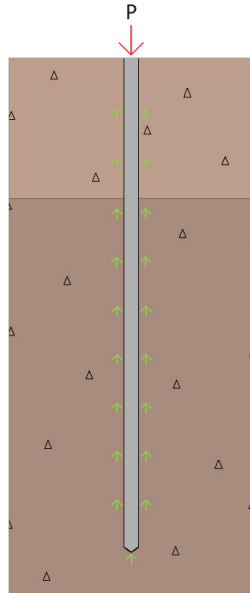




LUND
UNIVERSITY



DIMENSIONERING AV PÅLAR I LERMORÄN

**En utredning av de effekter som följer
skillnaden av standard mellan Sverige
och Danmark**

SMILLA LILJEQVIST och KAJSA MAGNUSSON

Geotechnical
Engineering

Master's Dissertation

DEPARTMENT OF CONSTRUCTION SCIENCES

GEOTECHNICAL ENGINEERING

ISRN LUTVDG/TVGT--24/5077--SE (1-74) | ISSN 0349-4977

MASTER'S DISSERTATION

DIMENSIONERING AV PÅLAR I LERMORÄN

En utredning av de effekter som följer
skillnaden av standard mellan Sverige
och Danmark

SMILLA LILJEQVIST och KAJSA MAGNUSSON

Supervisors: **ERIKA TUDISCO**, Associate Professor, Geotechnical Engineering, LTH, Lund,
HÅKAN LINDGREN, MSc, Sweco AB and **PER LINDH**, Adjunct Senior Lecturer,
Div. of Building Materials, LTH, Lund.

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

Copyright © 2024 Geotechnical Engineering,
Dept. of Construction Sciences, Faculty of Engineering LTH, Lund University, Sweden.

Printed by V-husets tryckeri LTH, Lund, Sweden, June 2024 (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 Swedish and Danish standards differ in calculating the bearing capacity of piles in clay till, with the Swedish method being identified as the most conservative. One explanation could be that the Danish standard takes into account not only the shaft, but the toe bearing capacity as well, which is something that the Swedish standard does not take into account. Currently, the Swedish standard is applied uniformly across the country. However, the foundation conditions in Sweden vary, with the soil properties for instance varying in regards to bearing capacity and depth, resulting in the standard being more or less conservative in different parts of the country.

This study was conducted to compare the Swedish standard for pile foundation with the Danish one. The study investigated both the total bearing capacity of the piles, and the distribution of shaft and toe bearing capacity when applying the Swedish and Danish standards. The analytical distribution was also compared with the distribution obtained from CAPWAP-analysis. Additionally, an investigation was performed that aimed to evaluate how a project is affected from both an economic perspective and a sustainability perspective.

Based on the provided material from a reference project, analytical calculations of the pile bearing capacity were conducted according to the two respective standards, which were compared with results from CAPWAP-analysis. To analyze the graphs from the pile driving analysis and CAPWAP-analysis accurately, a visit to Pålanalys in Gothenburg was conducted for better understanding. Following that, the relationship between shaft and toe bearing capacity in the reference project was studied, along with how they interact with the analytical calculations for each standard. After determining the design, the economic effects resulting from the differences were identified. To estimate current prices, three suppliers were contacted for a price proposal. Finally, the sustainability effects of the differences were also examined, where a carbon calculation was performed and evaluated in relation to the industry's environmental goals.

Several results were obtained from this study. The conducted design resulted in a bearing capacity of 210 and 400 kN per pile according to the Swedish and Danish calculation standards, whereas the bearing capacity measured by CAPWAP-analysis was 1,470 kN per pile. Therefore, the conclusion can be drawn that the Swedish method is conservative in the design of piles in clay till. Furthermore, it was indicated from the CAPWAP-analysis that the contribution of the pile toe to the bearing capacity has

a significant impact in clay till, which is overlooked in the application of the Swedish standard. Based on these results, further study of the application of the Swedish standard to clay till is necessary to ensure its suitability. This study also resulted in a comparative analysis where the project costs and environmental effects were examined. Based on the cost analysis, the cost of the foundation was estimated to be almost halved when applying the Danish standard instead of the Swedish, resulting in a saving of approximately 1.4 million SEK. The sustainability analysis included an analysis of the amount of CO₂-e generated. Application of the Danish standard, instead of the Swedish standard, was estimated to reduce emissions of carbon dioxide equivalents for the foundation by 50%, equivalent to 82 tons of CO₂-e. For the construction as a whole, this is estimated to correspond to a reduction in emissions of CO₂-e by 16%.

Sammanfattning

Svensk och dansk standard skiljer sig åt vid beräkning av pålars bärförmåga i lermorän, där den svenska metoden i tidigare undersökningar har konstaterats mest konservativ. En av anledningarna till detta är att spetsens inverkan på bärigheten beaktas vid dimensionering enligt dansk standard, men bortses från när svensk standard tillämpas. Svensk standard appliceras idag med utgångspunkt i samma metod över hela landet. Grundläggningförutsättningarna i Sverige varierar dock, där bland annat jordens hållfasthet och mäktighet skiljer sig åt, vilket medför att standarden blir mer eller mindre konservativ i landets olika delar.

Detta arbete genomfördes i syfte att jämföra den svenska standarden, för pålgrundläggning, med den danska. I arbetet utreddes såväl pålarnas totala bärförmåga som fördelningen av mantel- respektive spetsbärförmåga vid tillämpning av svensk och dansk standard. Den analytiska fördelningen jämfördes även med den fördelning som uppmätts vid CAPWAP-analys. Därtill undersöktes vad effekterna hade blivit av att applicera den danska standarden, där förutsättningarna möjliggör detta. Utredningen syftade till att kartlägga hur ett projekt påverkas ur såväl ett ekonomiskt perspektiv som ur ett hållbarhetsperspektiv.

Utifrån tillhandahållet material från ett referensprojekt, genomfördes analytiska beräkningar av pålarnas bärighet enligt de två ingående standarderna, vilka jämfördes med resultat från CAPWAP-analys. För att tolka graferna från påldrivningsanalysen samt CAPWAP-analysen med förståelse genomfördes ett studiebesök på Pålanalys i Göteborg. Därefter studerades hur mantel- och spetsbärförmåga förhåller sig till varandra i aktuellt projekt, samt hur de samspelar med de analytiska beräkningarna för respektive standard. Efter fastställd dimensionering identifierades de ekonomiska effekter som skillnaderna medför. För att ansätta aktuella priser kontaktades tre leverantörer med en förfrågan om prisförslag. Slutligen undersöktes även vilka hållbarhetseffekter skillnaden medför, där en klimatberäkning utfördes och utvärderades i relation till branschens målsättningar och krav.

Utifrån detta arbete erhöles flertalet resultat. Genomförd dimensionering resulterade i en bärförmåga på 210 respektive 400 kN per påle enligt svensk respektive dansk beräkningsstandard. Bärförmågan som uppmättes vid CAPWAP-analys var 1 470 kN per påle. Slutsatsen kan därför dras att den svenska metoden är konservativ vid dimensionering av pålar i lermorän. CAPWAP-analysen indikerade vidare att spetsens

bidrag till bärformågan har en betydande inverkan i lermorän, vilken bortses från vid tillämpning av svensk standard. Utifrån dessa resultat dras slutsatsen att vidare utredning, av svensk standard för pålning i lermorän, bör genomföras för att bedöma aktuell standards lämplighet. Detta arbete resulterade även i en jämförelseanalys där kostnaderna för projektet samt miljöeffekter undersöktes. Utifrån kostnadsanalysen uppskattades kostnaden för grundläggningen knappt halveras vid tillämpning av dansk standard istället för svensk, vilket medför en besparing på ungefär 1,4 miljoner SEK. Hållbarhetsanalysen innefattade en analys av mängden koldioxid som genereras. Tillämpning av dansk standard, istället för svensk standard, uppskattades medföra en minskning av koldioxidutsläppen för grundläggningen med 50%, vilket motsvarar 82 ton CO₂-e. För konstruktionen som helhet uppskattades detta motsvara en minskning av koldioxidutsläppen på 16%.

Förord

Detta arbete utfördes som en avslutning på civilingenjörsutbildningen i Väg- och vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet utfördes under våren 2024 tillsammans med Sweco Sverige AB.

Vi vill tacka våra handledare, Erika Tudisco och Per Lindh från LTH samt Håkan Lindgren, geotekniker på Sweco Sverige AB, för idén och all hjälp vi fått längs arbetets gång. Ett extra tack till Håkan för att vi fått ta del av verksamheten på Sweco och fått ställa alla våra frågor till honom och hans kollegor.

Stort tack till Mattias Grävare på Pålanalys i Göteborg för att vi fick komma på ett studiebesök hos er! Vi uppskattade enormt att du tog tiden att besvara våra många frågor om materialet till stötsvågsmätningen och att du faktakontrollerade vår text om PDA och CAPWAP.

Vi vill även tacka Peab Grundläggning AB för att vi fick tillgång till projekteringsmaterialet för referensprojektet, och för att ni fanns tillgängliga för diskussion under arbetets gång.

Tack till Miklos Molnar från LTHs avdelning för konstruktionsteknik för att du tagit dig tiden att hjälpa oss och granska våra beräkningar.

Sist men inte minst vill vi tacka våra familjer för alla stöttande och lugnande ord, samt givande diskussioner som hjälpt till längs vägen.

Smilla Liljeqvist & Kajsa Magnusson

Lund, April 2024

Notation

Latinska bokstäver

A_b - spetsens area

A_s - mantelns area

C_e - exponeringsfaktor för tak

C_t - termisk koefficient för tak

$CO_2 - e$ - koldioxidekvivalenter

$CO_2 - e_{tot}$ - totalt koldioxidutsläpp från konstruktionen

$CO_2 - e_{dansk}$ - koldioxidutsläpp från grundläggningen enligt dansk standard

$CO_2 - e_{svensk}$ - koldioxidutsläpp från grundläggningen enligt svensk standard

c_{pe} - formfaktor för utvändig vindlast

c_{pi} - formfaktor för invändig vindlast

c_u - odränerad skjuvhållfasthet

d - byggnadens djup

F_k - olyckslast

G - permanent last

g - egentyngd

H - byggnadshöjd

h - lagertjocklek

J_c - dämpningsfaktor vid CAPWAP-analys

L_i - pålens längd i respektive jordlager

m - materialspecifik parameter

n - antal pålar

$n_{bjk,bostad}$ - antal bostadsbjälklag

N_{kt} - konfaktor

OCR - överkonsolideringsgrad

r - regenerationsfaktor

R_c - total beräknad mantelbärförmåga

R_s - beräknad mantelbärförmåga

R_b - beräknad spetsbärförmåga

s - snölast

s_k - snölast på mark

u - porvattentryck

q_c - spetstryck
 q_d - total dimensionerande last
 $q_{d,a}$ - total dimensionerande last enl. STR 6.10a
 $q_{d,b}$ - total dimensionerande last enl. STR 6.10b
 q_{nyttig} - nyttig last
 $q_p(z_e)$ - karakteristiskt hastighetstryck
 q_t - korrigerat spetstryck
 q_{vind} - total vindlast
 v_b - referensvindhastighet
 w_e - utvändig vindlast
 w_i - invändig vindlast
 z - avstånd till referenspunkt i skiktets mitt

Grekiska bokstäver

α - vidhäftningsfaktor

α_{okorr} - okorrigerad vidhäftningsfaktor

α_n - reduktionsfaktor för nyttig last

β - vidhäftningsfaktor då pålen och jorden antas uppträda dränerat

γ - tunghet

γ_d - partialkoefficient för säkerhetsklass

$\gamma_{\text{Rd},\alpha}$ - partialkoefficient för modellosäkerhet (totalspänningsanalys)

$\gamma_{\text{Rd},\beta}$ - partialkoefficient för modellosäkerhet (effektivspänningsanalys)

$\gamma_{\text{Rd},\text{CAPWAP}}$ - partialkoefficient för modellosäkerhet vid beräkning med CAPWAP

γ_s - partialkoefficient för en mantelbärande påle

γ_t - partialkoefficient för en slagen påle som beaktar mantel och spets

Θ - pålens omkrets

κ_f - multiplikator som beaktar pålens form

κ_{OCR} - multiplikator som beaktar jordens överkonsolideringsgrad

κ_T - multiplikator som beaktar tid mellan installation av pålar och pålastning

κ_t - multiplikator som beaktar lastvaraktighetsberoende skjuvhållfasthet

κ_ϕ - multiplikator som beaktar pålens diameter

μ_1 - formfaktor som beaktar takets utformning

μ_L - faktor som beaktar pålens längd

σ_0' - jordens effektiva överlagringstryck

σ_c' - förkonsolideringstryck

σ_z - vertikalspänning

σ_z' - effektiv vertikalspänning

Φ' - friktionsvinkel

ξ - korrelationsfaktor för analytisk beräkning baserad på geotekniska undersökningar

ξ_3 - korrelationsfaktor för antalet geotekniska undersökningar

ξ_5 - korrelationsfaktor baserad på antal provade pålar

ξ_6 - korrelationsfaktor baserad på antal provade pålar

φ - lastkombinationsfaktor

Innehåll

Abstract	I
Sammanfattning	III
Förord	V
Notation	VII
Innehåll	XIII
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	3
1.3 Frågeställningar	3
1.4 Tillvägagångssätt	4
1.5 Avgränsningar	4
1.6 Målgrupp	6
2 Grundläggande teori	7
2.1 Jord	7
2.2 Pålars	8
2.3 Vågmekanik	9
2.4 PDA-mätning	9
2.5 CAPWAP	10
3 Referensprojekt	11
3.1 Projekteringsmaterial	11
3.2 Strukturella förhållanden	12
3.3 Geotekniska förhållanden	12
3.3.1 Jordlagerföljd	13
3.3.2 Grundvattenförhållande	14
3.3.3 Egenskaper	14
3.3.4 Upprättad geomodell	17
	XI

4	Metodik och teori	21
4.1	Lastnedräkning	21
4.1.1	Permanent laster	21
4.1.2	Variabla laster	21
4.1.3	Dimensionerande last	25
4.2	Beräkningsmetodik - svensk standard	25
4.2.1	Partialkoefficienter och korrelationsfaktorer	26
4.2.2	Totalspänningsanalys	26
4.2.3	Effektivspänningsanalys	27
4.3	Beräkningsmetodik - dansk standard	29
4.3.1	Partialkoefficienter och korrelationsfaktorer	29
4.3.2	Mantelbärförmåga	29
4.3.3	Spetsbärförmåga	30
4.3.4	Beräknad bärförmåga	31
4.4	Dynamisk stötvågsmätning	31
4.4.1	Partialkoefficienter och korrelationsfaktorer	31
4.4.2	Dynamisk provpålning - CAPWAP-analys	32
4.5	Jämförelsestudie	33
4.5.1	Referensprojekt	33
4.5.2	Kostnadsanalys	34
4.5.3	Hållbarhetsanalys	35
5	Resultat	39
5.1	Lastnedräkning	39
5.1.1	Permanent laster	39
5.1.2	Variabla laster	40
5.1.3	Dimensionerande last	42
5.2	Analytisk och dynamisk bärförmåga	43
5.2.1	Analytisk beräkning - svensk standard	43
5.2.2	Analytisk beräkning - dansk standard	45
5.2.3	Dynamisk provpålning - CAPWAP	46
5.2.4	Sammanställning av analytisk och dynamisk bärförmåga.	48
5.3	Jämförelsestudie	48
5.3.1	Referensprojekt	48
5.3.2	Kostnadsanalys	49
5.3.3	Hållbarhetsanalys	49
5.3.4	Sammanställning av jämförelsestudie	51
6	Diskussion	53
6.1	Bärighetsanalys	53

6.2	Jämförelseanalys	56
6.3	Vidare arbete	58
7	Slutsats	61
	Referenser	63

1 Inledning

Följande avsnitt introducerar läsaren till bakomliggande problematik som ligger till grund för varför detta arbetet är av intresse att genomföra. Vidare presenteras ingående frågeställningar som arbetet är uppbyggt kring. Även avgränsningar, tillvägsgångssätt och målgrupp presenteras i detta avsnitt.

1.1 Bakgrund

Vid analytisk beräkning av pålars bärförmåga i lermorän har Sverige och Danmark olika angreppssätt, där den danska metoden kan konstateras vara mindre konservativ än den svenska metoden. De båda ländernas standarder utgår ifrån Eurokod, men resultatet av de två bärighetsberäkningarna skiljer sig åt (SS-EN 1997-1:2005)(DS/EN 1997-1 DK NA:2021). Ett tidigare genomfört examensarbete av Jesper Jeansson undersökte skillnaden mellan dansk och svensk standard vid pålningsdimensionering, där ett antal olika skiljande parametrar utreddes. Arbetet indikerade att skillnaden mellan standarderna kan bero på flera olika faktorer, varav en är att ingående partialkoefficienter och korrelationsfaktorer tillämpas på olika vis, som resultat av de nationella valmöjligheterna (Jeansson, 2023). Studien av partialkoefficienter och korrelationsfaktorer var arbetets huvudfokus, men Jeansson poängterade även faktumet att det finns olika synsätt på manteln respektive spetsens inverkan på bärigheten vid beräkning av pålars bärighet i lermorän, vilket kan ha en skiljande effekt. I den svenska standarden antas manteln ha störst inverkan på bärförmågan, varvid spetsbärigheten ofta bortses ifrån vid dimensionering, medan den danska standarden beaktar bidragen från både spetsen och manteln (Jeansson, 2023). Som resultat av Jeanssons arbete, vilket visade på betydande skillnad i kapacitet, lyfts därför ett intresse att vidare undersöka skillnaden mellan de båda ländernas standard samt vilka praktiska effekter skillnaden medför.

Svensk standard är idag utformad så att den appliceras med utgångspunkt i samma metod över hela landet. Grundläggningförutsättningarna i Sverige varierar dock vilket innebär att standarden därigenom blir mer eller mindre konservativ i landets olika delar. Inom geoteknikskräet finns en förståelse och uppfattning om att den svenska standarden är som mest lämpad för de förhållanden som förekommer i exempelvis Göteborg, med stor mäktighet av lös lera med låg bärförmåga. Den svenska standarden, där enbart mantelbärförmågan studeras, lämpar sig bra i dessa förhållanden eftersom

det i Göteborg ofta krävs väldigt långa pålar, varvid spetsbärförmågan blir försumbar. Till skillnad från i Göteborg återfinns i sydvästra Skåne morän med hög andel ler, även kallad lermorän, vilket även är en vanligt förekommande jordart i Danmark (Larsson, 2000).

En möjlig effekt av att tillämpa en standard utformad för grundläggningsförutsättningar med lös lera, där ingående material har mycket låg bärighet, på övriga delar i landet är att en konservativ dimensionering av bärförmågan fås. Med en konservativ bärförmåga menas en överdimensionering, vilket resulterar i ett för stort antal beräknade pålar i projektet och därigenom större materialåtgång än nödvändigt. I rådande tid ligger ett stort fokus på klimatet, såväl på internationell som nationell nivå. I och med Parisavtalet åtog sig Sverige, tillsammans med resterande medlemsländer, att minska koldioxidutsläppen. Det avtalades att varje medlemsland ska åstadkomma en minskning av koldioxidekvivalenter på 40% tills år 2030, jämfört med halterna år 1990, samt att nå ett klimatneutralt samhälle år 2050 (Prop. 2016/17:16). År 2020 revideras detta mål ytterligare, med den nya målsättningen på en minskning med 55% till år 2030 (Tyskland & Europeiska kommissionen, 2020). Av Sveriges totala utsläpp av CO₂-ekvivalenter genereras cirka 22% av bygg- och fastighetssektorn, vilket är information som utgår från Boverkets miljöindikatorer för år 2021 (Boverket, 2021).

För att Sverige ska nå uppsatta miljömål är det väsentligt att en omställning i branschen prioriteras. I en rapport publicerad av Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA) beskrivs att dagens aktuella klimatdeklaration underskattar en byggnads verkliga klimatbelastning (2014). Enligt Boverket inkluderas i dagsläget enbart ytlig grundläggning i den svenska klimatdeklarationen och inte ytterligare markarbeten och grundläggningar, likt pålgrundläggning och dränering (Boverket, 2023a). Rapporten som upprättades av IVA beskriver att den del av grundläggningen som idag bortses från beräknas motsvara 50% av det som faktiskt ingår i den nuvarande deklarationen, vilket innebär att konstruktionens totala klimatavtryck gravt underskattas i dagens klimatdeklarationer (IVA, 2014). Boverket har, som ett resultat av denna identifierade brist, fått i uppdrag av Regeringen att ta fram ett författningsförslag på gränsvärden för en byggnads koldioxidavtryck, som ett tillägg i den klimatdeklaration som måste upprättas för alla projekt (Boverket, 2023b). Gränsvärdena ska ange kg CO₂-ekvivalenter per m² BTA, brutto total area, och utredas för hela konstruktionen, inklusive hela grundläggningen. Boverket föreslår att gränsvärdena som ansätts ska utgå från dagens byggstandard, för att sedan successivt skärpas vart femte år. Målsättningen är att gränsvärdena ska implementeras under 2025, och tills år 2030 reduceras med 25 % (Boverket, 2023b).

1.2 Syfte

Följande arbete genomfördes med syftet att jämföra den svenska dimensioneringsmetoden, för en pålgrundläggning i lermorän, med den danska. Dels studerades mantelns respektive spetsens bärförmåga förhåller sig till varandra, vid analytisk beräkning enligt respektive standard, samt i relation till den fördelning som uppmätts vid en dynamisk stötvågsmätning. Vidare studerades även vad effekterna hade blivit av att applicera den danska metoden på svenska jordarter där förutsättningarna möjliggör detta. Utredningen syftar till att kartlägga vilken ekonomisk effekt och konsekvens i form av hållbarhet som uppstår när båda standarder appliceras på ett projekt med grundläggningsförutsättningar som kan förekomma i såväl Danmark som Sverige.

1.3 Frågeställningar

Bärighetsanalys

- Hur skiljer sig pålarnas beräknade totala bärförmåga vid tillämpning av svensk respektive dansk standard?
- Hur skiljer sig pålarnas totala bärförmåga vid analytisk beräkning respektive dynamisk stötvågsmätning med CAPWAP?
- Hur förhåller sig fördelningen av mantel- respektive spetsbärförmåga vid tillämpning av svensk respektive dansk standard?
- Hur förhåller sig den beräknade fördelningen mellan mantel- och spetsbärförmåga i relation till den som uppmätts vid dynamisk stötvågsmätning?

Jämförelseanalys

- Hur påverkar tillämpningen av dansk respektive svensk beräkningsmetod kostnaderna för ett projekt?
- Hur påverkar tillämpningen av dansk respektive svensk beräkningsmetod ett projekt ur ett hållbarhetsperspektiv?

1.4 Tillvägagångssätt

Det aktuella examensarbetet initierades med en undersökning av de grundläggande kunskaper som krävs för att förstå arbetet fullt ut. Därefter fastställdes de geotekniska och strukturella förhållanden för det referensprojekt, *Kv. Hanna* i Burlöv, som tillämpades i arbetet, utifrån tillhandahållet projekteringsmaterial. En studie av befintlig teori genomfördes sedan, där ingående beräkningsmetoder i de respektive ländernas dimensioneringsstandard presenterades och underbyggdes med en teoretisk grund. Genom två analytiska beräkningar, i enlighet med svensk respektive dansk standard, fastställdes därefter respektive lands dimensionerande bärförmåga för pålarna i projektet.

En studie av genomförd pådrivningsanalys, PDA-analys¹, vilken tillhandahölls via projekteringsmaterialet, genomfördes. För att förstå processen av dynamisk stötvågs-mätning, och för att korrekt kunna tolka CAPWAP-graferna², genomfördes ett studiebesök på Pålanalys i Göteborg, där en provning illustrerades och kurvorna förklarades av ingenjörerna. PDA-analysen användes sedan för att studera hur mantel- och spetsbärförmåga förhåller sig till varandra, samt hur dessa samspelar med de analytiska beräkningarna som genomfördes för respektive standard.

Efter fastställd dimensionering identifierades de ekonomiska effekter dimensioneringskillnaderna medför. Tre leverantörer i branschen kontaktades för att få en kostnadsuppskattning på en grundläggning bestående av hundra slagna betongpålar i Burlöv. Detta genomfördes med syftet att en mer aktuell prissättning, motsvarande den som tillämpas i branschen, ansattes vid kostnadsanalysen, för såväl material som utförande. Ytterligare undersöktes vilka effekter skillnaden i standard medför, med hänsyn till branschens aktuella krav och målsättningar på klimatpåverkan.

1.5 Avgränsningar

Följande arbete avgränsades till att undersöka fördelningen av spetsens respektive mantelns inverkan på pålens bärförmåga enligt svensk respektive dansk beräkningsstandard samt den fördelning som erhålls vid dynamisk stötvågs-mätning.

¹Analys av den stötvågs-mätning som en påle utsätts för, vilket genererar en uppfattning om pålens bärförmåga.

²Iterativ beräkningsmetod med utgångspunkt från PDA-analysen som genererar bärförmåga längs pålen samt uppskattar jordens fjädring och viskösa dämpning.

Vidare avgränsades undersökningen av de ekonomiska- och hållbarhetsrelaterade effekterna till att applicera den danska dimensioneringstandarden på ett lämpligt svenskt projekt med snarlika geotekniska förhållanden. Omfattningen på hållbarhetsanalysen avgränsas till att endast beakta mängden CO₂-ekvivalenter som genereras från aktuellt projekt. Därtill studeras endast hållbarhetsaspekterna utifrån modul A1-A5, det vill säga produktskedet och byggproduktionsskedet, eftersom det är detta som berör uppförandet av byggnaden.

Vid grundläggning med färre pålar bör en massivare bottenplatta samt väggar användas, för att säkerställa att konstruktionen blir tillräckligt styv. En styvare konstruktion med massivare betongelement innebär att konstruktionens totala last ökar något. Dock beaktas detta inte vidare i arbetet då syftet inte är att genomföra en fullständig dimensionering av grundläggningen, utan enbart en jämförande undersökning. Ytterligare medför detta såväl ekonomiska som hållbarhetsrelaterade effekter för konstruktionen som helhet. Detta bortses dock från i följande arbete eftersom omfattningen avgränsats till att enbart studera de effekter som följer skillnaden av standard avseende grundläggningen.

Ytterligare avgränsas följande arbete till att endast beakta erforderlig mängd pålar enligt respektive standard. I verkligheten utgår man från dimensionerade värden, men grundlägger därefter ofta med ett större antal pålar för att åstadkomma god symmetri. Aktuellt arbete avgränsades till att denna vidare dimensionering inte beaktas. Det bör även noteras att enbart axiell belastning av pålar beaktas i aktuellt arbete. Vidare avgränsades även arbetet till att endast undersöka de effekter som följer skillnaden av standard i brottgränstillståndet. Det är enbart betongen i pålarna som har studerats utifrån brottgränstillståndet, då undersökta standarder inte behandlar armeringens inverkan på pålarna.

Följande arbete är en efterföljande utredning på ett tidigare examensarbete *Beräkning av bärförmåga hos pålar i moränlera - Svensk och dansk beräkningsmetodik* skriven av Jesper Jeansson (2023). I Jeanssons arbete utreds i huvudsak de olika standardens beräkningsmetoder, mer bestämt ingående partialkoefficienter, korrelationsfaktorer och säkerhetsfaktorer, samt skillnaden dessa emellan. Därav kommer aktuellt arbete inte att beröra denna aspekt vidare utan istället expandera på de faktiska effekterna av de två standardernas skillnader i praktiken.

1.6 Målgrupp

Följande examensarbete riktar sig till en målgrupp som inkluderar såväl medstudenter på utbildningen Väg- och vattenbyggnadsteknik som berörda aktörer i branschen. Resultatet riktar sig främst till berörda aktörer i branschen.

2 Grundläggande teori

I följande avsnitt ges en grundläggande teoretisk bas till geotekniska förhållanden och mätningmetoder som vidare berörs i arbetet. Avsnittet syftar till att ge läsaren en grund inför vidare delar i arbetet.

2.1 Jord

Jordarter kan antingen kategoriseras som organisk jord eller mineraljord. Organiska jordarter har ett stort innehåll av organisk materia, likt torv, medan mineraljordar utgörs av mineralkorn, bestående av sulfider, karbonater och silikater, som varierar i storlek. Beroende på jordartens sammanlagda kornstorleksfördelning, kategoriseras mineraljordar i olika fraktioner; ler, silt, sand, grus, block respektive stora block. Kategoriseringen sker baserat på jordartens huvudsakliga kornfraktionsstorlek. Exempelvis benämns en jordart som lera om storleksfördelningen domineras av fraktionen ler, vilket är partiklar med en storlek $< 0,002$ mm. Förekommer det även en betydande del av en annan fraktion i jordarten, benämns detta som en beskrivning av huvudfraktionen, exempelvis siltig lera.

Den mest förekommande jordarten i Sverige kallas för morän. I Larssons litteraturstudie (2000) presenteras att morän är en jordart vars uppkomst är ett resultat av inlandsisens upprepade omgångar av smältning och rörelser genom historien, vilket har orsakat nednötning och loss hållning av underliggande berggrund. I litteraturstudien förklaras vidare att morän är den samling av material som kvarstod när inlandsisen helt smält, och kan förenklat beskrivas som en osorterad jordart med förekomster av många olika kornfraktioner. Det förekommer olika typer av morän, som särskiljer sig baserat på vilken bergart som bröts ner av inlandsisen (Larsson, 2000). Larsson beskriver även att det i Skåne främst förekommer morän med stor andel ler, benämnt lermorän, eftersom bildningsprocessen nästan uteslutande har skett i områden med kalksten och lerskiffer i berggrunden. Ytterligare beskrivs att lermorän ofta är kraftigt överkonsoliderad, men att värdet på överkonsolideringsgraden, OCR, kan variera brett för materialet (Larsson, 2000).

Jordarter brukar delas upp i två huvudtyper, kohesionsjord och friktionsjord, beroende på ingående materials kornstorlek. Till friktionsjordar hör grovkorniga jordarter likt sand. I dessa jordar står kornen i direkt kontakt med varandra, vilket resulterar i att

det främst är friktionskrafter och normalkraft som verkar mellan jordkornen. Kohesionsjord utgörs av finkornigt material, där lera är ett exempel på en sådan jordart. Dahlblom förklarar att krafterna i kohesionsjord, som verkar mellan de små partiklarna, utgörs av molekylära attraktionskrafter som resulterar i en vidhäftande förmåga mellan kornen (Dahlblom, 2020).

2.2 Pålar

Pålning är en metod som används för att öka bärigheten och minska sättningarna vid en grundläggning. När omgivande jords kapacitet överskrids vid belastning ”aktiveras” pälens bärande funktion. Pålarna verkar då genom att överföra och sprida laster från grunden till underliggande material med större bärförmåga (Holm & Olsson, 1993). Lasterna överförs till underliggande material via manteln och spetsen, där fördelningen mellan de respektive delarnas inverkan till bärigheten beror på typen av pålgrundläggning (Holm & Olsson, 1993).

I svensk påldimensionering benämns två huvudtyper av pålar, spetsburna pålar och mantelburna pålar. Spetsburna pålar, även kallade stoppslagna pålar, innebär att pålen drivs ner till fast berggrund eller en fast jordart och huvudsakligen överför laster via spetsen direkt till berget (Holm & Olsson, 1993). I aktuellt arbete kommer inte spetspålning beröras vidare eftersom jordlagerföljden i undersökt projekt är av stor mäktighet. I *Pålgrundläggningshandboken* benämns de typer av pålar som inte drivs ner till fast berggrund som mantelburna pålar, och i dessa överförs huvudsakligen laster i form av skjuvspänningar som uppstår i kontaktytan mellan omgivande jord och pälens mantel (Holm & Olsson, 1993). Holm och Olsson förklarade vidare att det i mantelburna pålar även förekommer en viss spetstillförd bärförmåga, dock i en mycket mindre storleksordning än den bärförmåga som tillförs via mantel, varvid spetsens bidrag ofta bortses från i svensk dimensioneringsstandard. Ytterligare uppdelar standarden mantelburna pålar i två kategorier, kohesionspålar respektive friktionspålar, beroende på omgivande jords egenskaper (Holm & Olsson, 1993).

2.3 Vågmeکانیک

Wallin m.fl. (2014) förklarade att en våg består av partiklar som oscillerar i ett medium. När dessa partiklar oscillerar trycker de på närliggande partiklar, vilket sätter dem i svängning och orsakar att en vågrörelse skapas. Vidare förklarades att när vågen möter ett annat medium än det som vågen färdas i reflekteras en del av vågen tillbaka i det medium som vågen färdas i. Resterande del av vågen transmitteras, vilket innebär att vågen propagerar vidare ut i jorden, eller absorberas (Wallin m. fl., 2014). Vid en PDA mätning är det medium som vågen färdas i pålen och reflektionen uppstår när vågen möter den jord som omger pålen.

2.4 PDA-mätning

Vid analys av en påles bärförmåga kan man genomföra en dynamisk provbelastning, vilket ofta benämns PDA-mätning, som är en påldrivningsanalys. Metoden för en PDA-mätning förklarades i *Pålgrundläggningshandboken* och ligger övergripande som grund för detta avsnitt i rapporten (Holm & Olsson, 1993). Metodiken som beskrivs i *Pålgrundläggningshandboken* är något föråldrad, varvid avsnittet är korrigerat med uppdateringar motsvarande aktuell mätningsteknik i enlighet med information given vid genomfört studiebesök på Pålanalys i Göteborg.

Vid en PDA-mätning utsätts pålen för ett slag från en fallhejare, vilket ger upphov till en stötvåg. Den ingående stötvågen samt alla vågor som reflekteras tillbaka, registreras med accelerometrar, som uppmäter partikelhastighet, samt en trådtöjningsgivare, som uppmäter kraft, vilka fästs ovan mark på pålen. Dessa är i sin tur kopplade till en påldrivningsanalysator, där data lagras och presenteras i realtid och där förhållandet mellan partikelhastigheten och kraften, som funktion av tiden, kan analyseras.

Vidare beskrivs i *Pålgrundläggningshandboken* att de reflexvågor som registreras vid PDA-mätningen kan vara i form av drag- eller tryckvågor. Om pålens spets inte drivs till berggrunden reflekteras vågen vid pålspets som en dragvåg. Reflexer i form av dragvågor uppkommer även om det finns skador på pålen. Vidare uppkommer tryckvågor vid reflektion mot pålens mantel, vilka beror på mantelmotståndets storlek

2.5 CAPWAP

För bestämning av pålens bärförmåga samt hur stor andel av bärförmågan som spetsen respektive manteln bidrar till kan datorprogrammet CAPWAP användas (Holm & Olsson, 1993). Holm och Olsson förklarade att vid analys med CAPWAP studeras pålen i mindre delar, som vardera tilldelas variabler. Främst tilldelas vardera del tre variabler; fjädringen i jorden innan brott, viskös dämpning samt statisk bärförmåga, vilket är bidraget till pålens bärförmåga från respektive del. En beräkning med datorprogrammet CAPWAP är en iterativ process (Holm & Olsson, 1993). Holm och Olsson beskrev att det initialt ansätts antagna värden för vardera elements ingående variabler. Med dessa variabler och den uppmätta partikelhastigheten som utgångspunkt, beräknar sedan CAPWAP kraften i pålens topp över tid. Den beräknade kraften som funktion av tiden jämförs därefter med den uppmätta kraften, vilken erhöles av PDA-mätningen (Holm & Olsson, 1993). Holm och Olsson förklarade vidare att variablerna för de ingående elementen sedan varieras tills den beräknade kraften överensstämmer med den uppmätta. De värden som angivits för vardera variabel i detta skede förutsätts vara de rätta värdena för fjädringen i jorden innan brott, den viskösa dämpningen respektive den statiska bärförmågan i det aktuella fallet (Holm & Olsson, 1993).

3 Referensprojekt

I följande avsnitt introduceras det referensprojekt som har applicerats i det aktuella arbetet. I avsnittet beskrivs tillhandahållet projekteringsmaterial, samt även vilka strukturella och geotekniska förhållanden projektet innehar. Avsnittet syftar till att fastställa projektområdets geotekniska förhållanden, och resultera i en upprättad geomodell representativ för vidare dimensionering.

3.1 Projekteringsmaterial

Projektet som ligger till grund för utförda påldimensioneringar i detta arbete är ett husbyggnadsprojekt, Kv. Hanna, som är beläget i Burlöv, Skåne. Projektet ligger i nära anslutning till stambanan och gränsar till Burlöv station. Entreprenaden inkluderade fyra huskroppar, men i aktuellt examensarbete studeras enbart grundläggningen för byggnad C. Projektmaterial som tillämpats har tillhandahållits av ansvarig entreprenör i projektet, Peab Grundläggning AB.

Till projekteringsunderlaget hör en upprättad markteknisk undersökningsrapport (MUR). Till denna rapport bifogades genomförda provningar som har utförts, vilka inkluderar störd provtagning med skruvborr, okulär besiktning av jordartsklassificering i fält, CPT-sondering samt grundvattenmätning. Ett pålprotokoll har upprättats, där information om samt värden på påltyp, slagningsdatum, total längd, effektiv längd samt regleringslängd för varje slagen påle anges.

En pådrivningsanalys, med ingående PDA-mätning och CAPWAP-analys, upprättades av Pålanalys i Göteborg AB och inkluderades i projekteringsmaterialet. Projekteringsmaterialet innehöll även konstruktionshandlingar, däribland handlingar avseende information om material och anvisningar, pålplan för byggnad A respektive C samt en påltabell. Påltabellen redovisade påltyp, kaphöjd, lutning och bärförmåga för respektive påle i pålplanerna.

3.2 Strukturella förhållanden

Byggnad C i projektet kv. Hanna består av en 14 våningsbyggnad, med källarplan för parkering och takterrass med solceller. Lokaler inrättas på markplan och ovanliggande våningar består av bostäder.

Utifrån tillhandahållet projekteringsmaterial har en beskrivning av byggnadens uppbyggnad tagits fram. I konstruktionsritningarna beskrevs att samtliga bjälklag består av platsgjutna bjälklag ovanpå plattbärlag (Gullberg, 2021). Ytterligare beskrevs i handlingarna att bärande väggar består av platsgjutna betongväggar samt att pelare och balkar utförs i stål.

Utifrån tillhandahållet projekteringsmaterial är tillämpade pålar av typen SP2, vilket är en betongpåle med rektangulärt tvärsnitt på 270 mm (Gullberg, 2021). Pålarnas längd ansattes i aktuellt arbete till 11 meter.

3.3 Geotekniska förhållanden

Följande avsnitt syftar till att upprätta en sammanställning av den identifierade jordlagerföljden samt hållfasthetsegenskaper för ingående lager. Referensprojektet inkluderar ett källarplan, varvid en bortschaktning av 3 meter material genomfördes, i enlighet med angivet avskärningsplan i tillhandahållet pålprotokoll (Peab Grundläggning AB, u. å.). Således togs två geomodeller fram, en beräkningsspecifik geomodell, som illustrerar den aktuella jordlagerföljden efter genomförd schakt samt en geomodell som illustrerar de geotekniska förhållanden innan schakt. I samband med den orörda geomodellen presenteras tungheter på ingående material, för att skapa en uppfattning om de geotekniska förhållanden runt byggnaden. För den beräkningsspecifika geomodellen togs ytterligare hållfasthetsegenskaper fram. Denna modell låg till grund för påldimensioneringen.

3.3.1 Jordlagerföljd

Utifrån studerat material ur MUR sammanställdes en ungefärlig jordlagerföljd i området. Prov 1, 5, 7, 9, 11, 12 och 14 har analyserats och vägts samman, där prov 5, 7, 11, 12 och 14 har prioriterats eftersom dessa sammanfaller med pålningsytan för projektet. I figur 3.1 presenteras en plankarta där provtagningspunkterna är redovisade i relation till projektområdet (Svensson, 2021). Röd markering avser positionen för byggnad C.



Figur 3.1: Översiktlig redovisning av provtagningspunkter samt beaktat område.

Med utgångspunkt i tillhandahållen MUR har fyra jordlager i huvudsak identifierats på undersökningsdjupet, vilket sträcker sig ner till 10 meters djup (Svensson, 2021). Det översta lagret består av fyllnadsjord och bedömdes vara av en mäktighet på 0,5 meter i det beaktade område. Nästkommande lager består av lermorän med en mäktighet på cirka 0,5 meter, där prov 5 och 7 bedömdes vara sandig lermorän medan resterande provpunkter indikerade en siltig lermorän. Efter lagret med lermorän följer ett lager med sand längs provpunkt 5, 11 och 14, med en mäktighet på cirka 1 meter. Prov 7 och 12 visar istället på ett lager med siltig lera och sand, med en mäktighet på 1-1,5 meter. Resterande djup, med ett totalt mätningsdjup på 10 meter, består av lermorän. Svensson (2021) presenterade även en förväntad fortsatt lagerföljd av lermorän ner tills berggrund påträffas, vilket bedöms vara på ett djup av 25-30 meter.

Det är viktigt att belysa att den okulära undersökningen av jordlagerföljd som redovisades i MUR är baserad på en individuell tolkning hos provtagaren. I prov 7 och 12 återfinns, likt presenterat, ett skikt på 1-1,5 meter med siltig lera (Svensson, 2021).

Detta observerade skikt skulle kunna vara en varvighet med något finare kornfraktion än övrig omgivande lermorän, varvid det klassificerades som siltig lera i rapporten. Den observerade varvigheten med siltig lera skulle likväl kunna klassas som en siltig lermorän i en annan bedömning. Därigenom ansätts egenskaperna som likvärdiga och skiktet beaktas vidare i aktuellt arbete som en siltig lermorän.

3.3.2 Grundvattenförhållande

Utifrån MUR bedömdes grundvattenytan befinna sig mellan 2,1 och 3,1 meter under markytan, baserat på uppmätta vattenytor i punkterna 5, 7, 9, 11 och 14 (Svensson, 2021). Vidare noterades ingen vattenyta i provpunkt 1 och 12, med mätningsdjup på 6 respektive 5,2 meter under markytan. Provpunkt 1 ligger längst ifrån beaktat område, se figur 3.1, varvid det ansågs rimligt att lägga större vikt vid övriga närliggande provpunkter. Provpunkt 12 ligger precis intill beaktat område och grundvattennivån i detta prov bör därmed efterlikna de faktiska förhållandena i det avgränsade projektområdet vid hus C. Enligt MUR uppmättes dock vattenytor i övriga provpunkter i områdets närhet, exempelvis i provpunkt 7 som även denna befinner sig precis intill beaktat område (Svensson, 2021). I geomodellen ansattes därmed en grundvattenyta på 2,6 meter under markytan, vilket motsvarar ett värde i mitten av Svenssons presenterade intervall i MUR. Enligt en kommunal utredning bör grundvattennivån i Burlöv befinna sig på 1,5 - 3 meters djup (Lind m. fl., 2019), varvid det ansatta värdet på 2,6 meter bedömdes lämpligt.

3.3.3 Egenskaper

I detta avsnitt fastställdes jordens hållfasthetsegenskaper. Vid framtagande av odränerad skjuvhållfasthet, förkonsolideringstryck samt OCR tillämpades empiriska samband. Enbart en CPT-sondering genomfördes som geoteknisk undersökning i aktuellt referensarbete, varvid erforderlig information om geotekniska förhållanden saknas. De ur empiriska samband beräknade egenskaperna granskades och utvärderades i samråd med erfarna geotekniker och geokonstruktörer¹ innan vidare användning, för att säkerställa ett rimligt beräknat resultat.

När hållfasthetsegenskaperna studerades noterades varierande egenskaper inom den sandiga lermoränen, varvid denna sektion delades upp i två olika lager. Denna indelning gjordes för att den slutgiltiga beräkningsmodellen ska motsvara de faktiska förhållanden som råder vid grundläggning.

¹Konsulterade individer arbetar på Sweco Sverige AB och Peab Grundläggning AB, och har en erfarenhet inom sina yrkesroller som varierar mellan 6-20+ år.

Tunghet

I MUR presenterades uppmätta värde på tunghet för varje identifierat jordlager (Svensson, 2021). Dessa värden överensstämmer väl med de typiska värdena för ingående jordarter presenterade i SGI's rapport *Jords egenskaper* (Larsson, 2008), varvid de bedöms lämpliga och tillämpas i aktuellt arbete. Tungheten presenteras för varje lagerföljd i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Tunghet för ingående material.

Jordlager	Tunghet, γ [kN/m ³]
Fyllnadsmaterial	21
Siltig lermorän	21
Sand	18
Siltig lermorän, skikt 1	21
Sandig lermorän, skikt 2	22

Vertikal spänning

Den vertikala spänningen, σ_z , uppkommer som resultat av den totala tyngden från ovanliggande jord. Vertikalspänningen togs fram ur ekvation 3.1 för en referenspunkt placerad i varje identifierat jordlagers mitt (Dahlblom & Tudisco, 2019).

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (3.1)$$

Vid beräkning av vertikalspänning enligt ekvation 3.1 betecknar γ_i tungheten för respektive lager ovan beaktat djup och h_i motsvarar de beaktade lagrens tjocklek.

Den effektiva vertikalspänningen σ'_z är den totala vertikala spänningen som verkar i jorden, där hänsyn tas till den lyftkraft porvattentrycket, u , orsakar. Den vertikala effektivspänningen beräknades enligt ekvation 3.2 (Dahlblom & Tudisco, 2019).

$$\sigma'_z = \sigma_z - u \quad (3.2)$$

Hållfasthetsparametrar

Den odränerade skjuvhållfastheten för lermorän kan utvärderas med utgångspunkt i spetstrycket, q_c , vilket fås som resultat ur en CPT-sondering. Utifrån mätdata genomförs vanligtvis en korrigering av q_c för att beakta portrycket, vilket genererar ett korrigerat spetstryck, q_t (Larsson, 2015). I tillhandahållet material saknas information om portrycket, varvid ingen korrigering genomfördes, således ansattes det att q_t är lika med q_c . För kohesionsjord kan beräkningen av odränerad skjuvhållfasthet göras empiriskt enligt ekvation 3.3 (Luke, 1996). För den svenska dimensioneringsmetoden ansätts vid lermorän ett värde på konfaktorn, N_{kt} på 11 (Larsson m. fl., 2007).

I Danmark uppskattas den odränerade skjuvhållfastheten enligt samma uttryck, men med en konfaktor på 10 i stället för 11 vid lermorän (Luke, 1996). Det uppmätta värdet på spetstryck, vilket utlästes från CPT-sonderingen i MUR, presenteras i tabell 3.2 (Svensson, 2021). I tabellen presenteras även det beräknade värdet på odränerad skjuvhållfasthet hos de identifierade lagren av lermorän.

$$c_u = \frac{(q_t - \sigma_z)}{N_{kt}} \quad (3.3)$$

Förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrad

Förkonsolideringstrycket, σ'_c , beskriver det största tryck som har verkat på jorden. Förkonsolideringstrycket för en lermorän kan uppskattas empiriskt utifrån ett uppmätt spetstryck och en beräknad effektivspänning, i enlighet med ekvation 3.4 (Larsson, 2015).

$$\sigma'_c \approx \frac{(q_t - \sigma'_z)}{3} \quad (3.4)$$

Överkonsolideringsgraden, OCR, beräknades empiriskt ur ekvation 3.5 (Larsson, 2015).

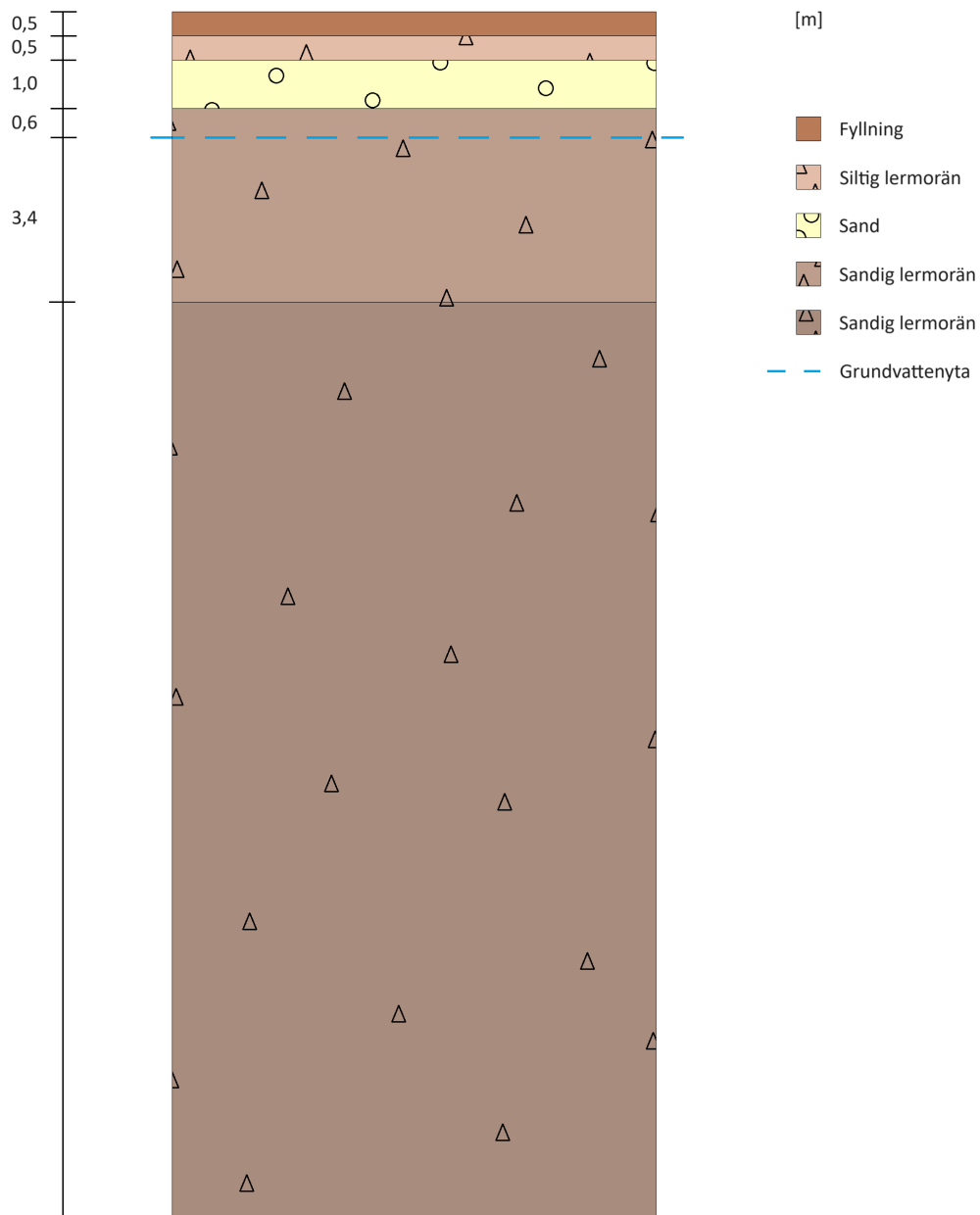
$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_z} \quad (3.5)$$

3.3.4 Upprättad geomodell

I detta avsnitt presenteras den upprättade geomodellen. Hållfasthetsparametrarna som togs fram i avsnitt 3.3.3 för den beäknings-specifika geomodellen, som motsvarar förhållandena efter schakt, presenteras i en samlad tabell i slutet av avsnittet. Varierande egenskaper inom den sandiga lermoränen noterades i avsnitt 3.3.3, varvid en uppdelning i två olika lager gjordes. Detta genomfördes för att på ett mer korrekt sätt motsvara verkliga förhållande i det aktuella referensprojektet.

Illustration av ursprungliga geotekniska förhållanden

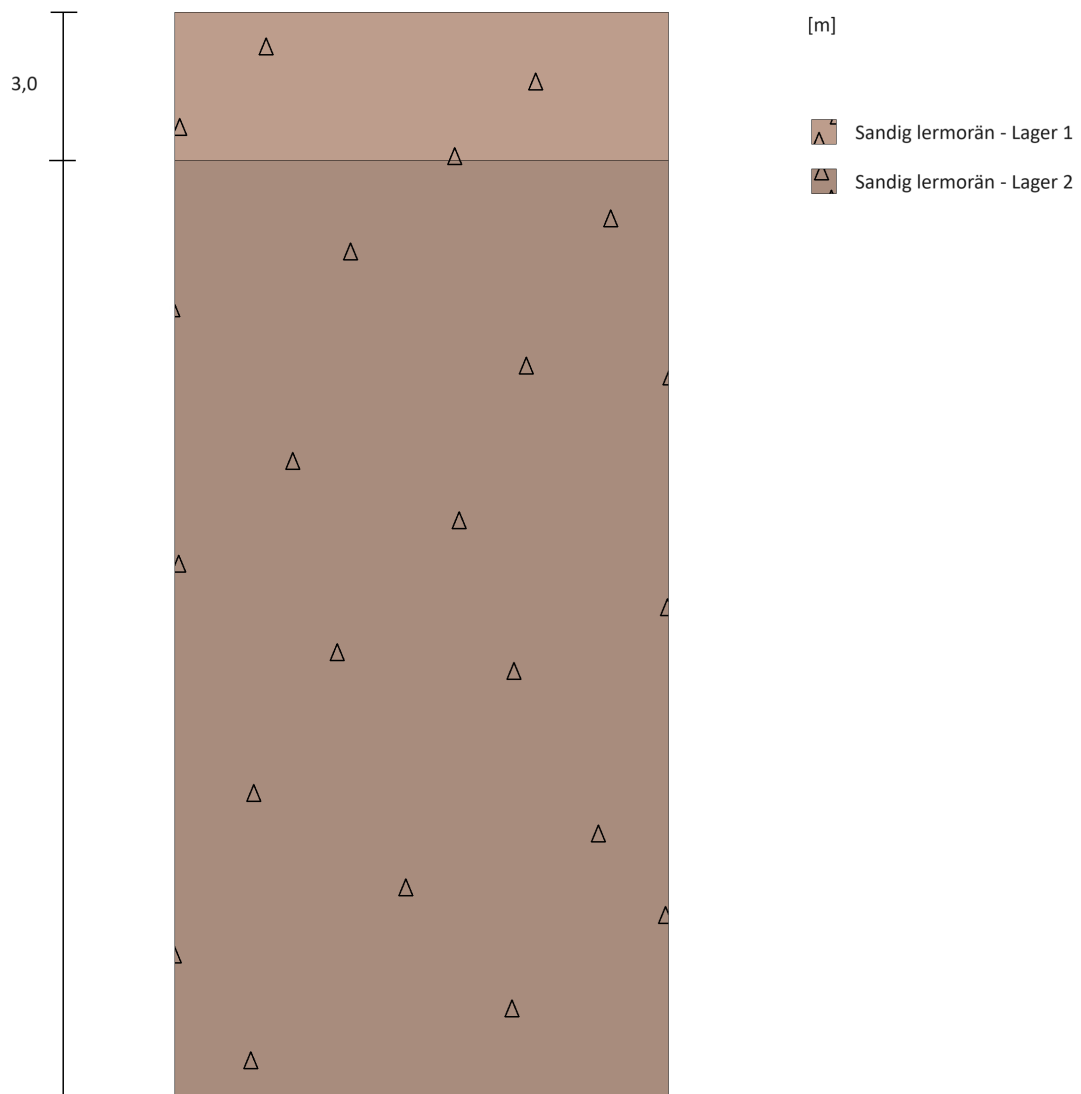
Utifrån tillhandahållen projektdata sammanställdes information om de olika jordlagren och grundvattenytan i respektive provpunkt, se avsnitt 3.3.2 samt 3.3.1. Baserat på sammanställd projektdata upprättades en geomodell för marken innan schakt, där en schematisk jordlagerföljd och grundvattenyta för marken under byggnad C ansattes. Upprättad geomodell presenteras i figur 3.2.



Figur 3.2: Upprättad geomodell innan schakt.

Illustration av geotekniska förhållanden efter schakt

Vidare upprättades en geomodell efter schaktning av markens översta 3 meter, se figur 3.3. Detta genomfördes eftersom byggnaden grundläggs tre meter under den befintliga marknivån. Figur 3.3 illustrerar de båda skikten av sandig lermorän, där det understa skiktets mäktighet är avbildad till stort djup.



Figur 3.3: Upprättad geomodell efter schakt.

Sammanställning av hållfasthetsegenskaper

Som komplement till den illustrerade jordföljden i figur 3.3 sammanställdes även ingående hållfasthetsegenskaper till en fullständig geomodell. Respektive jordlagers egenskaper sammanställdes från avsnitt 3.3.3 och presenteras i tabell 3.1 och tabell 3.2.

Tabell 3.2: Jordlagrens egenskaper efter genomförd schakt.

Parametrar	Lermorän lager 1	Lermorän lager 2
z , avstånd till referenspunkt i skiktets mitt [m]	1,5	7
Lagertjocklek [m]	3	8
u , porvattentryck [kPa]	19	74
σ_z , vertikalspänning [kPa]	31,5	154
σ'_z , effektivspänning [kPa]	12,5	80
q_t , totalt spetstryck [kPa]	1100	1700
$c_{u,d}$, odränerad skjuvhållfasthet, svensk [kPa]	97	140
$c_{u,d}$, odränerad skjuvhållfasthet, dansk [kPa]	107	155
σ'_c , förkonsolideringstryck [kPa]	363	540
OCR , överkonsolideringsgrad [kPa]	29	7

4 Metodik och teori

I aktuellt avsnitt presenteras metod och bakomliggande teori för såväl beräkningar som ingående delar av jämförelseanalysen. Traditionellt sett separeras avsnitten metod och teori, vilket är något som i detta arbete frångås. Denna uppbyggnad valdes för att underlätta läsningen, eftersom det ingår många ekvationer med tillhörande teoretiska resonemang i arbetet. Förhoppningsvis genererar detta skrivsätt en röd tråd som ökar läsarens förståelse för arbetets gång.

4.1 Lastnedräkning

4.1.1 Permanenta laster

Egentyngder för icke-bärande konstruktioner per kvadratmeter angavs i tillhandahållet projekteringsmaterial (Gullberg, 2021). För bärande konstruktioner antogs värden för lasternas storlek, detta eftersom den informationen om byggnadens utformning är bristfällig.

Byggnadens storlek antogs vara 18 x 19 meter. Denna uppskattning baserades på tillhandahållen pålplan för byggnaden, varvid storleksordningen bedömdes rimlig. Såväl bjälklagens tjocklek som de bärande väggarnas bredd ansattes till 250 mm. Vidare ansattes de bärande väggarna ha en våningshöjd på tre meter. Balkongernas storlek bedömdes vara ungefär 12 m² vardera, baserat på befintliga principskisser av den färdiga byggnaden. På vardera våningsplan med bostäder återfinns 4 balkonger, baserat på tidigare nämnda principskisser av byggnaden. Andelen terrass respektive solceller på byggnadens tak ansattes till hälften av byggnadens takyta för vardera kategori. De beräknade egentyngderna summerades till en total permanent last från byggnaden, enligt ekvation 4.1.

$$G_k = \sum g_{k,i} \quad (4.1)$$

4.1.2 Variabla laster

Lastnedräkning av den tyngd som verkar på pålgrundläggningen genomfördes i enlighet med Eurokod. De variabla laster som beaktas för denna byggnad är snölast,

vindlast, nyttig last samt olyckslast. Nyttiga laster angavs i projekteringsmaterialet som tillhandahölls, samt kontrollerades mot Eurokod (Gullberg, 2021) (SS-EN 1991-1-1:2002). Vidare angavs även olyckslaster i det projekteringsmaterial som tillhandahölls för det specifika projektet.

Snölast

Snölasten beräknades enligt ekvation 4.2 (SS-EN 1991-1-3:2003). μ_1 är en formfaktor som beaktar takets utformning, C_e är en exponeringsfaktor som beaktar hur exponerat byggnadens tak är för sin omgivning, C_t är en termisk koefficient och s_k är den karakteristiska snölasten på marken, vilken beror på var i landet byggnaden är placerad.

$$s = \mu_1 C_e C_t s_k \quad (4.2)$$

Eftersom taket på byggnaden är platt ansattes μ_1 till 0,8, i enlighet med figur 1.2 i *Bygghandboken - regel och formelsamling* (Isaksson m. fl., 2019). C_e ansattes till 0,8 och C_t till 1,0 (Isaksson m. fl., 2019). Byggnaden befinner sig i Burlöv, och därmed ansattes den karakteristiska snölasten på marken till 1,0 kN/m² i enlighet med Eurokod (SS-EN 1991-1-3:2003). Den beräknade snölasten per kvadratmeter takyta multiplicerades slutligen med den totala ytan för att få fram en total snölast.

Vindlast

Eftersom endast axiell belastning på pälarna beaktas i detta arbete beräknas enbart den vertikala lasten orsakad av vindens stjälpande moment. I praktiken inverkar även en mindre vindlast mot byggnadens plana tak. Med tanke på att byggnaden är 52 meter hög, vilket ger en betydande vindlast mot byggnadens fasad, i kombination med att byggnaden är utförd i betong, vilket resulterar i en betydande egentyngd, bedöms vindlasten mot taket vara försumbar. Därtill ger den inre vindlasten inte något tillskott till horisontallasten eftersom de inre vindlasterna tar ut varandra.

Vindlasten beräknades för vind mot den sida som medför att byggnaden utsätts för störst vindlast, det vill säga vind mot sidan med 19 meters bredd. Vindlasten på ytor beräknades för utvändigt vindlast enligt Eurokod, vilket presenteras i ekvation 4.3 (SS-EN 1991-1-4:2005). q_p är det karakteristiska hastighetstrycket, vilket beror på

referenshöjden z , referensvindhastigheten, v_b och beaktat områdes terrängtyp. c_{pe} är en formfaktor för utvändig vindlast (SS-EN 1991-1-4:2005).

$$w_e = q_p(z_e) c_{pe} \quad (4.3)$$

Byggnaden befinner sig i Burlövs kommun, varvid referensvindhastigheten, v_b , ansattes till 26 m/s (Isaksson m. fl., 2019). Vidare uppskattades byggnadens höjd vara ungefär 52 meter. Terrängtypen ansattes till 1, i enlighet med tillhandahållet material (Gullberg, 2021). Utifrån detta utlästes det karakteristiska hastighetstrycket till 1,51 kN/m².

Byggnaden delas in i zoner, vilka beror på byggnadens dimensioner. Byggnadens höjd i förhållande till dess djup beräknades enligt ekvation 4.4 (SS-EN 1991-1-4:2005). Utifrån detta utlästes värden för $C_{pe,10}$ från figur 1.7 i *Bygghandboken - regel och föreskrifter* (Isaksson m. fl., 2019).

$$\frac{H}{d} \quad (4.4)$$

En jämnt utbredd vindlast längs byggnadens höjd beräknades sedan som summan av vindlasten mot respektive zon multiplicerat med byggnadens bredd enligt ekvation 4.5.

$$q_{vind} = \sum(w \cdot 19) \quad (4.5)$$

För att bestämma den vertikala lasten som denna vindlast ger upphov till, alltså den last som merför axiell belastning på pålarna beräknades det moment som vindlasten gav upphov till enligt ekvation 4.6.

$$M_{vind} = \frac{1}{2} \cdot q_{vind} \cdot L^2 \quad (4.6)$$

Slutligen beräknades den vertikala kraften, som uppkommer till följd av det stjälpande momentet som vinden ger upphov till, enligt ekvation 4.7. I ekvationen är h hävarmen från anbläst sida till momentpunkten.

$$N_{vind} = \frac{M_{vind}}{h} \quad (4.7)$$

Olyckslast

I enlighet med tillhandahållet material ansattes olyckslasten till 50 kN (Gullberg, 2021). Denna last motsvarar påkörning av garage, vilket stämmer överens med den last som anges Eurokod, varvid den bedömdes lämplig att applicera vid lastnedräkningen (SS-EN 1991-1-7:2006).

Nyttig last

Värden för nyttig last och motsvarande lastkombinationsfaktorer erhöles från tillhandhålet material från projektet, och presenteras i tabell 4.1 (Gullberg, 2021). Dessa nyttiga laster överensstämmer med de spann som presenteras i Eurokod (SS-EN 1991-1-1:2002), varvid de bedöms rimliga att använda. Eftersom tolv av bjälklagen belastas av nyttig last i byggnader, kategori A - bostäder får reduktion av den nyttiga lasten göras (Isaksson m. fl., 2010). Denna reduktion kunde göras eftersom det inte är troligt att samtliga bostadsbjälklag utsätts för maximal nyttig last samtidigt. En reduktionsfaktor för den nyttiga lasten på bostadsbjälklag, α_n , beräknades därför enligt ekvation 4.8 (Isaksson m. fl., 2010).

$$\alpha_n = \frac{2 + (n_{bjk,bostad} - 2)\psi_0}{n_{bjk,bostad}} \quad (4.8)$$

$n_{bjk,bostad}$ är antalet bjälklag som utsätts för nyttig last från våningsplan i samma kategori, vilket i detta fall motsvarar 12 våningsplan. ψ_0 är en lastkombinationsfaktor enligt tabell 4.1.

Tabell 4.1: Nyttig last och motsvarande lastkombinationsfaktorer för byggnadens delar

Del av byggnad	Nyttig last, $q_{nyttig,k}$ [kN/m ²]	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Bjälklag och trappor i bostäder	2	0,7	0,5	0,3
Bjälklag lokal	5,0	0,7	0,7	0,6
Bjälklag garage	2,5	0,7	0,7	0,6
Övriga trappor	3,0	0,7	0,7	0,6
Balkong	3,5	0,7	0,5	0,3
Terrass	5	0,7	0,7	0,6

4.1.3 Dimensionerande last

Dimensionerande värde för lasten från den ovanpåliggande byggnaden beräknades enligt ekvation 4.11, vilken baseras på dimensionering av lasten utifrån STR 6.10a, ekvation 4.9, och STR 6.10b, ekvation 4.10 (SS-EN 1990).

$$q_{d,a} = \gamma_d (1.35G_k) \quad (4.9)$$

$$q_{d,b} = \gamma_d \left(1.2G_k + A_d + 1.5 \left(Q_k + \sum \psi_{0,i} q_i \right) \right) \quad (4.10)$$

$$q_d = \max(q_{d,a}; q_{d,b}) \quad (4.11)$$

4.2 Beräkningsmetodik - svensk standard

Olika beräkningsmetoder används för bedömning av pålars bärförmåga vid axiell belastning. I Pålkommisionens *Rapport 106 - Verifiering av geoteknisk bärförmåga för pålar enligt Eurokod*, beskrivs de mest lämpade metoderna för påldimensionering av kohesionspålar i enlighet med Eurokod (Alheid m. fl., 2014). Rapporten förespråkar en kombination av den metod som presenteras i *Rapport 100* av Pålkommisionen, samt i *Rapport 8:2008, rev 2* av Implementeringskommisionen för Europastandarder inom Geoteknik (IEG) (Eriksson m. fl., 2004) (IEG, 2008). Som resultat av denna rekommendation genomfördes därför dimensioneringen enligt svensk standard med utgångspunkt från dessa förespråkade metoder.

Vid beräkning av den dimensionerande bärförmågan i kohesionsjord kan en totalspänningsanalys genomföras, en metod som förespråkas av IEG (2008). Totalspänningsanalysen benämns av IEG som en allmänt vedertagen svensk beräkningsmetod, varvid den i aktuellt arbete bedöms lämplig. Undersökta jordlager innehåller lermorän, varvid det även bör genomföras en effektivspänningsanalys, detta eftersom fasta leror kan medföra en lägre bärförmåga än den som beräknats enligt totalspänningsanalysen (IEG, 2008). Bärförmågan i en kohesionsjord bedöms slutligen som den lägsta beräknade bärförmågan enligt totalspänningsanalysen respektive effektivspänningsanalysen, i enlighet med anvisad metod angiven i IEG (2008), vilket presenteras i ekvation 4.12.

$$R_{c,d} = \min \{ R_{s\alpha,d}, R_{s\beta,d} \} \quad (4.12)$$

4.2.1 Partialkoefficienter och korrelationsfaktorer

Vid beräkning av den dimensionerande bärförmågan applicerades ett antal partialkoefficienter och korrelationsfaktorer.

Partialkoefficienter som beaktar modellosäkerhet för kohesionspålar, $\gamma_{Rd,\alpha}$ respektive $\gamma_{Rd,\beta}$, tillämpades vid beräkning av karakteristisk bärförmåga, vid såväl total- som effektivspänningsanalysen. $\gamma_{Rd,\alpha}$ ansattes till 1,1 och $\gamma_{Rd,\beta}$ ansattes till 1,2, i enlighet med tabell 4.4 i IEG (2008). Ytterligare beaktades även en partialkoefficient, γ_s , som beaktar den osäkerhet som existerar vid analytisk beräkning av slagna mantelbärande pålar. I aktuellt arbete ansattes γ_s till 1,3 i enlighet med IEG (2008).

Korrelationsfaktorn som tillämpades, ξ_3 , beaktar antalet geotekniska undersökningar som ligger till underlag för den analytiska beräkningen. I aktuellt arbete genomfördes enbart CPT varvid ξ_3 ansattes till 1,4, i enlighet med Eurokod (SS-EN 1997-1:2005).

4.2.2 Totalspänningsanalys

Totalspänningsanalysen, även kallat α -metoden, är en metod för att uppskatta mantelbärförmågan hos pålar i kohesionsjordar. Metoden beräknar enbart den mantelbärande förmågan hos pålen och försummar därför den spetsbärande förmågan eftersom den bedömdes underordnad (IEG, 2008). α -metoden, som tillämpades i aktuellt arbete, finns redovisad i Pålkommisionens *Rapport 100*, och är framtagen av Eriksson m.fl (2004), se ekvation 4.13.

$$R_{s\alpha} = \alpha \kappa_t \theta c_u L_i \quad (4.13)$$

Vid beräkning av mantelbärförmågan, $R_{s\alpha}$ enligt α -metoden, beaktas κ_t , vilket är en multiplikator som beaktar lastvaraktighetsberoende skjuvhållfasthet, θ som är pålens omkrets, den omgivande jordens skjuvhållfasthet, C_u , pålens längd i respektive jordlager, L_i samt en vidhäftningsfaktor, α (Eriksson m. fl., 2004). κ_t ansattes i aktuellt arbete till 0,7, i enlighet med föreskriven metod av Eriksson m.fl., eftersom pålarna belastas under lång tid (2004).

Vidhäftningsfaktorn, α , beaktar påldimension, överkonsolideringsgrad i omgivande jord samt tidsrymden mellan installation och belastning av konstruktionen. Ekvationen som användes finns presenterad i Pålkommisionens *Rapport 100*, se ekvation 4.14 (Eriksson m. fl., 2004).

$$\alpha = \alpha_{okorr} \kappa_{\phi} \kappa_f \kappa_{OCR} \kappa_T \quad (4.14)$$

där α_{okorr} är den okorrigerade vidhäftningsfaktorn och κ avser multiplikatorer som tar hänsyn till olika parametrar. κ_{ϕ} beaktar pålens diameter, κ_f pålens form, κ_{OCR} jordens överkonsolideringsgrad och κ_T tiden mellan installation av pålarna och pålastning.

I aktuellt arbete ansattes α_{okorr} till 1,0 eftersom full vidhäftning antogs. κ_{ϕ} ansattes till 0,9 eftersom påldiametern är i intervallet 0,2-0,35 meter. κ_f sattes till 1,0 eftersom pålen har ett konstant tvärsnitt. κ_{OCR} sattes till 0,4 eftersom jordens överkonsolideringsgrad $OCR > 2,5$. Slutligen ansattes κ_T till 1,0, som effekt av tidsintervallet mellan installation och pålastning.

Karakteristisk mantelbärförmåga bestämdes därefter enligt 4.15, utifrån genomförd totalspänningsanalys, i enlighet med SS-EN 1997-1 (2005). Vid framtagning av karakteristiskt värde beaktas en partialkoefficient, $\gamma_{Rd,\alpha}$, samt en korrelationsfaktor, ξ_3 .

$$R_{s\alpha,k} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{s\alpha,i}}{\gamma_{Rd,\alpha} \xi_3 / 1.1} \quad (4.15)$$

Utifrån den beräknade karakteristiska mantelbärförmågan beräknades slutligen ett dimensionerande värde för bärförmågan enligt ekvation 4.16 (SS-EN 1997-1:2005).

$$R_{s\alpha,d} = \frac{R_{s\alpha,k}}{\gamma_s} \quad (4.16)$$

4.2.3 Effektivspänningsanalys

Effektivspänningsanalysen, även kallat β -metoden, är en beräkningsmetod som används för att uppskatta mantelbärförmågan, $R_{s\beta}$, med hänsyn till jordens effektiva överlagringstryck. Beräkningsmetoden som användes i aktuellt arbete utfördes enligt

metoden som presenterades i *Pålgrundläggningshandboken* (Holm & Olsson, 1993), i enlighet med rekommendation av IEG (2008). Den presenterade metoden i *Pålgrundläggningshandboken* är framtagen av Flaate & Selnes (1977). Beräkningen av mantelbärförmågan utifrån en effektivspänningsanalys utfördes således enligt ekvation 4.17.

$$R_{s\beta} = A_s \beta \sigma'_0 \quad (4.17)$$

där A_s är mantelns area, β är vidhäftningsfaktorn som tillämpas när pålen och jorden antas uppträda dränerat och σ'_0 är jordens effektiva överlagringstryck.

β -faktorn beräknas på olika sätt för kohesionsjord och friktionsjord. I aktuella jordlager återfinns sandig lermorän, vilket betraktas som en kohesionsjordart. Beräkningen för β -faktorn utfördes således enligt ekvation 4.18 (Holm & Olsson, 1993).

$$\beta = 0,4\mu_L\sqrt{OCR} \quad (4.18)$$

Vid beräkning av β för kohesionsjordarter beaktas pålens längd i jord i form av en faktor, μ_L , vilken beräknas enligt 4.19 (Holm & Olsson, 1993). Vidare togs hänsyn även till jordens överkonsolideringskvot, OCR .

$$\mu_L = \frac{L_i + 20}{2L_i + 20} \quad (4.19)$$

Den karakteristiska bärförmågan beräknades sedan, utifrån den genomförda effektivspänningsanalysen, enligt 4.20 (SS-EN 1997-1:2005).

$$R_{s\beta,k} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{s\beta}}{\gamma_{Rd}\xi_3/1,1} \quad (4.20)$$

Slutligen beräknades den dimensionerande mantelbärförmågan enligt föreskrivet Eurokod (SS-EN 1997-1:2005), vilket presenteras i ekvation 4.21.

$$R_{s\beta,d} = \frac{R_{s\beta,k}}{\gamma_s} \quad (4.21)$$

4.3 Beräkningsmetodik - dansk standard

Vid bedömning av en påles karakteristiska bärförmåga, enligt dansk beräkningsmetodik, beaktas kapaciteten för manteln såväl som för pålspetsen (DS/EN 1997-1 DK NA:2021). I följande avsnitt redovisas beräkningsmetoden för en pålgrundläggning, med utgångspunkt i den nationella bilagan till den danska Eurokoden, DS/EN 1997-1 DK NA:2021.

4.3.1 Partialkoefficienter och korrelationsfaktorer

Vid tillämpning av dansk standard applicerades en partialkoefficient, γ_t , som tar hänsyn till det kombinerade motståndet för spets- och mantelbärförmåga vid tryckta pålar. Partialkoefficienten ansattes i enlighet med tabell A.3-2 i den nationella bilagan till Eurokod 7 till 1,3 (DS/EN 1997-1 DK NA:2021).

Korrelationsfaktorn, ξ , ansattes i enlighet med avsnitt A.3.2.3 i den nationella bilagan till den danska Eurokoden (DS/EN 1997-1 DK NA:2021) till 1,5, eftersom bärförmågan i aktuellt arbete fastställdes analytiskt utifrån egenskaper framtagna via geotekniska undersökningar.

4.3.2 Mantelbärförmåga

För pålar belägna i kohesionsjord beräknas den karakteristiska bärförmågan, $R_{s,cal}$, enligt ekvation 4.22 (DS/EN 1997-1 DK NA:2021). Mantelbärförmågan beräknas för varje ingående jordlager, och summeras sedan för att generera den totala mantelbärförmågan.

$$R_{s,cal} = rmc_u A_s \quad (4.22)$$

Ekvationen beaktar mantelarea, jordens skjuvhållfasthet, en materialspecifik parameter samt en regenerationsfaktor. Den materialspecifika parametern, m , beaktar pålmaterial, vilket i aktuellt arbete är betong. I enlighet med DS/EN 1997-1 DK:NA 2021 ansattes därav parametern till 1,0. Regenerationsfaktorn, r , beror på den omgivande

jordens respons på påldrivningen. Knudsen m.fl (2019) beskrev att parametern kan ansättas till 0,4 om den odränerade skjuvhållfastheten understiger 500 MPa. I den nationella bilagan till den danska Eurokoden hänvisas det till 0,4 som ett lämpligt parametervärde, vilket styrker föregående antagande ytterligare (DS/EN 1997-1 DK NA:2021). Mot denna bakgrund ansattes r därigenom till 0,4.

4.3.3 Spetsbärförmåga

För att fastställa den spetstillförda karakteristiska bärförmågan, $R_{b,cal}$, hos en påle i kohesionsjord tillämpades ett empiriskt uttryck. Uttrycket förespråkas i den danska dimensioneringsstandarden DS/EN 1997-1 DK:NA 2021, varvid det bedömdes lämpligt att tillämpa. Uttrycket presenteras i ekvation 4.23. Spetsen befinner sig i det undre lagret av lermorän, varvid det är skjuvhållfastheten i detta lager som tillämpas vid beräkning av spetsbärförmågan.

$$R_{b,cal} = 9c_u A_b \quad (4.23)$$

Ekvationen beaktar den odränerade skjuvhållfastheten, pålens spetsarea samt en parameter som kallas Pælespids faktorn. Pælespids faktorn ansattes i aktuellt arbete till 9, eftersom detta är värdet som såväl den danska standarden (DS/EN 1997-1 DK NA:2021) som Knudson mfl. (2019) förespråkar vid lermorän där skjuvhållfastheten understiger 500 MPa.

4.3.4 Beräknad bärförmåga

I dansk dimensioneringsstandard kan den karakteristiska bärförmågan för en tryckt påle, $R_{c,k}$, beräknas i enlighet med den nationella bilagan till Eurocode 7 (DS/EN 1997-1 DK NA:2021). Mantelbärförmågan och spetsbärförmågan summeras, och divideras sedan med en korrelationskoefficient, ξ , enligt ekvation 4.24.

$$R_{c,k} = \frac{R_{b,cal} + R_{s,cal}}{\xi} \quad (4.24)$$

Den dimensionerande bärförmågan, $R_{c,d}$, beräknades därefter i enlighet med ekvation 4.25.

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} \quad (4.25)$$

4.4 Dynamisk stötvågsmätning

För att skapa en god förståelse för processen vid en dynamisk stötvågsmätning, samt hur en CAPWAP-analys går till, genomfördes ett studiebesök på företaget Pålanalys i Göteborg. Där fick vi en genomgång på hur stötvågsmätningen går till i fält, samt vilka ekvationer som ligger bakom beräkningen i CAPWAP-analysen som genomförs därefter. Materialet vi fick ta del av är detsamma som kursmaterialet företag i branschen erbjuder, och gav oss en ytterligare förståelse för den metod som finns dokumenterad i *Pålgrundläggningshandboken* (Holm & Olsson, 1993). Utöver en teoretisk genomgång fick vi även vara med och se hur programmet fungerade vid CAPWAP-analysen, genom att studera kurvorna och laborera med de ansatta värdena i relation till den data uppmätt i fält. Dessutom fick vi även studera grafer från PDA-mätning och CAPWAP-analys, från undersökt referensprojekt samt övriga projekt. Det presenterades hur det går att se om en påle exempelvis blivit skadad under drivning, samt var på kurvorna det går att utvärdera fördelningen av mantel- respektive spetsbärförmågan.

4.4.1 Partialkoefficienter och korrelationsfaktorer

Korrelationsfaktorerna som tillämpas vid dynamisk provbelastning, ξ_5 och ξ_6 , beror på antalet pålar som provats (SS-EN 1997-1:2005). I tillhandahållet material presenteras resultat från fem stycken pålar som utsatts för dynamisk provbelastning (Schultz,

2022). Värden för korrelationsfaktorerna ansattes således i enlighet med tabell A.11 i Eurokod till 1,5 för ξ_5 respektive 1,35 för ξ_6 (SS-EN 1997-1:2005).

Patialkoefficienten som tillämpades vid dimensionering utifrån dynamisk provbelastning, $\gamma_{t,CAP}$, beaktar det kombinerade motståndet för spets- och mantelbärförmågan (Boverket, 2022). $\gamma_{t,CAP}$ ansattes till 1,2 i enlighet med tabell I-7 i Boverkets dokument *EKS12* (2022).

4.4.2 Dynamisk provpåling - CAPWAP-analys

Utifrån PDA-rapport, som tillhandahölls i projekteringsmaterialet, erhöles grafer från genomförd PDA-mätning (Schültz, 2022). Vidare presenterade Schültz värden för uppmätt bärförmåga för vardera provpåle, vilka uppmätts och utvärderats med CAPWAP.

Uppmätt total bärförmåga

Uppmätta värden för den mobiliserade bärförmågan per provad påle angavs i PDA-rapporten och presenteras i tabell 4.2 (Schültz, 2022). Vidare anges att dämpningsfaktorn, J_c ansatts till 0,7 (Schültz, 2022).

Tabell 4.2: Erhållna värden på pålarnas bärförmåga enligt CAPWAP.

Påle	Uppmätt bärförmåga, R_c [kN]
C-P14	2 463
C-P17	2 422
C-P26	2 026
C-P66	2 566
C-P71	2 086

Den karakteristiska bärförmågan kan beräknas enligt ekvation 4.26, i de fall där värdena grundar sig i en dynamisk provbelastning (SS-EN 1997-1:2005). Korrelationsfaktorerna, ξ_5 och ξ_6 , tillämpas på medelvärdet respektive det lägsta värdet som uppmätts för de provade pålarnas tryckbärförmåga enligt ekvation 4.26 (SS-EN 1997-1:2005).

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,m})_{mean}}{\xi_5}, \frac{(R_{c,m})_{min}}{\xi_6} \right\} \quad (4.26)$$

I *EKS12* anges att värdena för korrelationsfaktorerna, ξ_5 och ξ_6 , multipliceras med 0,85 om de uppmätta bärförmågorna uppskattats utifrån en dynamisk provbelastning med signalmatchning, vilket motsvarar aktuellt fall (Boverket, 2022).

Dimensionerande bärförmåga, utifrån dynamisk provbelastning, kan därefter uppskattas enligt ekvation 4.27 (SS-EN 1997-1:2005).

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_{t,CAP}} \quad (4.27)$$

Uppmätt fördelning av bärförmåga

Utifrån graferna presenterade i det tillhandahållna materialet i PDA-mätningen kan en studie av bärförmågans fördelning längs pålen genomföras. En optimering av uppmätt bärförmåga i fält och ett antal ansatta parametrar genomförs, i enlighet med avsnitt 2.5. Optimeringen anses tillräcklig när faktorn *CAPWAP-match quality*, ett mått på avvikelser, understiger värdet 5, vilket uppgavs av Pålanalys i Göteborg. CAPWAP-analysen genomför sedan beräkningar som resulterar i såväl en total bärförmåga som en grov uppskattning av mantelns respektive spetsens bidrag.

4.5 Jämförelsestudie

För att studera de ekonomiska effekter samt de hållbarhetseffekter som orsakas av skillnaden av standard mellan Sverige och Danmark jämfördes påföljderna av dimensioneringen.

4.5.1 Referensprojekt

Som underlag till såväl kostnadsanalys som hållbarhetsanalys tillämpades det aktuella referensprojektet *Kv. Hanna*. Den dimensionerade lasten, presenterad i avsnitt 5.1.3, jämfördes med den beräknade dimensionerande bärförmågan för dansk respektive svensk standard, vilka presenterades i avsnitt 5.2.4, se ekvation 4.28. Jämförelsen genererade ett erforderligt antal pålar vid beräkning enligt svensk respektive dansk standard.

$$\text{Antal pålar} = \frac{q_d}{R_{c,d}} \quad (4.28)$$

4.5.2 Kostnadsanalys

För att studera de ekonomiska effekter som orsakas av skillnaden av standard mellan Sverige och Danmark ansattes kostnader för material, transport, installation och etablering. Till installationskostnaden hör såväl maskin som personal.

För att ansätta priser som motsvarar prisbilden i dagsläget kontaktades tre leverantörer, med en förfrågan om prispförslag. Prispförslaget som efterfrågades syftar till en grundläggning med hundra stycken betongpålar av typen SP2 med 11 meters längd utan skarv. Det specificerades även vilka geotekniska förhållanden som råder i projektområdet, samt att det är beläget i Burlöv. I förfrågningen ställdes följande frågor.

- Hur stor materialkostnad per påle hade ni ansatt om pålarna skulle utföras med CEM II?
- Hur stor installationskostnad hade ni ansatt per påle? I installationskostnaden inkluderas slagning och mätning av pålar, samt även transport av pålar till projektet och tjänstemannakostnad som följer installationen.
- Hur stor etableringskostnad hade ni ansatt för grundläggningen? I etableringskostnaden inkluderas att slagningsmaskin transporteras ut till projektet.

Utifrån erhållna prispförslag togs ett medelvärde fram för vardera kategori. Dessa kostnader ansattes därefter i kostnadsanalysen. I tabell 4.3 presenteras en sammanställning av erhållna prispförslag från respektive leverantör samt beräknat medelvärde.

Tabell 4.3: Sammanställning av erhållna kostnadsuppskattningar.

Kategori	Leverantör 1	Leverantör 2	Leverantör 3	Medelvärde
Materialkostnad per påle [SEK]	3 900	4 600	5 780	4 760
Installationskostnad per påle [SEK]	1 800	2 850	2 800	2 480
Etableringskostnad [SEK]	50 000	55 000	52 500	52 500

En övergripande kostnadsbild vid en pålgrundläggning beräknades sedan baserat på framtagna kostnadsuppskattningar presenterade i tabell 4.3, se ekvation 4.29.

$$\text{Kostnad} = n \cdot (\text{Materialkostnad} + \text{Installationskostnad}) + \text{Etableringskostnad} \quad (4.29)$$

Etableringskostnaden är en totalkostnad för etableringen av arbetsområdet, medan materialkostnaden samt installationskostnaden beror på antalet pålar, n .

4.5.3 Hållbarhetsanalys

För att studera de hållbarhetseffekter som orsakas av skillnaden av standard genomfördes en sammanställning av klimatdata för betongpålar av typ SP2, vilket användes i projektet. Vidare uppskattades minskningen av koldioxidutsläpp för hela konstruktionen, om grundläggningen utförts enligt dansk standard istället för svensk.

Klimatdata

Som grund för hållbarhetsanalysen ligger rapporten *Klimatdata för geokonstruktioner* (Smart Built Environment, 2023). Rapporten har upprättats av Smart Built Environment (SBE) ett strategiskt innovationsprogram som åsyftar att skapa förutsättningar för att göra byggsektorn mer klimatsmart. I rapporten beskrivs det att inom SBE samarbetar personer från såväl kommuner som myndigheter och näringsliv. Upprättandet av denna rapport leddes av Statens geotekniska institut, SGI, och genomfördes i samarbete med livscykelanalytiker och geotekniker från Familjebostäder AB, IVL Svenska Miljöinstitutet, Skanska Sverige AB samt Sweco Sverige AB (Smart Built Environment, 2023).

Sammanställningen baserades på existerande materialdata och miljövarudeklarationer, benämnda EPD:er, upprättade i såväl Sverige som andra europeiska länder.

SBE presenterar i sin rapport klimatdata för betongpålar av typen SP2 för modul A1 till A5, det vill säga produktskedet och byggproduktionsskedet. Datan anges per meter påle och har sammanställts i tabell 4.4 (Smart Built Environment, 2023). SBE angav i sin rapport att pålarnas antagna transportavstånd till byggarbetsplatsen ansatts till 100 km. Detta avstånd bedömdes rimligt även i aktuellt fall då pålarna som använts i referensprojektet tillverkats i en fabrik som ligger strax under 100 km ifrån byggarbetsplatsen.

Tabell 4.4: Klimatdata för betongpålar av typ SP2 [m].

Modul	GWP-GHG* $[\frac{kgCO_2e}{m}]$
A1-A3: Tillverkning	35,6
A4: Transport	2,1
A5: Arbeta	0,7
A5: Byggspill - tillverkning	1,4
A5: Byggspill - transport	0,1
$\sum A1 - A5$	39,9

* Global Warming Potential- Greenhouse Gas

Minskning av koldioxidutsläpp

För att tydligare kunna koppla de hållbarhetseffekter som orsakas av skillnaden av standard till aktuellt projekt görs en uppskattning av hur mycket mindre utsläppen av CO₂ blir vid beräkning enligt dansk standard, i förhållande till när beräkningen görs enligt svensk standard.

Enligt IVA underskattas byggnadens totala utsläpp med ungefär 50% i dagsläget, som en effekt av att djupgrundläggningar inte beaktas i klimatdeklarationen (2014). Med utgångspunkt i IVAs uppskattning ansattes att utsläppen som genereras från grundläggningen, vid tillämpning av svensk standard, motsvarar 50% av resterande del av byggnadens utsläpp. Byggnadens totala utsläpp, inklusive djupgrundläggningen, beräknades således enligt ekvation 4.30.

$$CO_2-e_{tot} = 3 \cdot CO_2-e_{svensk} \quad (4.30)$$

Andelen av de totala utsläppen som kommer från grundläggningen, vid dimensionering enligt svensk standard, blir således enligt ekvation 4.31.

$$Kvot_{svensk} = \frac{CO_2-e_{svensk}}{CO_2-e_{tot}} \quad (4.31)$$

Ur grundläggningens beräknade utsläpp, genererat utifrån tillämpning av svensk respektive dansk standard, beräknades kvoten värdena emellan enligt ekvation 4.32.

$$Kvot = \frac{CO_2-e_{dansk}}{CO_2-e_{svensk}} \quad (4.32)$$

Utifrån ekvation 4.32 erhöles den procentuella skillnaden mellan koldioxidutsläppen från en grundläggning utförd enligt svensk respektive dansk standard. Slutligen kunde den procentuella minskningen av koldioxidutsläpp, för hela konstruktionen, uppskattas om grundläggningen utförs enligt dansk standard, istället för svensk. Detta beräknades enligt ekvation 4.33.

$$\text{Minskning av utsläpp} = \text{Grundläggningskvot}_{svensk} - (\text{Grundläggningskvot}_{svensk} \cdot kvot) \quad (4.33)$$

5 Resultat

I detta avsnitt presenteras de resultat som erhöles från såväl de analytiska beräkningarna som den dynamiska stötvågs mätningen. Vidare presenteras även resultat från jämförelseanalysen.

5.1 Lastnedräkning

Med utgångspunkt i tillhandahållet projektmaterial genomfördes en lastnedräkning av den last som verkar på pålgrundläggningen.

5.1.1 Permanenta laster

Vid beräkning av lasten som verkar på pålgrundläggningen beaktas egentyngder från byggnaden. Beräknade egentyngder presenteras i tabell 5.1.

Tabell 5.1: Egentyngder från byggnaden.

Byggnadsdel	Beteckning	Last [kN]
Solceller	$g_{k,solceller}$	51
Terrass	$g_{k,terrass}$	1 700
Installationer (bostad och lokal)	$g_{k,inst}$	2 200
Innerväggar och golvbeläggning (bostad och lokal)	$g_{k,innervggochgolv}$	3 600
Bjälklag (bostad)	$g_{k,bjlbostad}$	28 000
Bjälklag (lokal)	$g_{k,bjllokal}$	2 100
Bärande väggar	$g_{k,brandevggar}$	11 000
Balkonger	$g_{k,balkong}$	3 600
Grundplatta	$g_{k,grundplatta}$	2 200

Den permanenta lasten, G_k , beräknades därefter som summan av egentyngderna presenterade i tabell 5.1, i enlighet med ekvation 4.1.

$$G_k \approx 55000 \text{ kN}$$

5.1.2 Variabla laster

Snölast

Snölasten beräknades enligt ekvation 4.2.

$$s = 0,8 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,64 \text{ kN/m}^2$$

$$s = 0,64 \cdot 18 \cdot 19 \approx 220 \text{ kN}$$

Vindlast

Byggnadens slankhet beräknades enligt ekvation 4.4.

$$\frac{H}{d} = \frac{52}{18} \approx 2,89$$

I tabell 5.2 presenteras indata och beräknad utvändig vindlast mot respektive zon enligt ekvation 4.3. Då kvoten $\frac{H}{d}$ ligger mellan 1 och 5 bestämdes $C_{pe,10}$ för zon E genom linjär interpolering, i enlighet med eurokod (SS-EN 1991-1-4:2005, 2008).

Tabell 5.2: Utvändig vindlast.

Zon	$C_{pe,10}$	w_e [kN/m ²]	q_{vind} [kN/m]
D	0,8	1,208	22,95
E	0,59	0,898	17,05

Den totala utvändiga vindlasten är summan av vindlasten mot respektive zon.

$$w_{e,tot} \approx 40,0 \text{ kN/m}$$

Den totala vindlasten bestämdes slutligen enligt ekvation 4.5 till den totala utvändiga vindlasten, då den invändiga vindlasten inte ger något nettotillskott till horisontallasten.

$$q_{vind} = w_{e,tot} \approx 40 \text{ kN/m}$$

Det stjälpande momentet som vindlasten ger upphov till beräknades därefter enligt ekvation 4.6.

$$M_{vind} = \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot 52^2 \approx 54,1 \text{ MNm}$$

Slutligen bestämdes den vertikala lasten som vinden gav upphov till enligt ekvation 4.7.

$$N_{vind} = \frac{65700}{18} \approx 3005 \text{ kN}$$

Nyttig last

Reduktion av den nyttiga lasten som verkar på bostadsbjälklagen beräknades enligt ekvation 4.8.

$$\alpha_n = \frac{2 + (n - 2) \cdot 0,7}{12} \approx 0,75$$

Värden för den nyttiga lasten erhöles i tillhandahållet material och presenterades i tabell 4.1. Den totala nyttiga lasten som verkar på pålgrundläggningen beräknades genom att erhållna lastvärden multiplicerades med den yta de verkar på, vilket presenteras i tabell 5.3.

Tabell 5.3: Nyttig last.

Del av byggnad	Belastad yta [m ²]	Nyttig last, q_k [kN/m ²]	Reduktion, α_n	Nyttig last [kN]
Bjälklag och trappor i bostäder	3 500	2,0	0,75	5 250
Bjälklag lokal	290	5,0	-	1 460
Bjälklag garage	290	2,5	-	725
Övriga trappor	750	3,0	-	2 250
Balkong	580	3,5	-	2 030
Terrass	170	5,0	-	850

Samtliga kategorier har en reduktionsfaktor, ψ_0 , på 0,7, varvid den nyttiga lasten inte behövde hållas åtskild inför dimensioneringen. Därav beräknades en summerad nyttig last.

$$q_k \approx 12600 \text{ kN}$$

5.1.3 Dimensionerande last

I tabell 5.4 presenteras en sammanställning av de laster som verkar på pålgrundläggningen. Ingående värden är de orörds laster som vidare tillämpas för bestämning av dimensionerande last.

Tabell 5.4: Indata för beräkning av lasten som verkar på pålgrundläggningen.

Parameter	Last [kN]
Permanent last, G_k	55 000
Snölast, s	220
Vindlast, q_{vind}	3 005
Olyckslast, F_k	50
Nyttig last, q_k	12 600

Utifrån lasterna som presenterats i tabell 5.4 beräknades den dimensionerande lasten som verkar på pålgrundläggningen enligt ekvation 4.9 samt 4.10. Erhållna värden presenteras i tabell 5.5.

Tabell 5.5: Beräknade laster enligt ekvation 4.9 samt 4.10.

Ekvation	Huvudlast	Last [kN]
4.9 - STR 6.10a	-	74 000
4.10 - STR 6.10b	Snölast, s	78 000
4.10 - STR 6.10b	Vindlast, q_{vind}	84 000
4.10 - STR 6.10b	Olyckslast, F_k	81 000
4.10 - STR 6.10b	Nyttig last, q_k	86 000

Den dimensionerande lasten bestämdes slutligen enligt ekvation 4.11.

$$q_d \approx 86 \text{ MN}$$

5.2 Analytisk och dynamisk bärförmåga

5.2.1 Analytisk beräkning - svensk standard

Totalspänningsanalys

En totalspänningsanalys genomfördes för de två ingående lagren av lermorän, i enlighet med avsnitt 4.2.2.

Vidhäftningsfaktorn, α , beräknades i enlighet med ekvation 4.14.

$$\alpha = 1,0 \cdot 0,9 \cdot 1,0 \cdot 0,4 \cdot 1,0 = 0,36$$

Därefter genomfördes en totalspänningsanalys för de båda ingående lagren av lermorän, i enlighet med ekvation 4.13. Värderna som ansattes på omkrets, θ , skjuvhållfasthet, c_u och pållängd, L_i presenterades i avsnitt 3.3.3 och tabell 3.2.

$$R_{s\alpha, \text{lager1}} = 0,36 \cdot 0,7 \cdot 1,08 \cdot 100 \cdot 3 \approx 80 \text{ kN}$$

$$R_{s\alpha, \text{lager2}} = 0,36 \cdot 0,7 \cdot 1,08 \cdot 140 \cdot 8 \approx 310 \text{ kN}$$

Den totala karakteristiska bärförmågan beräknades sedan utifrån den genomförda totalspänningsanalysen i enlighet med ekvation 4.15. Partialkoefficienten, $\gamma_{Rd, \alpha}$, samt

korrelationsfaktor, ξ_3 som tillämpades presenterades i avsnitt 4.2.1.

$$R_{s\alpha,k} = \frac{80 + 310}{1,1 \cdot \frac{1,4}{1,1}} \approx 280 \text{ kN}$$

Slutligen beräknades den dimensionerande bärförmågan, baserad på den genomförda totalspänningsanalysen. Beräkningen genomfördes i enlighet med ekvation 4.16. Partialkoefficienten som tillämpades, γ_s , presenterades i avsnitt 4.2.1.

$$R_{s\alpha,d} = \frac{280}{1,3} \approx 210 \text{ kN}$$

Effektivspänningsanalys

En effektivspänningsanalys genomfördes för de två lagren av lermorän, enligt metod presenterad i avsnitt 4.2.3.

Vidhäftningsfaktorn, β , beräknades i enlighet med ekvation 4.17 för de två ingående lagren av lermorän. Inför beräkningen av β togs ytterligare en faktor fram, μ_L , i enlighet med ekvation 4.19 Pällängd, L_i , samt OCR presenterades i avsnitt 3.3.3.

$$\mu_{L,lager1} = \frac{3 + 20}{2 \cdot 3 + 20} = 0,88$$

$$\beta_{lager1} = 0,4 \cdot 0,88 \cdot \sqrt{29} \approx 1,9$$

$$\mu_{L,lager2} = \frac{8 + 20}{2 \cdot 8 + 20} = 0,77$$

$$\beta_{lager2} = 0,4 \cdot 0,77 \cdot \sqrt{7} \approx 0,8$$

Därefter genomfördes en effektivspänningsanalys för de båda ingående lagren, i enlighet med ekvation 4.17. Mantelarean, A_s , och jordens effektiva överlagringstryck, σ'_0 , vilket motsvarar den effektiva vertikalspänningen, presenterades i avsnitt 3.3.3.

$$R_{s\beta,lager1} = 3,24 \cdot 1,9 \cdot 12,5 \approx 80 \text{ kN}$$

$$R_{s\beta, \text{lager2}} = 8,64 \cdot 0,8 \cdot 80 \approx 560 \text{ kN}$$

Sedan beräknades den karakteristiska bärförmågan med utgångspunkt i den utförda effektivspänningsanalysen, i enlighet med ekvation 4.20. Partialkoefficienten, $\gamma_{Rd,\beta}$, samt korrelationskoefficienten, ξ_3 , som tillämpades presenterades i avsnitt 4.2.1.

$$R_{s\beta,k} = \frac{80 + 560}{1,2 \cdot \frac{1,4}{1,1}} \approx 420 \text{ kN}$$

Slutligen beräknades en dimensionerande bärförmåga med utgångspunkt i den genomförda effektivspänningsanalysen, i enlighet med ekvation 4.21. Partialkoefficienten som tillämpades presenterades i avsnitt 4.2.1.

$$R_{s\beta,d} = \frac{420}{1,3} \approx 320 \text{ kN}$$

Total bärförmåga per påle

Den totala bärförmågan bestämdes i enlighet med ekvation 4.12, vilken presenterades i avsnitt 4.2. Utifrån värdena på resulterande dimensionerande bärförmåga, framtagna ur totalspänningsanalysen respektive effektivspänningsanalysen, bestämdes den slutgiltiga dimensionerande bärförmågan, $R_{c,d}$.

$$R_{c,d} = \min(210, 320) = 210 \text{ kN}$$

5.2.2 Analytisk beräkning - dansk standard

Mantelbärförmåga

Mantelbärförmågan beräknades i enlighet med avsnitt 4.3.2 och ekvation 4.22, för de två ingående skikten av lermorän. Skjuvhållfastheten, c_u , samt mantelarean, A_s , för de ingående lagren presenterades i avsnitt 3.3.3, tabell 3.2.

$$R_{s, \text{cal}, \text{lager1}} = 0,4 \cdot 1,0 \cdot 110 \cdot 3,24 \approx 140 \text{ kN}$$

$$R_{s,cal,lager2} = 0,4 \cdot 1,0 \cdot 150 \cdot 8,64 \approx 530 \text{ kN}$$

Därefter summerades tillskotten från respektive lager, för att få den totala mantelbärförmågan.

$$R_{s,cal} = 140 + 530 = 680 \text{ kN}$$

Spetsbärförmåga

Spetsbärförmågan beräknades i enlighet med avsnitt 4.3.3 och ekvation 4.23 för det undre skiktet av lermorän. Skjuvhållfastheten, c_u , samt spetsarean, A_b , för det undre lagret av lermorän presenterades i avsnitt 3.3.3, tabell 3.2.

$$R_{b,cal} = 9 \cdot 150 \cdot 0,073 \approx 100 \text{ kN}$$

Total bärförmåga

Den totala karakteristiska bärförmågan beräknades i enlighet med avsnitt 4.3.4 och ekvation 4.24. Korrelationsfaktorn som tillämpades presenterades i avsnitt 4.3.1.

$$R_{c,k} = \frac{680 + 100}{1,5} \approx 520 \text{ kN}$$

Den dimensionerande totala bärförmågan beräknades sedan i enlighet med avsnitt 4.3.4 och ekvation 4.25. Partialkoefficienten som tillämpades presenterades i avsnitt 4.3.1.

$$R_{c,d} = \frac{520}{1,3} \approx 400 \text{ kN}$$

5.2.3 Dynamisk provpålning - CAPWAP

Utifrån den dynamiska provpålningen erhöles data för uppmätt total bärförmåga samt data för fördelningen av mantelns respektive spetsens bidrag till den totala bärförmågan.

Uppmätt total bärförmåga

Utifrån den dynamiska provpålingen beräknades den karakteristiska bärförmågan enligt ekvation 4.26. Därefter beräknades den dimensionerande bärförmågan enligt ekvation 4.27. Korrelationsfaktorerna och partialkoefficienten som tillämpades presenterades i avsnitt 4.4.1.

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{2313}{1,5 \cdot 0,85}; \frac{2026}{1,35 \cdot 0,85} \right\} = \min(1810; 1770) \approx 1770 \text{ kN}$$

$$R_{c,d} = \frac{1770}{1,2} \approx 1470 \text{ kN}$$

Utifrån den dynamiska provpålingen uppskattades således vardera påle ha en dimensionerande bärförmåga på ungefär 1470 kN.

Uppmätt fördelning av bärförmåga

En sammanställning av den uppmätta fördelningen av manteln respektive spetsens bidrag till den mobiliserade bärförmågan, angiven i tillhandahållen PDA-rapport, sammanställdes och presenteras i tabell 5.6. I tabellen anges även hur stor andel av den mobiliserade bärförmågan som beräknats komma från spetsen respektive manteln.

Tabell 5.6: Uppmätt fördelning av mantelns respektive spetsens bidrag till pålens bärförmåga.

Provad påle	Mantelbärförmåga [kN]	Spetsbärförmåga [kN]
C-P14	618 (25%)	1 845 (75%)
C-P17	1 860 (77%)	562 (23%)
C-P26	1 467 (72%)	559 (28%)
C-P66	870 (34%)	1 696 (66%)
C-P71	1 506 (72%)	580 (28%)

Det är värt att notera att provpåle C-P14 och C-P71 avviker i uppmätt fördelning mellan mantel respektive spets. Övriga provpålar uppvisar en ungefärlig mantelfördelning på 75% och en spetsfördelning på cirka 25%. De avvikande provpålarerna uppvisar snarare ett förhållande som är omvänt. Orsaken till detta är att dessa pålar troligtvis har skadats under slagning, vilket är något som går att se antydande till i graferna i tillhandahållet material (Schültz, 2022).

5.2.4 Sammanställning av analytisk och dynamisk bärförmåga.

I tabell 5.7 presenteras en sammanställning av beaktade pålars uppskattade dimensionerande bärförmåga, per påle, utifrån tillämpade beräkningsmetoder.

Tabell 5.7: Sammanställning av uppskattad dimensionerande bärförmåga per påle.

Beräkningsmetod	Total bärförmåga [kN]
Svensk standard	210
Dansk standard	400
Dynamisk provpålning - CAPWAP	1 470

5.3 Jämförelsestudie

I aktuellt avsnitt genomförs en jämförelse av de effekter som orsakas av skillnaden mellan den danska och svenska standarden. Avsnittet syftar till att illustrera de faktiska effekter som den svenska respektive danska standarden medför i aktuellt referensprojekt, med fokus på material- och installationskostnader samt miljöpåverkan.

5.3.1 Referensprojekt

En erforderlig mängd pålar beräknades i enlighet med avsnitt 4.5.1 och ekvation 4.28, som en kvot mellan dimensionerad last och beräknad dimensionerad bärförmåga.

Resultatet presenteras i tabell 5.8.

Tabell 5.8: Erforderlig mängd pålar vid svensk respektive dansk standard.

Standard	Dimensionerande last [MN]	Dimensionerande bärförmåga per påle [kN]	Ungefärligt antal pålar [st]
Svensk standard	86	210	407
Dansk standard	86	400	217

Det bör noteras att värdena i tabell 5.8 är av stor skala. Ett resultat som indikerar att grundläggningen till referensprojektet bör inkludera 407 alternativt 217 stycken pålar bedöms orimligt, och vidare utredning av detta tvivelaktiga resultat genomfördes i avsnitt 6, *Diskussion*. Beräknade antal pålar är dock baserade på respektive lands standard, samt knutna till referensprojektet, varvid resultat presenterat i tabell 5.8 fortsatt kommer utgöra underlaget till kostnads- samt hållbarhetsanalys i aktuellt arbete.

5.3.2 Kostnadsanalys

Kostnadsanalysen genomfördes för svensk- respektive dansk standard i enlighet med avsnitt 4.5.2 och tabell 4.3 som redovisar kostnadsuppskattning.

Svensk standard

I enlighet med avsnitt 5.3.1 och tabell 5.8 genererar dimensionering enligt svensk standard cirka 407 pålar i aktuellt referensprojekt. Utifrån kostnadsuppskattningen samt antalet pålar genomfördes en kostnadsberäkning.

$$\text{Kostnad} = 407 \cdot (4760 + 2480) + 52500 \approx 3,0 \text{ MSEK}$$

Dansk standard

I enlighet med avsnitt 5.3.1 och tabell 5.8 genererar dimensionering enligt dansk standard cirka 217 pålar i aktuellt referensprojekt. Utifrån kostnadsuppskattningen samt antalet pålar genomfördes en kostnadsberäkning.

$$\text{Kostnad} = 217 \cdot (4760 + 2480) + 52500 \approx 1,62 \text{ MSEK}$$

5.3.3 Hållbarhetsanalys

Som underlag för hållbarhetsanalysen användes klimatdatan presenterad i tabell 4.4 i avsnitt 4.5.3. Utifrån denna tabell presenteras att det per meter påle av typ SP2 genereras 39,9 kg CO₂-ekvivalenter.

Vidare uppskattades hur stor inverkan tillämpning av dansk standard, i stället för svensk standard, hade haft på det totala koldioxidutsläppet från hela konstruktionen i aktuellt projekt.

Svensk standard

I enlighet med tabell 5.8 i avsnitt 5.3.1 utförs grundläggningen med 407 pålar á 11 meter, vid dimensionering enligt svensk standard. Tillsammans med klimatdatan presenterad i tabell 4.4 i avsnitt 4.5.3 kunde den genererade mängden koldioxidekvivalenter från tillverkning och installation av pålarna beräknas.

$$407 \cdot 11 \cdot 39,9 \approx 179 \text{ tonCO}_2\text{-ekvivalenter}$$

Dansk standard

Vid dimensionering enligt dansk standard utförs grundläggningen med 217 pålar á 11 meter, i enlighet med tabell 5.8 i avsnitt 5.3.1. Tillsammans med klimatdatan presenterad i tabell 4.4 i avsnitt 4.5.3 kunde den genererade mängden koldioxidekvivalenter från tillverkning och installation av pålarna beräknas.

$$217 \cdot 11 \cdot 39,9 \approx 95 \text{ tonCO}_2\text{-ekvivalenter}$$

Minskning av koldioxidutsläpp

Vid dimensionering av grundläggningen enligt dansk standard, istället för svensk standard, kan den procentuella minskningen av koldioxidutsläpp beräknas enligt ekvation 4.30 till 4.33. Initiellt uppskattades den totala mängden koldioxid som genereras från konstruktionen enligt ekvation 4.30.

$$CO_{2-e_{tot}} = 3 \cdot 179 \approx 537 \text{ tonCO}_2\text{-e}$$

Därefter uppskattades hur stor andel av de totala utsläppen som kommer ifrån grundläggningen vid dimensionering enligt svensk standard, se ekvation 4.31.

$$\text{Grundläggningskvot}_{svensk} = \frac{179}{537} \approx 0,33$$

Kvoten mellan koldioxidutsläppen från grundläggningen vid applicering av svensk respektive dansk standard beräknades därefter enligt ekvation 4.32.

$$\text{Kvot} = \frac{95}{179} \approx 0,53$$

Slutligen beräknades hur mycket mindre konstruktionens totala utsläpp hade blivit om grundläggningen dimensionerats med utgångspunkt i dansk standard, i stället för svensk, enligt ekvation 4.33.

$$\text{Minskning av utsläpp} = 0,33 - (0,33 \cdot 0,53) \approx 16\%$$

5.3.4 Sammanställning av jämförelsestudie

I tabell 5.9 presenteras en sammanställning av de resultat som erhållits från jämförelsestudien.

Tabell 5.9: Sammanställning av resultat ur jämförelsestudie.

Standard	Kostnadsanalys [MSEK]	Hållbarhetsanalys [ton CO₂-ekvivalenter]
Svensk standard	3,0	179
Dansk standard	1,6	95

6 Diskussion

6.1 Bärighetsanalys

I detta avsnitt diskuteras de resultat som erhöles samt de svårigheter som funnits i samband med arbetet. Därtill presenteras ett par exempel på vidare arbete som hade varit av intresse att undersöka, för att utreda standardens lämplighet ytterligare.

Som resultat av de analytiska beräkningsmetoderna presenterades en relativt låg kapacitet per påle, i förhållande till den kapacitet som uppmättes vid stötvågsmätning. Detta kan bero på ett flertal olika faktorer såsom 3D-effekter i jorden som ej beaktas, ansatta egenskaper i geomodellen, antal och typ av utredningar som ligger till grund för beräkningarna, samt säkerhetsmarginaler i standarderna.

I branschen är det allmänt känt att den svenska standarden inte är anpassad för de geologiska förhållanden som återfinns i sydvästra Skåne. Utifrån den analytiska beräkningen bedöms den dimensionerande kapaciteten, enligt svensk standard, vara ungefär en sjättedel av den som uppmättes vid stötvågsmätningen. Vid beräkning enligt dansk standard bedömdes den dimensionerande bärförmågan i stället vara ungefär en fjärdedel av den uppmätta. Följaktligen visar de analytiska beräkningarna att kapaciteten för pålarna är 90% högre vid dimensionering enligt den danska standarden, i kontrast till tillämpning av svensk standard.

Flera av egenskaperna som ansattes var givna i det tillhandahållna materialet och samtliga av dem kontrollerades även mot ytterligare källor innan de bedömdes rimliga och tillämpades vidare. Exempelvis jämfördes den uppmätta grundvattennivån från projekteringsmaterialet med mätningar från en kommunal utredning från Burlövs kommun. Jordens odränerade skjuvhållfasthet samt förkonsolideringstryck utvärderades dock empiriskt, eftersom erforderliga utredningar och information för dessa parametrar saknades. Ytterligare utredningar hade därför varit önskvärt för att underbygga och förbättra trovärdigheten hos våra resultat. En vidare utredning av exempelvis jordens egenskaper skulle sannolikt bidragit till en mer omfattande och pålitlig analys av referensprojektet.

De empiriskt beräknade egenskaperna grundar sig i en CPT-sondering, utförd i sju punkter. Utifrån dessa punkter studerades det uppmätta spetstrycket och en sammanvägning gjordes, med störst vikt på de provpunkter som befinner sig nära det

beaktade området. Framtagna värden diskuterades därefter med tidigare nämnda erfarna geotekniker, som har erfarenhet av projekt i sydvästra Skåne, för att verifiera och utvärdera deras rimlighet. De värden som erhöles bedömdes därefter lämpliga att applicera på beräkningarna, för ett projekt i aktuellt område. För att erhålla säkrare värden för jordens odränerade skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck hade fler typer av utredningar varit nödvändiga.

Med ansatta egenskaper som grund är det av intresse att utreda varför beräkningarna enligt dansk standard ger en kapacitet som är 90% högre än när beräkningarna utförs enligt svensk standard. En anledning till denna skillnad är de respektive standardernas applicering av partialkoefficienter och korrelationsfaktorer, vilka skiljer sig åt. Detta berörs dock inte vidare i aktuellt arbete eftersom det tidigare har genomförts ett examensarbete av Jesper Jeansson där detta utretts som huvudämne. Ytterligare en anledning till att bärigheten troligtvis underskattas, vid beräkning enligt svensk standard, är hur faktorn α ansätts. Enligt aktuell standards uppbyggnad beräknas α ofta till ett värde kring 0,4 i lermoräner, likt i aktuellt arbete. Detta värde beror främst på den ingående faktorn κ_{OCR} , som ansätts till 0,4 om jorden är kraftigt överkonsoliderad, vilket den enligt standarden bedöms vara vid ett värde som överstiger 2,5. α -faktorn har under arbetets gång diskuterats med flera geotekniker och geokonstruktörer, och det finns en gemensam uppfattning om att denna faktor bör vara högre för att motsvara de verkliga förhållanden i lermoräner. Ur samtalen framgick även att interna undersökningar har genomförts, dock ej publicerats, där resultatet indikerar att faktorn α bör vara närmre 1,0 i denna typ av jord. Skulle värdet på α visa sig vara högre än anvisat i svensk standard medförs således en underskattning av den analytiska bärförågan. Dessa diskussioner bör dock betraktas som informella och därmed endast ses som ett intressant tillägg till aktuell rapport. Trots dess informalitet beaktas dessa diskussioner i rapportens resonemang, eftersom de bedöms väcka vidare frågeställningar som kan utredas i framtiden.

Det bör noteras att det finns olika metoder för att utreda pålars bärförmåga. I den svenska standarden finns flertalet olika metoder, vilka hade kunnat leda till att resultaten skiljer sig åt. För att göra en mer uttömmande analys hade dimensionering enligt flera metoder kunnat undersökas. I aktuellt arbete genomfördes dimensionering utifrån α - och β -metoden, eftersom dessa metoder uppfattats vara de som i regel används vid analytisk dimensionering. Ytterligare är det dessa metoder som förespråkas av IEG, vilket är ett tillämpningsdokument av Eurokod, varvid de bedömdes vara av stort intresse att tillämpa.

Utöver skillnaderna mellan de analytiska beräkningsmetoderna påvisade resultatet även, som ovan nämnt, stor skillnad mellan de analytiska beräkningarna och CAPWAP. En faktor som kan förklara varför resultaten från CAPWAP-analysen visar en markant högre bärförmåga än den beräknade bärförmågan är att 3D-effekter som verkar i jorden inte beaktas vid analytisk beräkning av bärförmågan. Detta beror på att ansatt modell är en förenkling av de förhållanden som råder i marken. I verkligheten är förhållandena inte homogena och ansatta egenskaper varierar till viss del även lokalt. Detta resulterar i att jordens komplexa uppbyggnad bidrar och påverkar bärförmågan, vilket inte beaktas av de analytiska beräkningarna.

Ytterligare en anledning till att den uppmätta bärförmågan enligt CAPWAP-analysen avsevärt överstiger den som beräknats vid analytisk dimensionering är tillämpningen av korrelationsfaktorer. Eftersom endast en utredning genomförts, en CPT analys, ansattes korrelationsfaktorerna för svensk respektive dansk standard till 1,4 respektive 1,5. Vid den dynamiska stötvågmätningen har 5 pålar provats, vilket medförde att korrelationsfaktorn för den dimensionerande bärförmågan var 1,35. Till följd av detta ökar skillnaden mellan resultaten ytterligare. En ökning av antalet genomförda utredningar hade resulterat i lägre värden på korrelationsfaktorerna som applicerades vid analytisk dimensionering, eftersom fler utredningar bedöms öka validiteten. Detta hade medfört att den beräknade bärförmågan hade ökat, vilket samtidigt hade resulterat i en minskning av skillnad mellan den uppmätta och den beräknade bärförmågan.

Utöver pålarnas totala bärförmåga undersöktes även hur fördelningen av pålarnas mantel- respektive spetsbärförmåga beaktades vid tillämpning av svensk respektive dansk standard. Fördelningarna från de analytiska dimensioneringsmetoderna jämfördes därefter med den fördelning som uppskattats vid CAPWAP-analysen, för att få en grov indikation på hur den beräknade fördelningen förhåller sig till verkligheten.

Vid analytisk dimensionering finns en tydlig skillnad i hur länderna beaktar bärighetskapaciteten från pålens mantel respektive spets. I dansk standard beaktas bidrag från såväl spets som mantel vid pålning i kohesionsjordar. Vid tillämpning av svensk standard beaktas däremot inte spetsbidraget vid beräkning av bärförmågan. Troligtvis bortser den svenska standarden från spetsbidraget för att standarden ska vara applicerbar i hela landet. Således ska standarden även vara lämplig i förhållanden med lös lera, med låg bärförmåga, där långa pålar krävs, förhållanden som resulterar i att spetsens bidrag till bärlast bedöms försumbar. Det går dock att ifrågasätta om detta förfarande är lämpligt eftersom resultatet av den danska beräkningen indikerar att spetsen har en betydande inverkan vid pålning i lermorän, som återfinns i stora delar av sydvästra Skåne.

Utifrån CAPWAP-analysen, presenterad i PDA-rapporten, antyds att spetsen har en tydlig inverkan på pålens bärförmåga. Det är emellertid av vikt att poängtera att CAPWAP-analysen endast genererar en grov uppskattning av fördelningen, och därför inte bör betraktas som en absolut sanning. Detta beror till stor del på att CAPWAP-analysen baseras på en optimering av kurvor, för att matcha den ansatta kurvan med den uppmätta. Optimeringen kan resultera i flertalet lösningar inom godkända ramar för avvikelsefaktorn, *CAPWAP-match quality*, som kan variera i stor grad. Därav går det inte med säkerhet att fastställa hur stor inverkan som spetsen verkligen har på pålens bärförmåga. Uppskattning som framtagits bör endast betraktas som en indikation på att det finns en inverkan från spetsen i bärförmågan. Att beakta denna inverkan i svensk standard, och således närma oss den danska standarden, hade medfört en mindre konservativ dimensionering av grundläggningen. Detta är därför något som bedöms vara av intresse att analysera vidare.

6.2 Jämförelseanalys

En effekt som orsakas av skillnaden i dimensionering mellan Danmark och Sverige är den erforderliga mängden pålar för referensprojektet. Vid tillämpning av den danska dimensioneringen krävs 217 pålar, vilket motsvarar ungefär hälften av den erforderliga mängden vid svensk dimensionering, som genererar cirka 407 stycken pålar. Med utgångspunkt i den kostnadsuppskattning som tillämpades i arbetet, framtagen av de kostnadsförslag som lämnades av tre branschleverantörer, framgår att det följer en motsvarande ekonomisk skillnad länderna emellan. Vid tillämpning av svensk beräkningsstandard utgår en grundläggningkostnad för referensprojektet på 3 miljoner SEK, en kostnad som istället utgår till 1,6 miljoner SEK vid tillämpning av dansk beräkningsstandard. En optimering med strax under 50% av grundläggningkostnaden kan vara fördelaktigt, såväl ur ett ekonomiskt perspektiv som ur ett hållbarhetsperspektiv. Genom besparingen möjliggörs att klimatanpassade materialval kan göras, något som tenderar att prioriteras ner eftersom det medför merkostnader.

Återigen vill vi poängtera att det resultat av erforderlig mängd pålar som tillämpades i jämförelsestudien är av onormal storleksgrad, och istället belysa att det är relationen mellan respektive lands standard som är av intresse.

Därtill bör det noteras att antalet pålar påverkar hur konstruktionen ovan utformas. Färre pålar medför rimligtvis att det krävs massivare väggar och bottenplatta, för att konstruktionen ska bli tillräckligt styv, vilket i sin tur medför att kostnaderna för projektet enligt den danska standarden ökar något då mer betong går åt. Detta bedöms dock inte medföra några större förändringar då de ökade kostnaderna för materialet

markant understiger kostnad samt installation av pålar. Detta är ingenting som berörs vidare i rapporten, men bör tas hänsyn till vid beaktande av aktuellt resultat.

Kostnadsuppskattningen som tillämpades i arbetet användes för att generera ett verklighetstroget kostnadsunderlag för tolkning av resultatet. Uppskattningen är en sammanställning av tre leverantörers kostnadsförslag, och bör beaktas som en kostnadsuppskattning och inte som en absolut sanning i branschen. Kostnadsposterna som tillämpades i aktuellt arbete var fördelade på materialkostnad, installationskostnad och etableringskostnad, där transport av material och personalkostnad inkluderades. För att åstadkomma ett mer samlat och likvärdigt resultat från leverantörerna hade den utskickade förfrågan kunnat förtydligas ytterligare, såsom att specificera antal ingående yrkesarbetare. Efter utskick noterades även att det inte förtydligades hur många pålar som skulle stötvågsmätas. Dock bifogade alla leverantörer en mätningkostnad som motsvarar de minimikrav på mätning som existerar, varvid resultatet på denna post blev likvärdigt. Varaktigheten på projektet samt val av maskin till slagning lämnades medvetet ospecificerat, för att återspegla de förfrågade leverantörernas olika kompetens och erfarenhet.

Ytterligare en aspekt som påverkas av dimensioneringsskillnaden är referensprojektets miljöeffekter, vilket i aktuellt arbete avgränsades till ingående mängder av CO₂-ekvivalenter. I nuläget ingår inte hela grundläggningen i den klimatdeklaration som ska upprättas för byggnationsprojekt, vilket är något som inom en nära framtid förväntas förändras. I och med Boverkets kommande författningsförslag, som berör gränsvärden för CO₂-ekvivalenter på alla byggdelar samt förslag på mer inkluderande klimatdeklaration, ställs allt högre krav på en omställning i branschen.

Mot denna bakgrund har det genomförts en klimatberäkning i detta arbete, där en total mängd CO₂-ekvivalenter togs fram för pålgrundläggningen. Resultatet uppgick till 179 samt 95 ton CO₂-ekvivalenter, för svensk respektive dansk dimensionering. En tillämpning av dansk standard, istället för svensk standard, medför således en besparing på 16% av mängden CO₂-ekvivalenter på projektets totala omfattning. Till grund för detta resultat ligger antagandet från IVA, Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien, om att grundläggningen medför en utökning av koldioxidutsläppen på 50% jämfört med den del av byggnaden som idag klimatdeklarerar. För att ytterligare stärka resultatets trovärdighet hade det varit av intresse att undersöka hur grundläggningens beräknade koldioxidutsläpp förhåller sig till referensprojektets upprättade klimatdeklaration. Denna eftersöktes för aktuellt syfte, men var inte publicerad offentligt vid undersökningstillfället.

Som ovan nämnt bör en grundläggning med färre pålar medföra att en massivare bottenplatta samt väggar krävs. Till följd av detta ökar koldioxidutsläppen något vid tillämpning av dansk standard, i förhållande till de beräknade, eftersom mer betong går åt till väggar och bottenplatta. Detta arbete avgränsades dock till att endast beakta hur grundläggningen påverkas vid tillämpning av svensk respektive dansk standard, varvid den ökade mängden betong bortsågs från.

Klimatberäkningen utfördes med syftet att undersöka standardernas effekt på grundläggningen samt projektets totala klimatavtryck, för att belysa möjlig förbättringspotential. År 2025 förväntas gränsvärden för CO₂-ekvivalenter implementeras. Därefter krävs att en byggnads totala mängd CO₂-ekvivalenter reduceras med 25% fram till år 2030. För att branschen ska kunna uppnå dessa målsättningar krävs ett brett urval av åtgärder, inklusive implementering av CO₂-snåla materialval. Dock är en av de mest kritiska aspekterna för att såväl nationella och internationella mål ska uppnås att branschen tillämpar en så optimerad dimensionering som möjligt. Det är genom en effektiv dimensionering som resurseffektiviteten kan maximeras och klimatavtrycket i projekten minimeras.

Som underlag till genomförd klimatberäkningen låg rapporten *Klimatdata för geokonstruktioner*. Rapporten upprättades av organisationen SBE, Smart Built Environment, med syftet att göra klimatdata för geokonstruktioner lättåtkomlig, samlad och tydlig för aktörer i branschen inför kommande moment när hela grundläggningen ska inkluderas i klimatdeklarationen. Rapporten bedömdes intressant och lämplig att basera klimatberäkning på eftersom den berör aktuell information och är framarbetad av en organisation som utgörs av ett stort urval individer i branschen. Klimatdatan i rapporten är en ny sammanställning av existerande materialdata i branschen och från miljövarudeklarationer upprättade i europeiska länder. Rapporten är en av få existerande samlingar med detta fokus specificerat till geokonstruktioner, och tillämpades därför för att uppnå ett så verklighetstroget resultat som möjligt i detta arbetet.

6.3 Vidare arbete

Under tiden detta arbete har genomförts, samt även i efterhand, har en del frågor väckts som kan vara av intresse att vidare utreda framöver. Baserat på samtal med erfarna geotekniker i branschen verkar det finnas en samlad uppfattning om att α -faktorn underskattas vid framtagning enligt standarden. Likt nämnt tidigare har det genomförts en del interna undersökningar kring detta, men än har inga officiella utredningar om faktorns lämplighet och relevans publicerats, varav det bedöms vara intressant att utreda vidare.

I aktuellt arbete har fokus legat på att utvärdera resultatet av de båda ländernas analytiskt beräknade bärighet, med utgångspunkt från standarderna. En aspekt som hade varit intressant att undersöka vidare är branschens faktiska inställning till metoderna förespråkade i Eurokod. Vid samtal med individer i branschen har viss skepticism om standarden kring pålgrundläggning noterats, och därav kan det vara lämpligt att vidare utreda om standarden upplevs som aktuell och relevant av aktörer i branschen, samt om det är de metoder som faktiskt tillämpas.

Detta arbete indikerar att tydliga skillnader följer en dimensionering av en pålgrundläggning i lermorän vid dimensionering i brottgränstillståndet. För att studera standardernas påverkan ur ett helhetsperspektiv hade det varit intressant att även studera effekterna vid bruksgränstillstånd. Detta för att vidare undersöka om, och i sådant fall vilka, möjligheter som finns att revidera den aktuella svenska standarden.

7 Slutsats

Efter genomfört arbete har ett antal intressanta slutsatser dragits. Inledningsvis studerades pålarnas totala bärförmåga i lermorän, varvid det noterades att vid tillämpning av svensk respektive dansk standard är den svenska standarden mer konservativ än den danska, vilket resulterade i en 90% lägre beräknad bärförmåga vid tillämpning av svensk standard. Som komplement till standarderna studerades även genomförd dynamisk stötvågmätning med CAPWAP, vilken indikerade att den dimensionerande bärförmågan för pålarna är sju gånger respektive fyra gånger högre än den som beräknats enligt svensk respektive dansk standard. Mot denna bakgrund drogs därför slutsatsen att en vidare utredning, för att bedöma aktuell standards lämplighet, bör genomföras.

Vid dimensionering enligt svensk standard bortses det från spetsens bidrag till pålens bärförmåga, vilken beaktas vid dimensionering enligt dansk standard. Genom analys av graferna från CAPWAP-analysen noterades att spetsen verkar ha en betydande inverkan till bärförmågan vid grundläggning i en lermorän. Följdaktligen kan det argumenteras för att hänsyn till sådan spetsbärförmåga bör beaktas även i svensk standard, detta för att efterlikna verkliga förhållanden. Det ska dock åter igen noteras att graferna från CAPWAP-analysen endast ger en grov uppskattning av fördelningen, varvid vidare utredning krävs.

Utifrån detta arbete observerades en signifikant minskning av kostnaden vid applicering av dansk standard, istället för svensk. I aktuellt projekt uppskattades kostnaderna för grundläggningen minska med nästan 50%, vilket motsvarar 1,4 miljoner SEK.

Till slutsatsen ingår även resultatet av den genomförda klimatberäkningen för de respektive ländernas dimensioneringsmetoder. Tillämpning av dansk standard, istället för svensk, uppskattades medföra en minskning av koldioxidutsläppen för grundläggningen med 50%, vilket motsvarar 84 ton CO₂-ekvivalenter. För konstruktionen som helhet uppskattades detta motsvara en minskning av koldioxidutsläppen på 16% för undersökt referensprojekt.

Referenser

Alheid, P., Axelsson, G., Berggren, B., Berglars, B., Hermansson, I. & Sarvell, F. (2014). *Verifiering av geoteknisk bärförmåga för pålar enligt Eurokod*. Pålkommisionen, Rapport 106. <http://www.palkommissionen.org/web/page.aspx?refid=217>

Boverket (2021). *Miljöindikatorer, 1993-2021*. [Excelark]
<https://www.boverket.se/sv/om-boverket/publicerat-av-boverket/oppna-data/miljoindikatorer/> [Åtkomst 2024-03-12]

Boverket (2022). *Boverkets föreskrifter och allmänna råd (2011:10) om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (Eurokoder)*. Boverket, EKS12 BFS2022:4. <https://www.boverket.se/sv/lag--ratt/forfattningssamling/gallande/eks---bfs-201110/>

Boverket (2023a). *Bygghuset som ingår*.
<https://www.boverket.se/sv/klimatdeklaration/gor-sa-har/bygghuset-som-ingar/> [Åtkomst 2024-03-12]

Boverket (2023b). *Gränsvärde för byggnaders klimatpåverkan och en utökad klimatdeklaration*. Boverket, Rapport 2023:20.
<https://www.boverket.se/sv/om-boverket/publicerat-av-boverket/publikationer/2023/gransvarde-klimatpaverkan/>

Dahlblom, O. (2020). *Kompendium i geoteknik*. Institutionen för byggvetenskaper, LTH, Lunds universitet

Dahlblom, O. & Tudisco, E. (2019). *Foundation engineering*. Institutionen för byggvetenskaper, LTH, Lunds universitet

DS/EN 1997-1 DK NA:2021. *National Annex to Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules*. Danish housing and planning authority, Dansk Standard (DS).

Eriksson, P., Jendeby, L., Olsson, T. & Svensson, T. (2004). *Kohesionspålar*. Pålkommisionen, Rapport 100.
<http://www.palkommissionen.org/web/page.aspx?refid=29>

Flaate, K. & Selnes P. (1977). Side friction of piles in clay. *Proceedings of the 9th International conference on soil mechanics och foundation engineering*. Tokyo, Japan 10-15 juli 1977, s. 517-522. <https://www.issmge.org/publications/publication/>

side-friction-of-piles-in-clay

Gullberg, M. (2021). *Nybyggnad blandstadskvarter: Material och anvisningar, del 1- 3*. Ritningsnr: K-01-0-0001, K-01-0-0002, K-01-0-0003. [Granskningshandling]. Danewids Ingenjörbyrå AB

Holm, G. & Olsson, C. (1993). *Pålgrundläggning*. Kap. 5 & 9. AB Svensk Byggtjänst & Statens Geotekniska Institut. ISBN: 91-7332-663-1

Implementeringskommission för Europastandarder inom Geoteknik (IEG) (2008). *Tillämpningsdokument EN1997-1 Kapitel 7, Pålgrundläggning*. Implementeringskommission för Europastandarder inom Geoteknik. IEG Rapport8:2008, rev 2

Isaksson, T., Mårtensson, A. & Thelandersson, S. (2010). *Byggkonstruktion*. 2 uppl., Studentlitteratur.

Isaksson, T. & Mårtensson, A. (2019). *Byggkonstruktion - Regel och formelsamling*. Utg 4., Studentlitteratur.

Jeansson, J. (2023). *Beräkning av bärförmåga hos pålar i moränlera - Svensk och dansk beräkningsmetodik*. Masteruppsats, Institutionen för Byggvetenskaper. Lunds universitet. <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/9132894>

Knudsen, J., Sørensen, K.K., Steenfelt, J.S. & H. Trankjær. (2019). Design of bored poles in Denmark - a historical perspective. *Proceedings of the XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE-2019*. Island, Reykjavik 1-6 september 2019. <https://www.issmge.org/publications/publication/design-of-bored-piles-in-denmark-a-historical-perspective>

Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA) (2014). *Klimatpåverkan från byggprocessen - En rapport från IVA och Sveriges Byggindustrier*. Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien. ISBN: 978-91-7082-883-6

Larsson, R. (2000). *Lermorän - en litteraturstudie*. Statens geotekniska institut, Varia 480. ISSN: 1100-6692

Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper*. Statens geotekniska institut, Information 1. ISSN: 0281-7578

Larsson, R. (2015). *CPT-sondering*. Statens geotekniska institut, Information 15. ISSN: 0281-7578

Larsson, R., Alén, C., Bengtsson, P-E., Bergdahl, U., Eriksson, L. & Sällfors, G. (2007).

Skjuvhållfasthet - utvärdering i kohesionsjord. Statens geotekniska institut, Information 3. ISSN: 0281-7578

Lind, M., Rönnborg, J. & Christiansson, A. (2019). *Plan för Burlövs vatten - planeringsperiod 2018-2027*. Kommunstyrelsens planutskott, Burlöv kommun. <https://burlov.se/download/18.dc3e56b16fa0137b8e12217/1578995299590/Plan%20f%C3%B6r%20Burl%C3%B6vs%20vatten%202018-2027.pdf>

Luke, K. (1996). Cone factors from Field Vane and Triaxial Tests in Danish Soils. *Proceedings of the XII Nordic Geotechnical Conference, NGM-96*. Island, Reykjavik 26-28 juni 1996, s. 203-208. Icelandic Geotechnical Society. <https://vbn.aau.dk/en/publications/cone-factors-from-field-vane-and-triaxial-tests-in-danish-soils>

Peab Grundläggning AB. (u. å.). *Pålprotokoll - Kv Hanna, Arlöv*. Peab Grundläggning AB. [Intern handling]

Prop. 2016/17:16. *Godkännande av klimatavtalet från Paris*.

Schultz, R. (2022). *PDA-MÄTNINGSRAPPORT: Kv Hanna, Burlöv*. Pålanalys i Göteborg AB. [Intern handling]

Smart Built Environment (SBE) (2023). *Klimatdata för geokonstruktioner*. Smart Built Environment, Rapport U8 2020:16. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1756945&dswid=4671>

SS-EN 1990. *Eurokod - Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk*. Svenska Institutet för Standarder (SIS).

SS-EN 1991-1-1:2002. *Eurokod 1: Laster på bärverk - Del 1-1: Allmänna laster - Tunghet, egen- tyngd, nyttig last för byggnader*. Svenska Institutet för Standarder (SIS).

SS-EN 1991-1-3:2003. *Eurokod 1: Laster på bärverk - Del 1-3: Allmänna laster - Snölast*. Svenska Institutet för Standarder (SIS).

SS-EN 1991-1-4:2005. *Eurokod 1: Laster på bärverk - Del 1-4: Allmänna laster - Vindlast*. Svenska Institutet för Standarder (SIS).

SS-EN 1991-1-7:2006. *Eurokod 1 - Laster på bärverk - Del 1-7: Allmänna laster - Olyckslast*. Svenska Institutet för Standarder (SIS).

SS-EN 1997-1:2005. *Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner - Del 1: Allmänna regler. Eurokod*. Svenska Institutet för Standarder (SIS).

Svensson, R. (2021). *Kv Hanna i Arlöv, Geoteknisk undersökning, Markteknisk undersökningsrapport (MUR), Projekteringsavvisningar*. GeoExperten i Skåne AB. [Internt material]

Tyskland & Europeiska kommissionen. (2020). *The update of the nationally determined contribution of the European Union and its Member States*. Europeiska unionen. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwik4ovDqtWFAxWpFBAIHcPGD2IQFnoECCoQAQ&url=https%3A%2F%2Functfccc.int%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2FNDC%2F2022-06%2FEU_NDC_Submission_December%25202020.pdf&usg=A0vVaw0Ec3Q3s5BwZ3gteJ3xoyoa&opi=89978449

Wallin, H.P., Bodén, H., Carlsson, U., Glav, R. & Åbom, M. (2014). *Sound and Vibration*. Institutionen för farkostteknik, Kungliga tekniska högskolan.