsterkolumnen. Resultat från svensk beräkningsmetodik där en effektivspänningsanalys för den fasta kohesionsjorden genomförts presenteras i mittenkolumnen. Resultat från dansk beräkningsmetodik där en totalspänningsanalys för den fasta kohesionsjorden genomförts presenteras i högerkolumnen.

Bärförmågor (kN)			
Lager, $R_{s,i}$	Svensk analys Totalspänning	Svensk analys Effektivspänning	Dansk analys Totalspänning
1. Fyllning	0	0	0
2. Sand	56	56	112
3 Ler	55	55	55
4 Sand	27	27	54
5 Moränlera	806	1404	1909
\sum_1^5	945	1542	2130

I tabell 5.2 - 5.4 sammanställs de beräknade bärförmågorna, de karaktäristiska bärförmågorna och de dimensionerande bärförmågorna för att kunna överblicka hur korrelationskoefficienterna och partialkoefficienterna påverkar resultatet.

Tabell 5.2: Resultat från svensk beräkningsmetodik där en totalspänningsanalys för den fasta kohesionsjorden genomförts.

Bärförmågor (kN)			
	Totalt	Manteln	Spetsen
Den beräknade bärförmågan, R_s	945	945	0
Den karaktäristiska bärförmågan, R_k	670	670	0
Den dimensionerande bärförmågan, R_d	515	515	0

Tabell 5.3: Resultat från svensk beräkningsmetodik där en effektivspänningsanalys för den fasta kohesionsjorden genomförts.

Bärförmågor (kN)			
	Totalt	Manteln	Spetsen
Den beräknade bärförmågan, R_s	1542	1542	0
Den karaktäristiska bärförmågan, R_k	1013	1013	0
Den dimensionerande bärförmågan, R_d	780	780	0

Tabell 5.4: Resultat från dansk beräkningsmetodik där en totalspänningsanalys för den fasta kohesionsjorden genomförts.

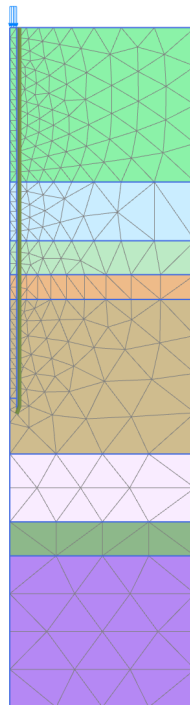
Bärförmågor (kN)			
	Totalt	Manteln	Spetsen
Den beräknade bärförmågan, R_s	2130	1027	1103
Den karaktäristiska bärförmågan, R_k	1420	685	735
Den dimensionerande bärförmågan, R_d	1092	527	565

5.2 PLAXIS 2D-beräkningar

Här presenteras PLAXIS 2D-beräkningar för att kunna jämföra med de analytiska beräkningarna och med CAPWAP-mätningarna. Alla faktorer som använts till PLAXIS 2D-beräkningarna är hämtade från kapitel 4 avsnitt 4.2. Indatan från PLAXIS 2D som presenteras är det obelastade elementnätet. Utdatan från PLAXIS 2D som presenterats är först deformationsförloppen för båda alternativa påradierna till brott,

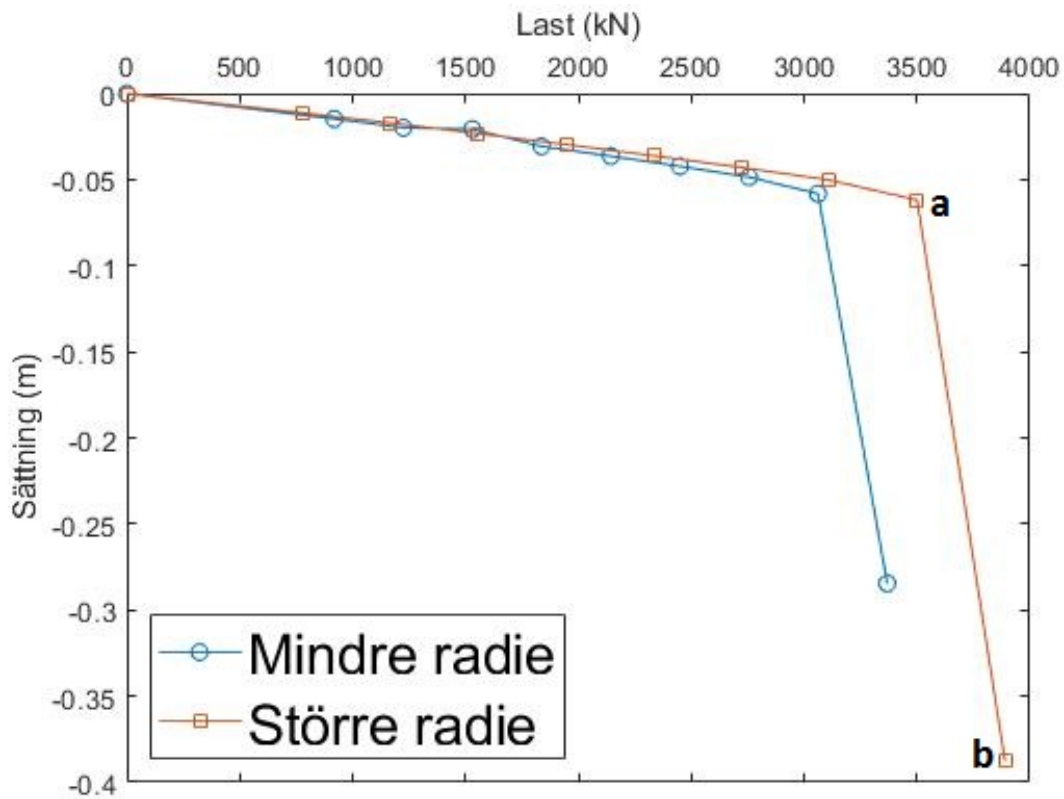
deformationsförloppen visar att båda pålraderna ger ett liknande resultat varför endast den ena pålen undersöks vidare. Följaktligen visas det belastade meshnätet efter brott och effektivspänningarna innan brott endast för pålen med den större radien. Effektivspänningarna innan brott som visas är effektivspänningen i det vertikala ledet, i det horisontella ledet och i det transversella ledet. Dessutom presenteras skjuvspänningarna i planet innan brott.

I figur 5.1 presenteras elementnätet som med hjälp av indatan i kapitel 4 har generats som en axisymmetrisk modell med 15-nods triangulära element.



Figur 5.1: Elementnätet där pålen med den mindre radien respektive pålen med den större radien ska placeras.

Deformationsförloppet för pålen med den mindre radien och för pålen med den större radien visas i figur 5.2. Deformationsförloppen för båda radierna visar ett kraftigt friktionsburet beteende. Deformationsförloppen togs fram genom att i PLAXIS 2D öka spänningen på pålens topp med intervallet 2500 N/m^2 tills brott skett. Eftersom pålen med den mindre radien och pålen med den större radien har olika areor gav detta i deformationsförloppen olika laster.



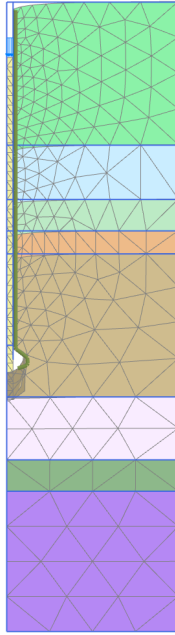
Figur 5.2: Deformationsförloppet för pålen med den mindre radien, blå linje, och för pålen med den större radien, röd linje.

De grafiskt framtagna brottlasterna presenteras i tabell 5.5.

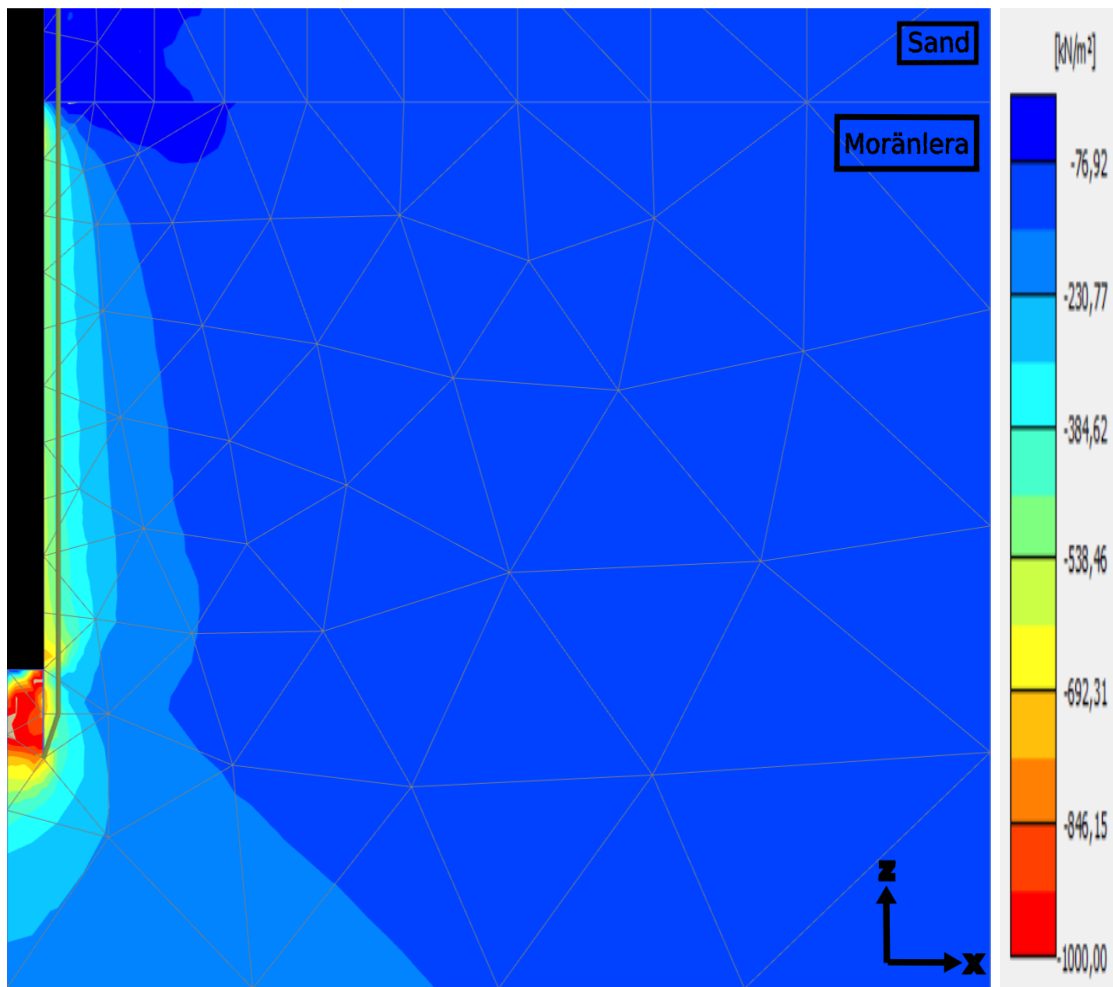
Tabell 5.5: Bärförmågor för respektive lagerskikt.

Brottlaster (kN)	
Radie	Brottlast
Mindre radie, $R_{plaxis,m}$	3062
Större radie, $R_{plaxis,s}$	3501

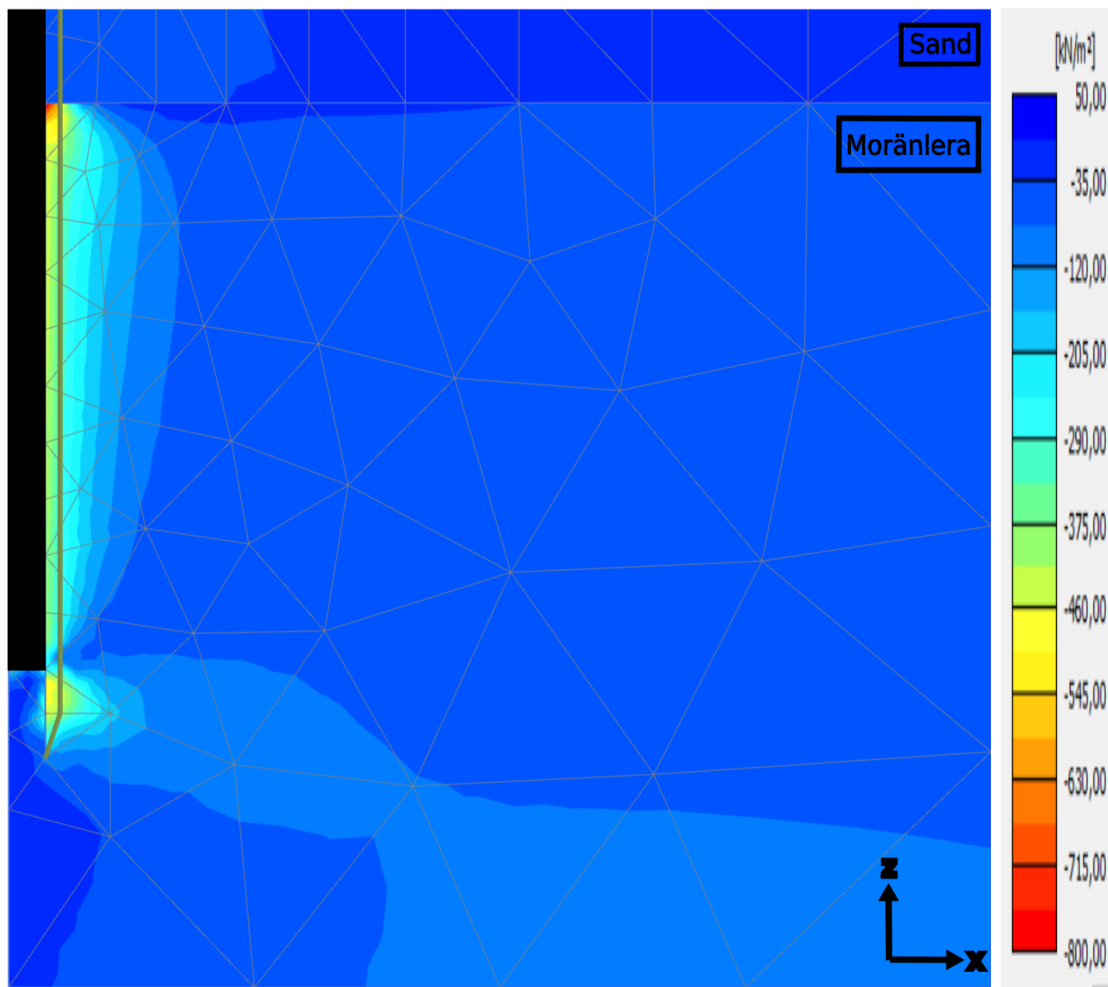
Deformationsförloppet för båda pålraderna visar ett likadant brottförlopp varför endast de illustrerande resultaten från pålen med den större radien presenteras nedan. Det belastade deformerade elementnätet efter brott för pålen med den större radien presenteras i figur 5.3. Effektivspänningar i moränleran innan brott för pålen med den större radien presenteras i figur 5.4 - 5.5 och skjuvspänningar i moränleran innan brott för pålen med den större radien presenteras i figur 5.6. Spänningsfigurerna visar att spänningen är störst under spetsen i moränleran.



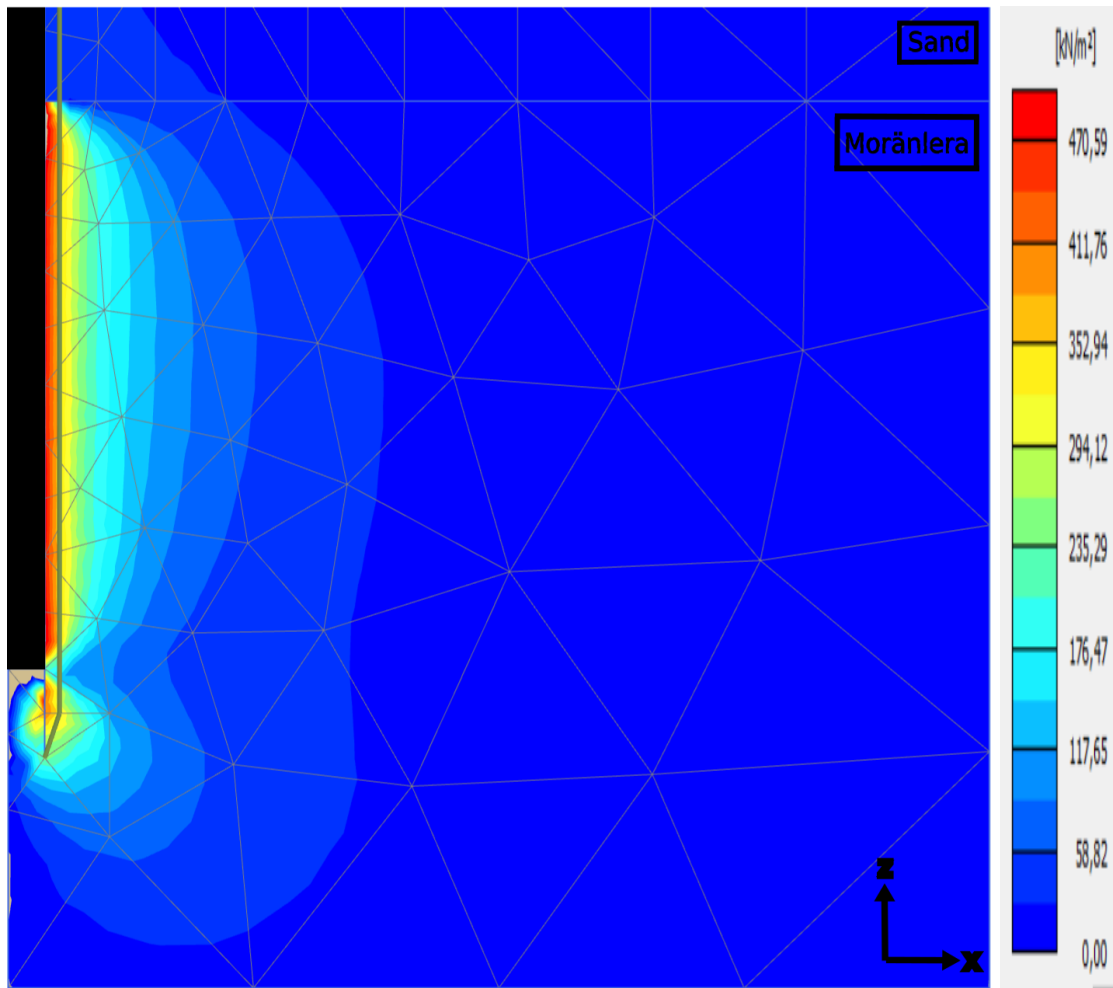
Figur 5.3: Det belastade deformerade elementnätet efter brott för pålen med den större radien. Det vill säga vid punkt b för pålen med den större radien i deformationsförloppet ovan.



Figur 5.4: Vertikala Spänningar i moränleran för pålen med den större radien innan brott. Det vill säga vid punkt a för pålen med den större radien i deformationsförloppet ovan.



Figur 5.5: Horisontala och transversella spänningar i moränleran för pålen med den större radien innan brott. Det vill säga vid punkt a för den större radien i deformationsförloppet ovan.



Figur 5.6: Skjuvspänningar i moränleran i planet för pålen med den större radien innan brott. Det vill säga vid punkt a för pålen med den större radien i deformationsförloppet ovan.

5.3 CAPWAP-mätningar

I tabell 5.6 presenteras resultaten av CAPWAP-mätningarna utan korrelationskoefficient och i tabell 5.7 presenteras resultatet med svensk korrelationskoefficient samt med dansk korrelationskoefficient. CAPWAP kraft-hastighets-graferna ges i bilaga 1. Dessutom presenteras CAPWAP-mätningarnas medelvärde utan korrelationskoefficient och med svensk korrelationskoefficient samt med dansk korrelationskoefficient. I tabell 5.8 presenteras resultatet för medelvärdet av CAPWAP-mätningarna utan korrelationskoefficient och i tabell 5.9 presenteras resultatet för medelvärdet av CAPWAP-mätningarna med korrelationskoefficient.

I kapitel 3 avsnitt 3.3.1 visades att relationen mellan svensk korrelationskoefficient och dansk korrelationskoefficient inte är konstant, utan den varierar beroende av antalet CAPWAP-mätningar. För antalet CAPWAP-mätningar som förekom i detta examensarbetet, fem stycken, används samma korrelationskoefficient i svensk beräkningsmetodik och i dansk beräkningsmetodik vilket innebär att resultaten med svensk korrelationskoefficient och med dansk korrelationskoefficient är identiska.

Tabell 5.6: Resultaten av CAPWAP-mätningarna utan korrelationskoefficient.

CAPWAP-mätningar (kN)			
Pål ID, $E_{1,i}$	Totalt	Manteln	Spetsen
52	1698	259	1439
62	2373	817	1557
102	1691	652	1039
119	2284	618	1666
197	2379	765	1614

Tabell 5.7: Resultaten av CAPWAP-mätningarna med korrelationskoefficient. Ländernas korrelationskoefficienter är identiska för det aktuella antalet CAPWAP-mätningar. Följaktligen presenteras bara ett resultat.

CAPWAP-mätningar (kN)			
Pål ID, $E_{2,i}$	Totalt	Manteln	Spetsen
52	1132	173	959
62	1582	544	1038
102	1127	435	693
119	1523	412	1111
197	1586	510	1076

Tabell 5.8: Medelvärde av CAPWAP-mätningarna utan korrelationskoefficient.

CAPWAP-mätningar (kN)			
	Totalt	Manteln	Spetsen
Medelvärdet, E_1	2085	622	1463
Standardavvikelsen, $s_{r,1}$	717	437	503

Tabell 5.9: Medelvärde av CAPWAP-mätningarna med korrelationskoefficient.
Ländernas korrelationskoefficienter är identiska för det aktuella antalet CAPWAP-mätningar. Följaktligen presenteras bara ett resultat.

CAPWAP-mätningar (kN)			
	Totalt	Manteln	Spetsen
Medelvärdet, E_2	1390	415	975
Standardavvikelsen, $s_{r,2}$	478	291	335

I detta examensarbete togs beslutet att medelvärdet, $R_{k,5}$, används som den karaktäristiska bärförmågan istället för minivärdet, $R_{k,6}$, trots att detta går emot praxisen enligt avsnitt 3.3.1. Detta eftersom att detta examensarbetet undersöker separata säkerhetsfaktorer och säkerhetsindex för den totala bärförmågan, för manteln och för spetsen. Ifall man använder praxisen att använda minivärdet, $R_{k,6}$ kommer säkerhetsfaktorer och säkerhetsindex för olika Pål-ID kontrolleras för den totala bärförmågan, för manteln och för spetsen. Minivärdet, $R_{k,6}$, hade dessutom gett en kraftig avvikelse för mantelns säkerhetsfaktor och säkerhetsindex.

5.4 Säkerhetsfaktorer och säkerhetsindex

Resultaten för de analytiska säkerhetsfaktorerna och säkerhetsindexen presenteras i varsitt avsnitt nedan. Det första avsnittet presenterar de analytiska säkerhetsfaktorerna och säkerhetsindexet givna av svensk beräkningsmetodik. Det andra avsnittet presenterar de analytiska säkerhetsfaktorerna och säkerhetsindexet givna av dansk beräkningsmetodik. De analytiska säkerhetsfaktorerna som presenteras är de totala säkerhetsfaktorerna, säkerhetsfaktorerna för manteln och säkerhetsfaktorerna för spetsen. De analytiska säkerhetsindexen som presenteras är de totala säkerhetsindexen. I det tredje avsnittet presenteras i tabellform en sammanfattning av båda ländernas analytiska säkerhetsfaktorer och säkerhetsindex. Slutligen presenteras i varsitt avsnitt resultat i diagramform för de analytiska säkerhetsfaktorerna och säkerhetsindexen. I det fjärde avsnittet presenteras i diagramform säkerhetsfaktorernas absoluta förändringar. I det femte avsnittet presenteras i diagramform teoretiskt avvikande totala säkerhetsindex, teoretiskt avvikande säkerhetsindex för manteln och teoretiskt avvikande säkerhetsindex för spetsen. I ett sjätte avsnitt presenteras de approximativa totala säkerhetsfaktorerna och säkerhetsindexen.

För säkerhetsfaktorerna har ekvationerna 3.34 - 3.37 använts och för säkerhetsindexen har ekvationen 3.38 använts. De beräknade bärförmågorna, de karaktäristiska bärförmågorna och de dimensionerande bärförmågorna är hämtade från avsnitt 5.1.3. CAPWAP-mätningarna är hämtade från avsnitt 5.3.

5.4.1 Svensk beräkningsmetodik

I detta avsnittet presenteras de analytiska säkerhetsfaktorerna och säkerhetsindexen givna av svensk beräkningsmetodik.

Analytiska säkerhetsfaktorer

Den beräknade bärförmågans totala säkerhetsfaktor, mantelsäkerhetsfaktor och spets-säkerhetsfaktor utan korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningen, enligt ekvation 3.34 är

$$n_{s,1,totala} = \frac{E_1}{R_{s,totala}} = 2.2$$

$$n_{s,1,mantel} = \frac{E_1}{R_{s,manteln}} = 0.7$$

$$n_{s,1,spets} = \frac{E_1}{R_{s,spetsen}} = \infty$$

Den beräknade bärförmågans totala säkerhetsfaktor, mantelsäkerhetsfaktor och spets-säkerhetsfaktor med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningen, enligt ekvation 3.35 är

$$n_{s,2,totala} = \frac{E_2}{R_{s,totala}} = 1.5$$

$$n_{s,2,mantel} = \frac{E_2}{R_{s,manteln}} = 0.4$$

$$n_{s,2,spets} = \frac{E_2}{R_{s,spetsen}} = \infty$$

Den karaktäristiska bärförmågans totala säkerhetsfaktor, mantelsäkerhetsfaktor och spets-säkerhetsfaktor med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningen, enligt ekvation 3.36 är

$$n_{s,3,totala} = \frac{E_2}{R_{k,totala}} = 2.1$$

$$n_{s,3,mantel} = \frac{E_2}{R_{k,manteln}} = 0.6$$

$$n_{s,3,spets} = \frac{E_2}{R_{k,spetsen}} = \infty$$

Den dimensionerande bärförmågans totala säkerhetsfaktor, mantelsäkerhetsfaktor och spetssäkerhetsfaktor med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningen, enligt ekvation 3.37 är

$$n_{s,4,totala} = \frac{E_2}{R_{d,totala}} = 2.7$$

$$n_{s,4,mantel} = \frac{E_2}{R_{d,manteln}} = 0.8$$

$$n_{s,4,spets} = \frac{E_1}{R_{d,spetsen}} = \infty$$

Analytiskt säkerhetsindex

Den dimensionerande bärförmågans totala säkerhetsindex, mantelsäkerhetsindex och spetssäkerhetsindex med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningen, enligt ekvation 3.38 är

$$\beta_{totala} = \frac{\mu_M}{s_M} = \frac{E_2 - R_{d,totala}}{s_{r,totala}} = 1.8$$

$$\beta_{mantel} = \frac{\mu_M}{s_M} = \frac{E_2 - R_{d,mantel}}{s_{r,mantel}} = -0.3$$

$$\beta_{spetsen} = \frac{\mu_M}{s_M} = \frac{E_2 - R_{d,spetsen}}{s_{r,spetsen}} = \infty$$

5.4.2 Dansk beräkningsmetodik

I detta avsnittet presenteras de beräknade säkerhetsfaktorerna och säkerhetsindexen givna av dansk beräkningsmetodik.

Analytiska säkerhetsfaktorer

Den beräknade bärförmågans totala säkerhetsfaktor, mantelsäkerhetsfaktor och spetssäkerhetsfaktor utan korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningen, enligt ekvation 3.34 är

$$n_{s,1,totala} = \frac{E_1}{R_{s,totala}} = 1.0$$

$$n_{s,1,mantel} = \frac{E_1}{R_{s,manteln}} = 0.6$$

$$n_{s,1,spets} = \frac{E_1}{R_{s,spetsen}} = 1.3$$

Den beräknade bärförmågans totala säkerhetsfaktor, mantelsäkerhetsfaktor och spets-säkerhetsfaktor med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningen, enligt ekvation 3.35 är

$$n_{s,2,totala} = \frac{E_2}{R_{s,totala}} = 0.7$$

$$n_{s,2,mantel} = \frac{E_2}{R_{s,manteln}} = 0.4$$

$$n_{s,2,spets} = \frac{E_2}{R_{s,spetsen}} = 0.9$$

Den karaktäristiska bärförmågans totala säkerhetsfaktor, mantelsäkerhetsfaktor och spets-säkerhetsfaktor med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningen, enligt ekvation 3.36 är

$$n_{s,3,totala} = \frac{E_2}{R_{k,totala}} = 1.0$$

$$n_{s,3,mantel} = \frac{E_2}{R_{k,manteln}} = 0.6$$

$$n_{s,3,spets} = \frac{E_2}{R_{k,spetsen}} = 1.3$$

Den dimensionerande bärförmågans totala säkerhetsfaktor, mantelsäkerhetsfaktor och spets-säkerhetsfaktor med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningen, enligt ekvation 3.37 är

$$n_{s,4,totala} = \frac{E_2}{R_{d,totala}} = 1.3$$

$$n_{s,4,mantel} = \frac{E_2}{R_{d,manteln}} = 0.8$$

$$n_{s,4,spets} = \frac{E_1}{R_{d,spetsen}} = 1.7$$

Analytiskt säkerhetsindex

Den dimensionerande bärförmågans totala säkerhetsindex, mantelsäkerhetsindex och spets-säkerhetsindex med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningen, enligt ekvation 3.38 är

$$\beta_{totala} = \frac{\mu_M}{s_M} = \frac{E_2 - R_{d,totala}}{s_{r,totala}} = 0.6$$

$$\beta_{mantel} = \frac{\mu_M}{s_M} = \frac{E_2 - R_{d,mantel}}{s_{r,mantel}} = -0.4$$

$$\beta_{spetsen} = \frac{\mu_M}{s_M} = \frac{E_2 - R_{d,spetsen}}{s_{r,spetsen}} = 1.2$$

5.4.3 Sammanställning av säkerhetsfaktorer och säkerhetsindex

I detta avsnittet presenteras i varsin tabell en av de olika analytiska säkerhetsfaktorerna för båda länderna. I respektive tabelltext presenteras den aktuella säkerhetsfaktorn och tillhörande ekvation. I detta avsnittet presenteras dessutom i en tabell de analytiska säkerhetsindexen för båda länderna utan standardavvikelse för det beräknade värdet. I tabelltexten presenteras det aktuella säkerhetsindexet och tillhörande ekvation.

Tabell 5.10: De beräknade bärförågornas säkerhetsfaktorer utan korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningarna, enligt ekvation 3.34.

	Totalt	Manteln	Spetsen
Svenska säkerhetsfaktorn, $n_{s,1}$:	2.2	0.7	∞
Danska säkerhetsfaktorn, $n_{s,1}$:	1.0	0.6	1.3

Tabell 5.11: De beräknade bärförågornas säkerhetsfaktorer med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningarna, enligt ekvation 3.35.

	Totalt	Manteln	Spetsen
Svenska säkerhetsfaktorn, $n_{s,2}$:	1.5	0.4	∞
Danska säkerhetsfaktorn, $n_{s,2}$:	0.7	0.4	0.9

Tabell 5.12: De karaktäristiska bärförågornas säkerhetsfaktorer med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningarna, enligt ekvation 3.36.

	Totalt	Manteln	Spetsen
Svenska säkerhetsfaktorn, $n_{s,3}$:	2.1	0.6	∞
Danska säkerhetsfaktorn, $n_{s,3}$:	1.0	0.6	1.3

Tabell 5.13: De dimensionerande bärförmågornas säkerhetsfaktorer med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningarna, enligt ekvation 3.37.

	Totalt	Manteln	Spetsen
Svenska säkerhetsfaktorn, $n_{s,4}$:	2.7	0.8	∞
Danska säkerhetsfaktorn, $n_{s,4}$:	1.3	0.8	1.7

Tabell 5.14: De dimensionerande bärförmågornas säkerhetsindex med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningarna, enligt ekvation 3.38.

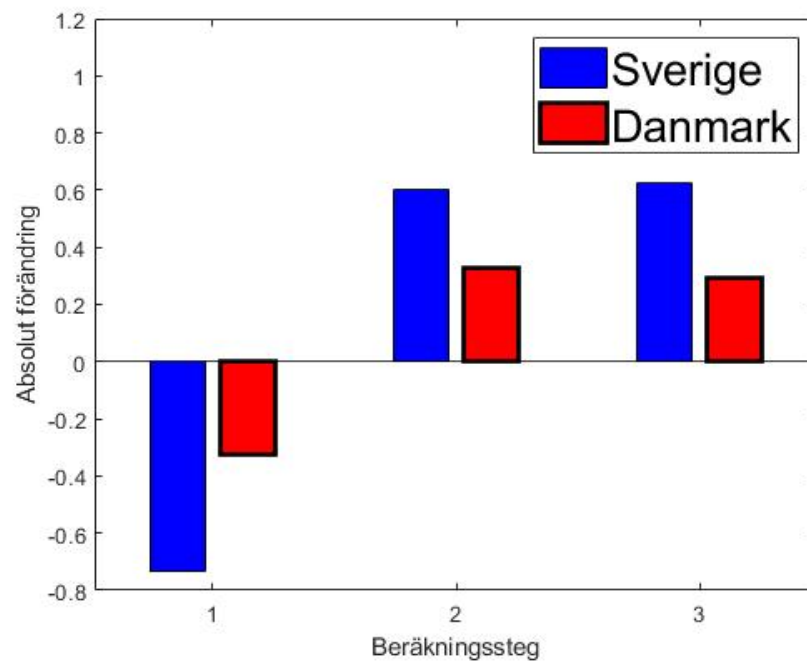
	Totalt	Manteln	Spetsen
Svenska säkerhetsindexet, β:	1.8	-0.3	∞
Danska säkerhetsindexet, β:	0.6	-0.4	1.2

5.4.4 Diagram för säkerhetsfaktorer

I detta avsnittet presenteras diagram för de analytiska säkerhetsfaktorernas absoluta förändringar för de totala säkerhetsfaktorerna, för mantelns säkerhetsfaktorer och för spetsens säkerhetsfaktorer.

Utifrån resultaten av ekvationerna 3.34 - 3.37 har absolutbeloppen tagits fram genom tre beräkningssteg. I beräkningssteg 1 har resultaten från ekvation 3.34 och ekvation 3.35 använts, i beräkningssteg 2 har resultaten från ekvation 3.35 och ekvation 3.36 använts och i beräkningssteg 3 har resultaten från ekvation 3.36 och ekvation 3.37 använts. I beräkningssteg 1 sker en minskning av E och i beräkningssteg 2 samt i beräkningssteg 3 sker en minskning av R .

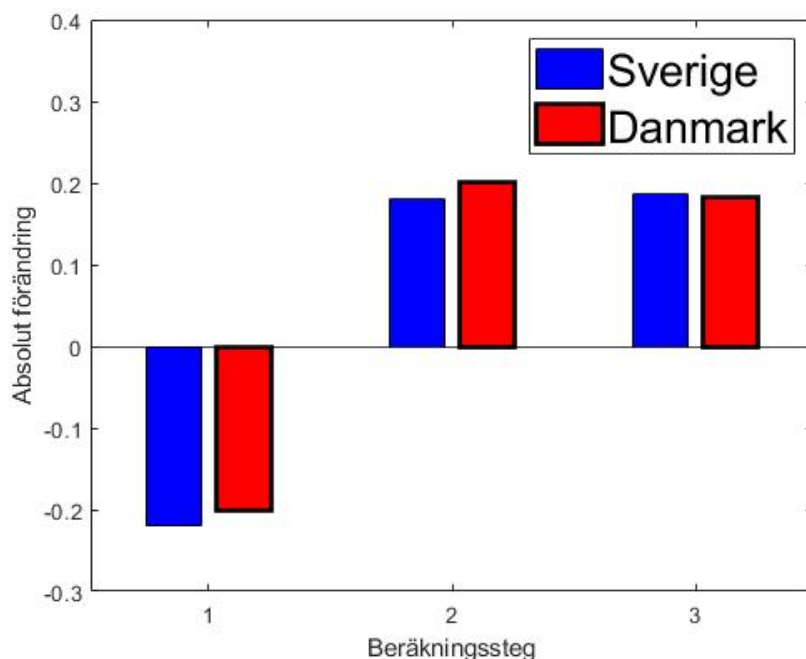
Totala säkerhetsfaktorer - absolut förändring:



Figur 5.7: De absoluta förändringarna för de totala säkerhetsfaktorerna under beräkningsstegen med svensk beräkningsmetodik och med dansk beräkningsmetodik.

I figur 5.7 ser man att de totala absoluta förändringar av säkerhetsfaktorerna i alla beräkningssteg är större med den svenska beräkningsmetodiken än med den danska beräkningsmetodiken. Detta beror dock inte på koefficienternas inverkan utan detta beror på att den svenska beräkningsmetodiken hade en mycket mindre total beräknad bärförmåga än den danska beräkningsmetodiken.

Mantelns säkerhetsfaktorer - absolut förändring:

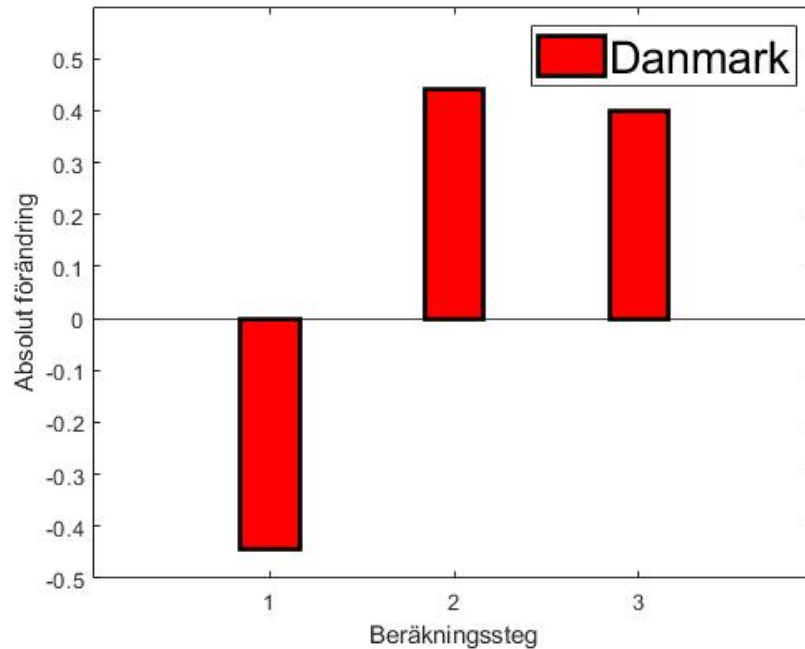


Figur 5.8: De absoluta förändringarna för mantelns säkerhetsfaktorer under beräkningsstegen med svensk beräkningsmetodik och med dansk beräkningsmetodik.

I figur 5.8 däremot ser man att mantelns absoluta förändringar av säkerhetsfaktorerna i beräkningssteg 1 är större för den svenska beräkningsmetodiken och i beräkningssteg 2 är större för den danska beräkningsmetodiken. Detta beror på koefficienternas inverkan. Koefficienterna inverkar på mantelns säkerhetsfaktorer eftersom mantelns beräknade bärförmåga är ungefär lika i svensk och dansk beräkningsmetodik.

Innan beräkningsteg 1 är den svenska säkerhetsfaktorn 0.7 och den danska säkerhetsfaktorn 0.6. Mellan beräkningssteg 1 och beräkningssteg 2 är den svenska säkerhetsfaktorn 0.4 och den danska säkerhetsfaktorn 0.4. Att säkerhetsfaktorerna blev likvärdiga efter beräkningsteg 1 berodde på att den svenska beräknade bärförmågan för manteln var marginellt mindre än den danska beräknade bärförmågan för manteln. Efter beräkningssteg 2 är den svenska säkerhetsfaktorn 0.6 och den danska säkerhetsfaktorn 0.6. Det vill säga ländernas olika korrelationskoefficient i beräkningssteg 2 gjorde att säkerhetsfaktorerna för båda länderna förblev likvärdiga. Efter beräkningssteg 3 är länderna säkerhetsfaktorer fortfarande likvärdiga eftersom länderna använder samma partialkoefficient i beräkningssteg 3.

Spetsens säkerhetsfaktorer - absolut förändring:



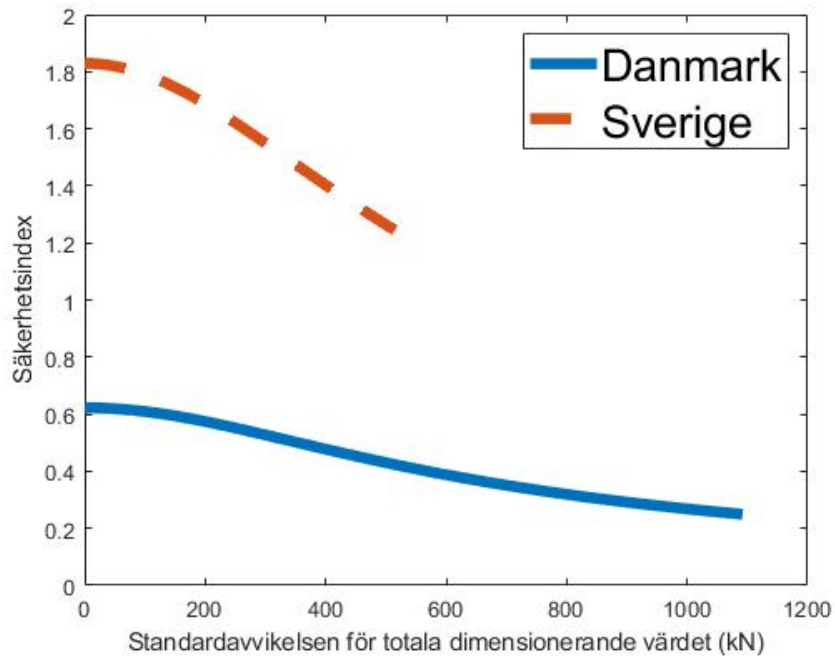
Figur 5.9: De absoluta förändringarna för spetsens säkerhetsfaktorer under beräkningsstegen med dansk beräkningsmetodik.

5.4.5 Diagram för säkerhetsindex

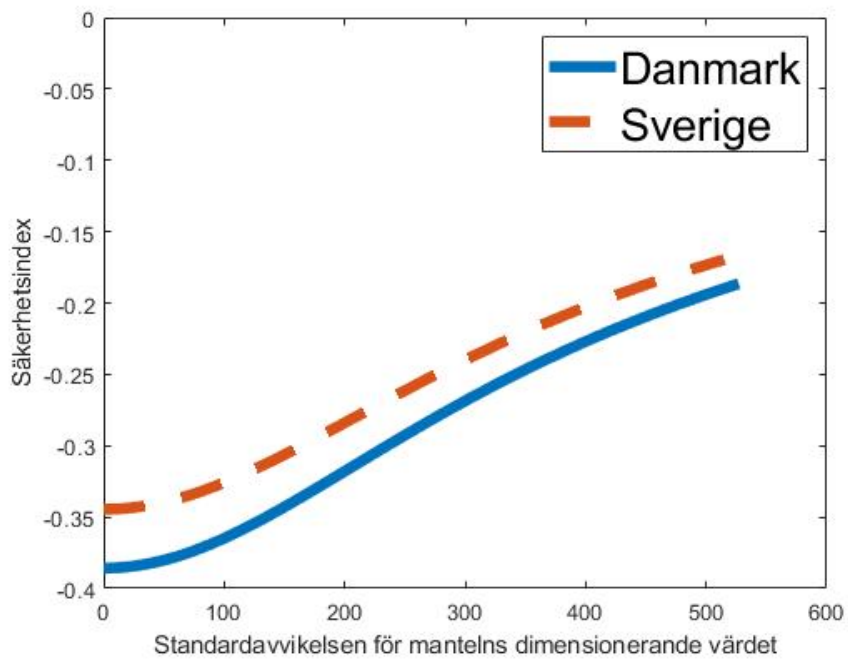
I detta avsnittet presenteras diagram för teoretiskt avvikande analytiska säkerhetsindex. Dessa diagram presenteras för att visa hur säkerhetsindex påverkas ifall det finns en standardavvikelse för den dimensionerande bärförmågan utöver en standardavvikelse för CAPWAP-mätningarna med korrelationskoefficient. Standardavvikelsen för den dimensionerande bärförmågan antogs tidigare i detta examensarbete till noll. Standardavvikelsen för den dimensionerande bärförmågan antas här varieras mellan noll och värdet för den dimensionerande bärförmågan.

Diagramen med dessa varierande värden för standardavvikelsen tas fram genom användning av MATLAB-funktionen `linspace`. Denna MATLAB-funktionen ger en plott bestående av hundra jämnt fördelade säkerhetsindex värden beroende av den varierande dimensionerande bärförmågan.

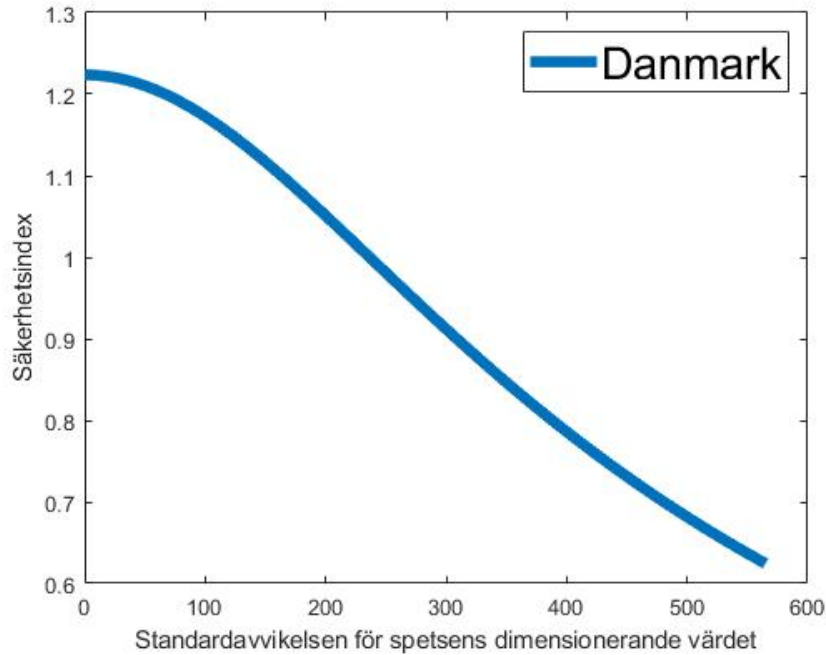
Diagram med teoretiskt avvikande analytiska säkerhetsindex presenteras för den totala dimensionerande bärförmåga, för mantelns dimensionerande bärförmåga och för spetsens dimensionerade bärförmåga.



Figur 5.10: Teoretiskt avvikande säkerhetsindex för totalt dimensionerande säkerhetsindexet för Sverige och Danmark med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningarna.



Figur 5.11: Teoretiskt avvikande säkerhetsindex för mantelns dimensionerande säkerhetsindexet för Sverige och Danmark med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningarna.



Figur 5.12: Teoretiskt avvikande säkerhetsindex för spetsens dimensionerande säkerhetsindexet för Danmark med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningarna.

5.4.6 CAPWAP-mätningar

Resultaten för de approximativa säkerhetsfaktorerna och säkerhetsindexen presenteras här.

Approximativa säkerhetsfaktorer

PLAXIS 2D totala säkerhetsfaktor med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningen

$$n_s = \frac{E_2}{R_{plaxis,s}} = 0.4$$

Approximativa säkerhetsindex

PLAXIS 2D totala säkerhetsindex med korrelationskoefficient för CAPWAP-mätningen

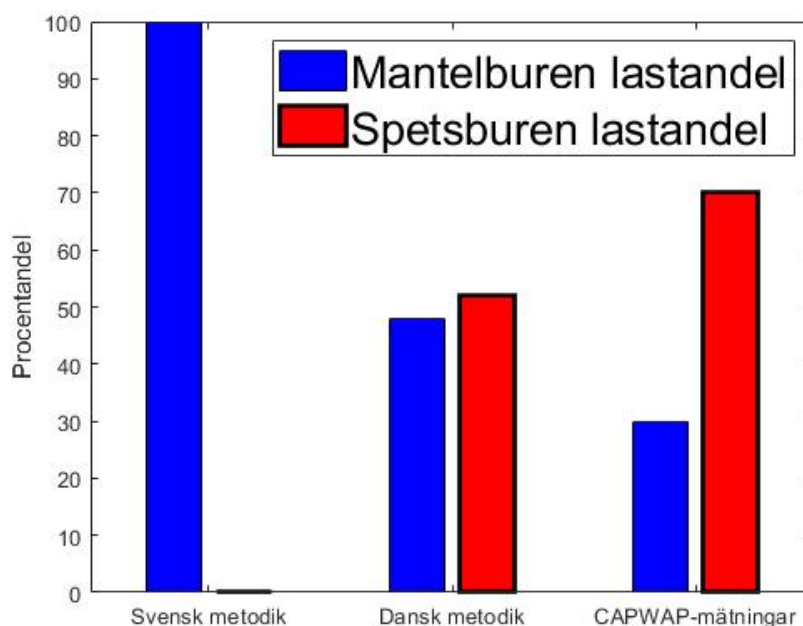
$$\beta = \frac{\mu_M}{s_M} = \frac{E_2 - R_{plaxis,s}}{s_{r,totala}} = -4.4$$

6 Diskussion

I detta kapitel analyseras skillnader mellan de analytiska resultaten och fältresultatet. Dessutom analyseras orsakerna till skillnaderna mellan resultaten.

6.1 Pålmeکانik analys

Ur resultatet i kapitel 5 kan man utläsa att bärförmågans lastfördelning på mantelytan och spetsen skiljer sig kraftigt mellan den svenska beräkningsmetodiken, den danska beräkningsmetodiken och CAPWAP-mätningarna. Detta illustreras i figur 6.1



Figur 6.1: Beräkningsmetodikers och CAPWAP-mätningarnas lastfördelning på spetsen och mantelytan.

Skillnaden för bärförmågan på mantelytan mellan den danska analytiska lösningen och CAPWAP-mätningen kan bero på att CAPWAP-mätningen skedde endast 4 dagar efter inslagningen av pålarna. Den procentuella skillnaden mellan den analytiska lösningen och CAPWAP mätningen hade kunnat vara mindre ifall man avvaktat fler dagar innan CAPWAP-mätningen skedde ty det tar ett tag innan bärförmågan för mantelytan utvecklats fullt. Det tar ett tag för mantelytans bärförmåga att utvecklas fullt ut eftersom en stor del av jordlagrens hållfasthet tas upp av portrycket efter påslagningen. Detta gäller tills porvattnet stabiliserats. Bärförmågan för spetsen påverkas i mindre omfattning av portrycksökningen.

För att bedöma ifall bärförmågan för mantelytan utvecklats fullt kan man granska kraft-sättningsplotten som tagits fram av PLAXIS 2D beräkningarna. Kraft-sättningsplotten är dock inte helt pålitlig för att kontrollera CAPWAP-mätningen eftersom PLAXIS 2D beräkningarna visar en högre bärförmåga än resultatet från CAPWAP-mätningarna. Detta kan beror på att c_u -värdet på 500 kPa från det avidentifierade projektet som användes i PLAXIS 2D beräkningarna var för högt. c_u -värdet på 500 kPa har dock använts i både de analytiska beräkningarna och i PLAXIS 2D beräkningarna. Och ifall man jämför den danska analytiska beräknade bärförmågan, 2130 kN, som tar hänsyn till både mantelytans och spetsens bärförmåga med PLAXIS 2D resultatet som är på osäkra sidan, 3062 kN, så tyder detta på att det är något mer än det höga c_u värdet som orsakat en högre bärförmåga hos PLAXIS 2D resultatet än resultatet från CAPWAP-mätningarna. De antagna elasticitetsmodulerna för ler och moränlera som valdes på säkra sidan borde förmodligen ha valts till lägre värden. Faktumet att de givna friktionsvärdena för sand, grus och sten alla har satts till 38 kan också vara en betydande bidragande orsak till den högre bärförmågan i PLAXIS 2D. Sand borde rimligtvis haft ett lägre friktionsvärde än grus och sten vilket hade gett en lägre bärförmåga. Å andra sidan borde moränlera haft ett högre friktionsvärde än 0 vilket hade gett en högre bärförmåga.

En bedömning genomförs trots att kraft-sättningsplotten inte är helt pålitlig. Ifall kraft-sättningsplotten visar en pålmekekanik som efterliknar en kraftigt friktionsburen påle, det vill säga nästan en spetsburen påle enligt figur 2.11, så stämmer det givna fältresultatet bäst. Ifall kraft-sättningsplotten visar en pålmekekanik som efterliknar en friktionsburen påle enligt figur 2.11 så stämmer den analytiska lösningen bäst och CAPWAP mätningen hade fördelaktigt kunna ske fler dagar efter inslagningen för att erhålla en bättre överensstämmelse med det analytiska resultatet.

Kraft-sättningsplotten i resultatet visar en pålmekekanik som efterliknar en kraftigt friktionsburen påle. Effektivspänningarna innan brott visar också en spänningsfördelning som är typisk för en kraftigt friktionsburen påle. Detta tyder på att bärförmågan för mantelytan i CAPWAP-mätningarna har utvecklats nästan fullt. Detta innebär att beräkningsmetodikerna har ett procentuellt resultat av mantelytans bärförmåga som skiljer sig mycket från verkligheten. Detta gäller speciellt den svenska beräkningsmetodiken eftersom den svenska beräkningsmetodiken helt försummar bidraget till bärförmågan från spetsen. Båda länderna underskattar dock spetsens bärförmåga till olika grad.

6.2 Partial- och korrelationskoefficienter

Det har visats att den svenska och danska beräkningsmetodiken för grundläggning av byggnader i detta examensarbete har samma partialkoefficienter och följaktligen påverkas inte säkerhetsfaktorerna av partialkoefficienterna.

Säkerhetsfaktorerna påverkas dock av korrelationskoefficienterna eftersom den svenska och danska beräkningsmetodiken har olika korrelationskoefficienter i detta examensarbete. Detta är intressant men korrelationskoefficienternas skillnad är marginell. För alla fallen där korrelationskoefficienterna skiljer sig mellan länderna beroende på an-

talet geotekniska undersökningar så ligger skillnaden på storleksordningen 0.1 vilket innebär att påverkan på säkerhetsfaktorerna är marginell.

Det bör påpekas att partialkoefficienterna också kan skilja sig mellan länderna beroende på vilka svenska föreskrifter man utgått ifrån när man valt de svenska partialkoefficienterna. Men precis som för korrelationskoefficienterna är eventuella skillnader i partialkoefficienterna marginella.

6.3 Vidare studier

Det hade varit intressant att i PLAXIS 2D göra en omfattande analys där friktionsvinkeln, skjuvhållfastheten och elasticitetsmodulen för de olika jordarterna varieras inom intervallen som är praxis för de olika jordarterna.

Om man hade ett större underlag av CAPWAP-mätningar med pålspetsen i lermorän skulle en sådan omfattande analys kunna ge en indikation på vilka friktionsvärden, skjuvhållfasthetsvärden och elasticitetsmoduler i PLAXIS 2D som bäst överensstämmer med resultaten från CAPWAP-mätningar. Detta skulle ge möjligheten att bättre modellera pålar med pålspetsen i lermorän i PLAXIS 2D.

Det hade även varit intressant att i PLAXIS 2D undersöka olika materialmodeller och dräneringsmodeller med de olika friktionsvärdena, skjuvhållfasthetsvärdena och elasticitetsmodulerna.

7 Slutsatser

Den procentuella skillnaden för den dimensionerande bärförmågan mellan den svenska och danska beräkningsmetodikerna är:

$$100 \cdot \frac{R_{d,danmark} - R_{d,sverige}}{R_{d,sverige}} = 100 \cdot \frac{1092 - 515}{515} = 112$$

Vilket innebär att den danska beräkningsmetodikerna ger en 112 procent större bärförmåga än den svenska beräkningsmetodikerna. Detta innebär att man kan använda hälften så många pålar med den danska beräkningsmetodikerna. Slutsatsen är följaktligen att svenska eller danska entreprenörer som dimensionerar i moränlera i Skåne hade kunnat reducera antalet pålar som behövs ifall regelverket tillåtit att man använder den danska beräkningsmetodikerna istället för den svenska beräkningsmetodikerna i Skåne.

Det är dock inte lämpligt att tillåta den danska beräkningsmetodikerna för alla svenska moränleraområden. Förutsättningarna vid dimensionering för moränleran som finns i Göteborg-trakterna skiljer sig kraftigt från förutsättningarna vid dimensionering för moränleran som finns i Skåne och i Danmark. I moränleran som finns i Göteborg-trakterna slår man ner väldigt långa pålar vilket innebär att mantelytans bärförmåga blir den dominerande. I Göteborg-trakterna är följaktligen spetsens bärförmåga inte av stor betydelse för den totala bärförmågan. Säkerhetsfaktorerna visar dock att mantelytans bärförmåga överskattas i båda ländernas beräkningsmetodik. Detta bör beaktas vid dimensionering med långa pålar i moränlera när svensk beräkningsmetodik används. Anledningen till att detta bör beaktas är att denna överskattning av mantelytans bärförmåga eventuellt kan leda till brott för långa pålar i moränlera där mantelytan står för majoriteten av bärförmågan.

Vid dimensionering med den danska beräkningsmetodikerna för moränlera i Skåne bör dock partialkoefficienten för den svenska beräkningsmetodikerna korrigeras. Den svenska och danska beräkningsmetodikerna har samma partialkoefficient, $\gamma = 1.3$, men olika korrelationsfaktor. Den danska beräkningsmetodikerna har korrelationsfaktorn, $E = 1.5$ och den svenska beräkningsmetodikerna har korrelationsfaktorn, $E = 1.4$. Med hänsyn till detta hade den svenska beräkningsmetodikerna förmodligen behövt höja sin partialkoefficient med 0.1 vid aktuella markförhållanden. Annars är det möjligt att säkerhetsfaktorn blir för låg beroende på vad man har för krav på säkerhetsfaktorn.

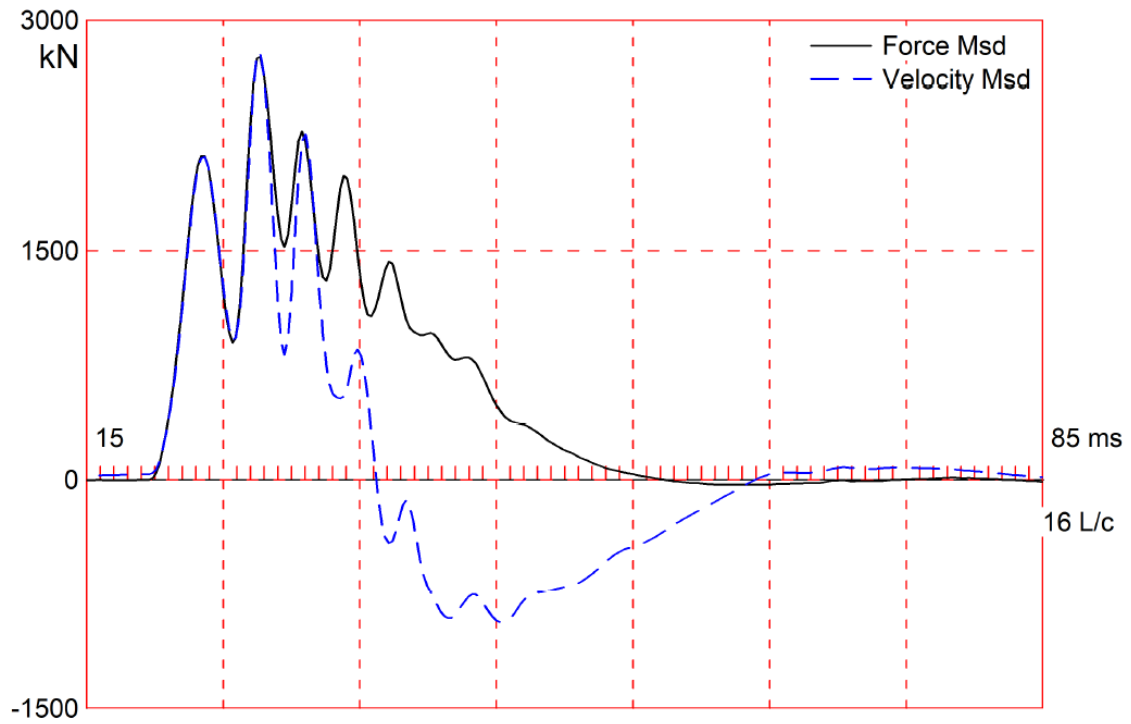
Litteratur

- [1] C. Olsson och G. Holm. *Pålgrundläggning*. okänt. Linköping: Statens geotekniska institut., (1993). URL: <https://www.sgi.se/sv/kunskapscentrum/publikationsserier/i-samverkan-med-andra/palgrundlaggning/>.
- [2] Implementeringskommission för Europastandarder inom Geoteknik (IEG). *Implementeringskommission för Europastandarder inom Geoteknik - Rapport 8:2008, Rev 2*. 2. uppl. Implementeringskommission för Europastandarder inom Geoteknik (IEG), (2010).
- [3] G. Axelsson. *Design of piles - Swedish practice*. Linköping: Pålkommissionen, (2017). URL: <http://www.palkommissionen.org/web/page.aspx?refid=229>.
- [4] R. Larsson. *Statens Geotekniska Institut - Jords egenskaper*. 5. uppl. Linköping: Statens Geotekniska Institut., (2008).
- [5] Statens Geotekniska Institut. *Jordmateriallära*. URL: <https://www.sgi.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/>. (Åtkomst: 2021-06-23).
- [6] S. Heyden, O. Dahlblom, A Olsson och G. Sandberg. *Introduktion till strukturmekaniken*. 4. uppl. Lund: Studentlitteratur AB, (2007).
- [7] G. Sällfors. *Geoteknik*. 5. uppl. Göteborg: Cremona., (2013).
- [8] N. Ottosen och H. Petersson. *Introduction to the finite element method*. 1. uppl. London: Pearson., (1992).
- [9] E. Tudisco och O. Dahlblom. *Foundation Engineering*. KFS i Lund AB., (2019).
- [10] Niels Krebs Ovesen. *Lærebog i Geoteknik*. 2. uppl. Polyteknisk Forlag., (2012).
- [11] P. Eriksson, L. Jendeby, T. Olsson och T. Svensson. *Kohesionspålar*. Linköping: Pålkommissionen., (2004). URL: <http://www.palkommissionen.org/web/page.aspx?refid=29>.
- [12] G. Axelsson och S. Baker. *Slagna friktionspålar*. Linköping: Pålkommissionen., (2007). URL: <http://www.palkommissionen.org/web/page.aspx?refid=71>.
- [13] E Nilsson, A-C. Johansson, J. Brunskog, L-G. Sjökvist och D. Holmberg. *Grundläggande akustik*. 4. uppl. KFS i Lund AB., (2008).
- [14] BBC Bitesize. *Reflection and refraction*. URL: <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zc638mn/revision/1>. (Åtkomst: 2023-03-03).
- [15] F. Vislander. *Reflektion och brytning av mekaniska vågor*. URL: <https://eddler.se/lektioner/reflektion-och-brytning-av-mekaniska-vagor/>. (Åtkomst: 2023-03-03).
- [16] K. Vännman. *Matematisk statistik*. 2:16. uppl. Lund: Studentlitteratur AB, (2002).

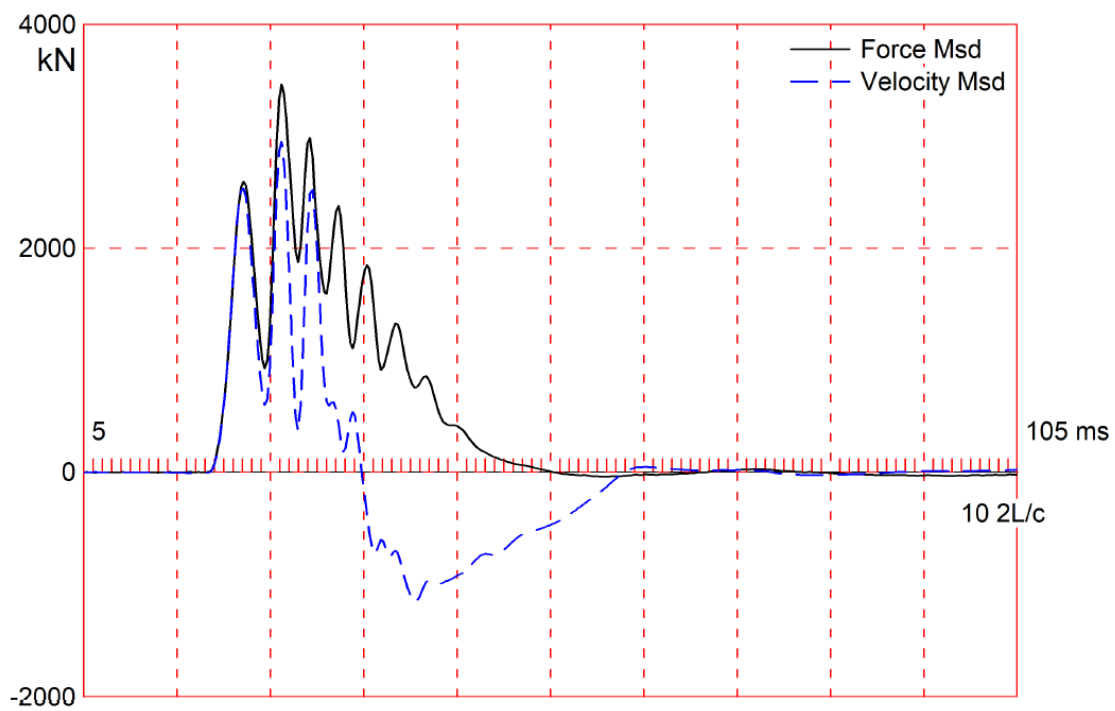
- [17] Construction Trafik Bygge-og Boligstyrelsen Danish Transport och Housing Authority. *DS/EN 1997-1 DK NA:2021 Nationalt annekst til Eurocode 7: Geoteknik - Del 1: generelle regler*. okänd. DANSK STANDARD (DS), (2021). URL: <https://www.ds.dk/da/fagomraader/byggeri-og-anlaeg/eurocodes/nationale-annekser/gældende>.
- [18] R.B.J. Brinkgreve. *PLAXIS: Material Models Manual*. Nederländerna: Delfi university of technology., (2020).
- [19] R.B.J. Brinkgreve. *PLAXIS: Reference Manual*. Nederländerna: Delfi university of technology., (2020).
- [20] Micha Van der Sloot. *Modelling soil-structure interaction: interfaces*. URL: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/plaxis-soilvision-wiki/45944/modelling-soil-structure-interaction-interfaces>. (Åtkomst: 2022-05-23).
- [21] DANSK STANDARD (DS). *DS/EN 1997-1:2007 Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules*. URL: <https://webshop.ds.dk/en/standard/M222446/ds-en-1997-1-2007>. (Åtkomst: 2022-05-17).

Bilaga A

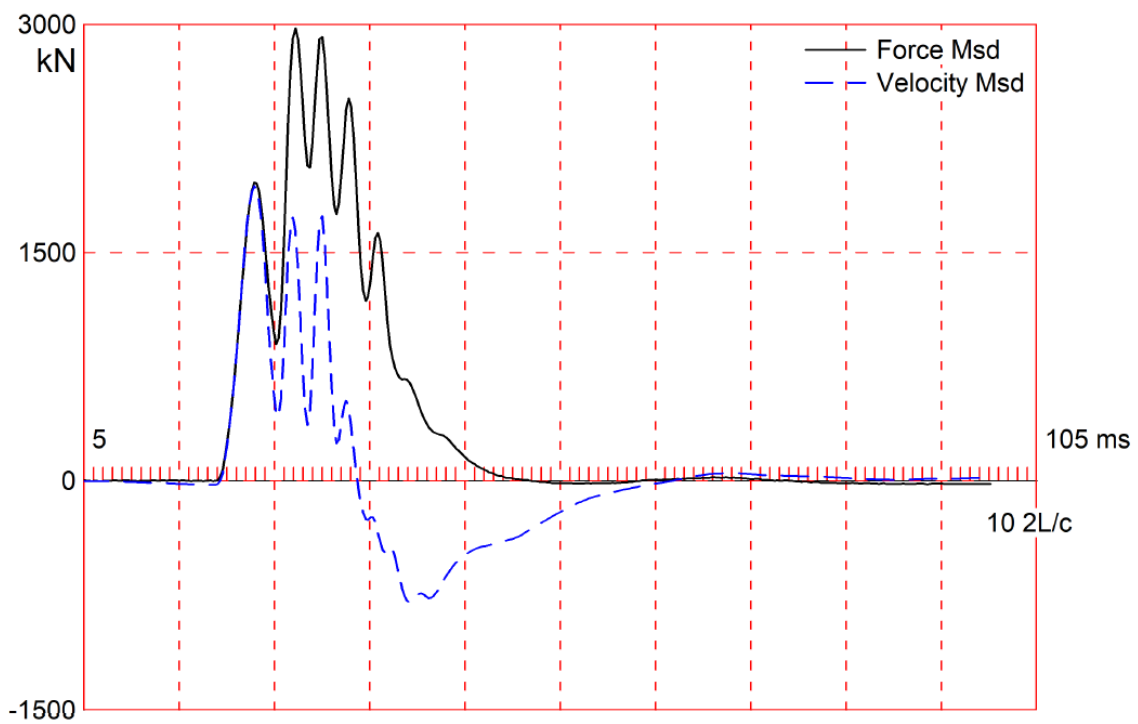
CAPWAP-mätningarnas grafer



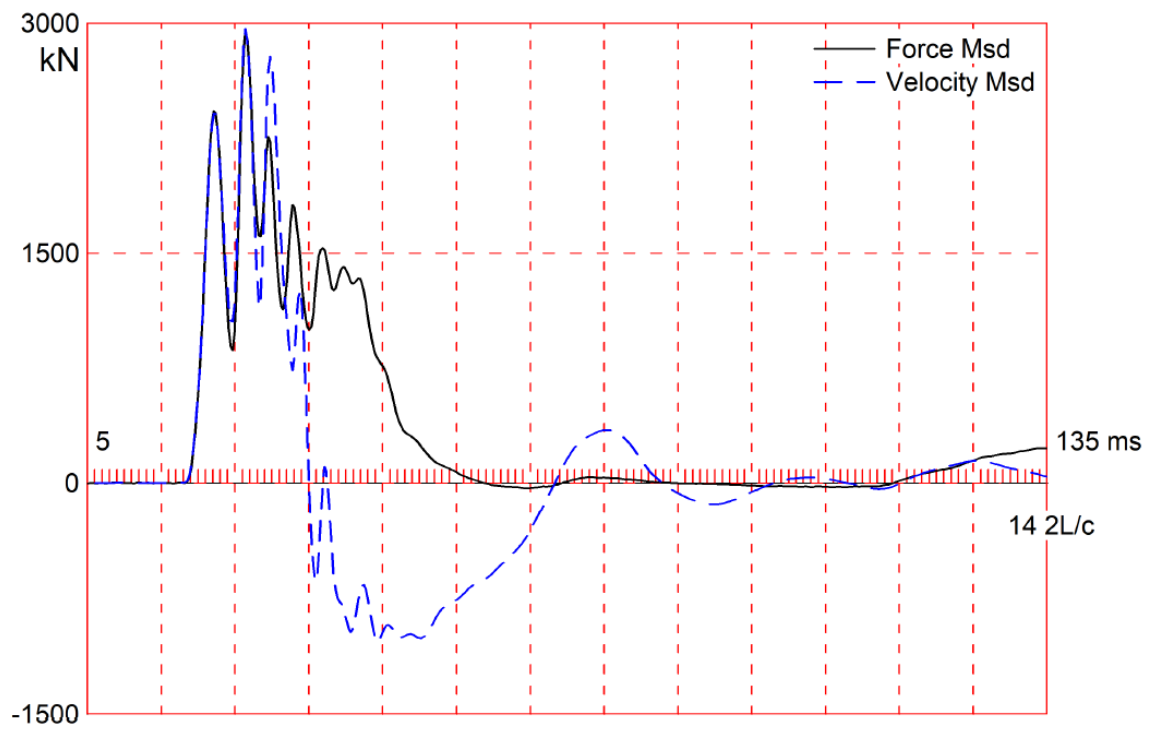
Figur A.1: Uppmätta kraft- och partikelhastighetskurvor som en funktion av tiden för pålen med ID 52



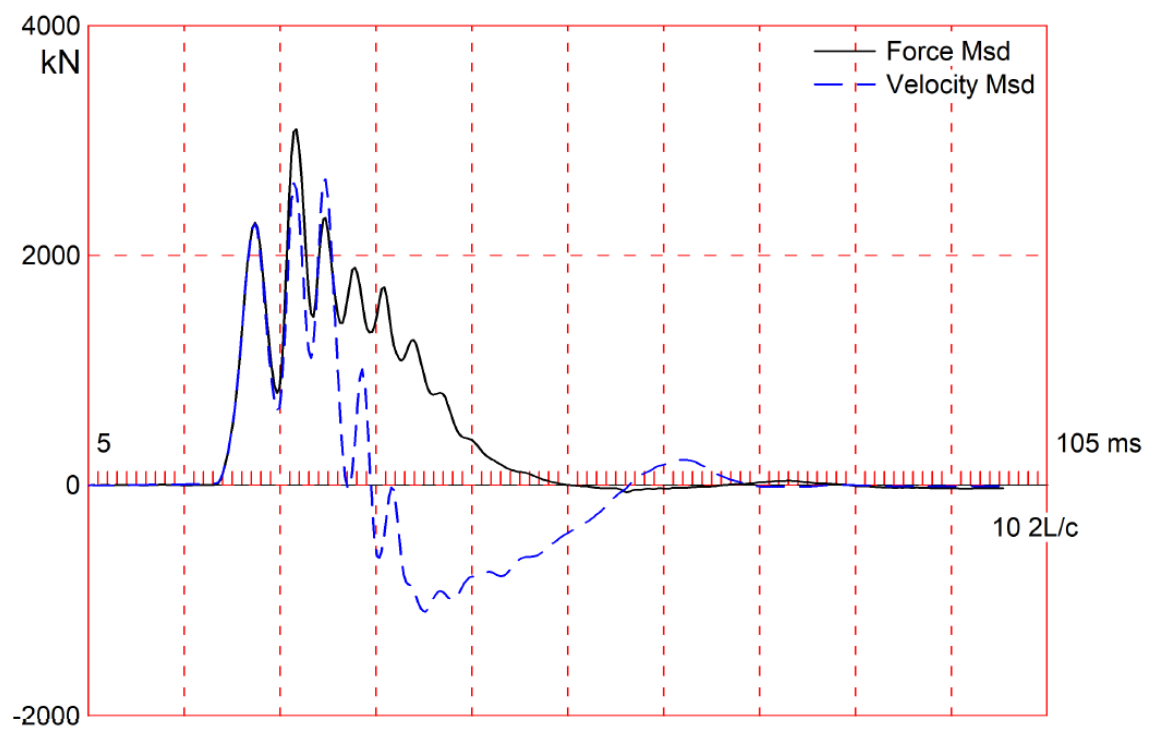
Figur A.2: Uppmätta kraft- och partikelhastighetskurvor som en funktion av tiden för pälén med ID 62



Figur A.3: Uppmätta kraft- och partikelhastighetskurvor som en funktion av tiden för pälén med ID 102



Figur A.4: Uppmätta kraft- och partikelhastighetskurvor som en funktion av tiden för pålen med ID 119



Figur A.5: Uppmätta kraft- och partikelhastighetskurvor som en funktion av tiden för pålen med ID 197