



CHALMERS



Grundläggning med materialet trä för stadslinbanan i Göteborg

ACEX10-20-82

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik

Ida Alexandersson

Frida Andersson

Niklas Björn

Nikolina Bolvede

Alexander Wallenbring

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Gothenburg, Sweden 2020

www.chalmers.se

KANDIDATARBETE ACEX10-20-82

Grundläggning med materialet trä för stadslinbanan i Göteborg

Ida Alexandersson

Frida Andersson

Niklas Björn

Nikolina Bolvede

Alexander Wallenbring



CHALMERS

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2020

Foundation with timber as material for the city cable car in Gothenburg

IDA ALEXANDERSSON
FRIDA ANDERSSON
NIKLAS BJÖRN
NIKOLINA BOLVEDE
ALEXANDER WALLENBRING

©IDA ALEXANDERSSON, FRIDA ANDERSSON, NIKLAS BJÖRN, NIKOLINA
BOLVEDE, ALEXANDER WALLENBRING 2020

Handledare: Jonatan Isaksson, Chalmers
Examimnator: Jelke Dijkstra, Chalmers

Kandidatarbete ACEX10-20-82
Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
Chalmers tekniska högskola
SE-41296 Göteborg
Sverige
Telefon 031-772 1000

Omslag:
Visionsbild av stadslinbanan i Göteborg
Image - www.tmrw.se

Abstract

There has been an ongoing work for several years to develop a cable car facility in Gothenburg. The cable car system would connect the two sides of Göta älv and enable a new form of public transport for the city's residents. The project has however been canceled because it was believed to be too expensive to complete. Despite this, there are many technical difficulties with this type of construction that is interesting to investigate. There are especially major challenges when it comes to the foundations near Göta älv, where parts of the cable car construction would have stood, due to a very thick layer of clay.

In this bachelor thesis, the geotechnical conditions for the two towers near Göta älv are investigated. The bachelor thesis aims to explore possible sustainable types of foundation for the two towers, both from an ecological as well as a technical perspective. To further focus on sustainability, this bachelor thesis concentrates on timber as a material and explores the possibility to use timber as the main material in a foundation for a construction of this size. An idea to use glulam in production of piles is also explored. Glulam has a higher bearing capacity compared to traditional timber piles. During the bachelor thesis a comparison of material consumption and carbon dioxide emissions for timber, glulam and concrete was conducted. The manufacturing of concrete contributes to more carbon dioxide emissions than manufacturing of timber, which makes the material timber an interesting option to investigate for the foundation.

The results of the study showed that, based on compressive strength and the geotechnical bearing capacity, it would have been possible to use traditional timber piles for foundation of the two towers near Göta älv. This is calculated on the basis of the design load values of the construction, the material's design carrying capacity and that a 30 x 40 meter base slab is used. The result showed that 502 pieces of 22-meter-long timber piles would be required. If glulam were to be used, the result showed that the foundation would require 254 pieces of 27-meter-long piles. Calculations also show that less carbon dioxide is emitted if traditional timber piles or glulam piles were used for the foundations instead of concrete piles. This result is partly because timber binds carbon dioxide during its growth. Foundations with traditional timber piles contribute to less environmental impact, in terms of carbon dioxide emissions, compared to glulam piles.

Key words: Timber piles, glulam, deep clay, foundation, carbon dioxide emission, cable car

Sammanfattning

Det har under många år pågått ett arbete i Göteborg för att ta fram en stadslinbana. Linbanan skulle förbinda två sidor av Göta älv och möjliggöra ett nytt transportsätt för stadens invånare. Arbetet med linbanan har nu avslutats då genomförandet skulle bli för dyrt för staden. Trots detta beslut finns det många tekniska svårigheter vid denna typ av byggnation som är intressanta att undersöka. Framförallt råder det stora utmaningar gällande grundläggning nära Göta älv där byggnationen skulle stått på ett lerlager med mycket stor mäktighet.

I detta kandidatarbetet har de geotekniska förutsättningarna för de två planerade tornen närmast Göta älv undersökts. Kandidatarbetet syftade till att ta fram en grundläggningsmetod för dessa torn, både ur ett ekologiskt och tekniskt perspektiv. För att utmana frågan kring hållbarhet valdes tidigt i processen att koncentrera arbetet kring materialet trä och undersöka möjligheten att grundlägga konstruktionen med träpålar. En metod där limträ används som material för tillverkning av pålar har även undersökts. Detta har gjorts eftersom limträ har en högre tryckhållfasthet jämfört med traditionella träpålar. Under arbetets gång jämfördes materialåtgången och koldioxidutsläpp för trä, limträ och betong. Tillverkningen av betong bidrar till mer koldioxidutsläpp än trä, vilket gör materialet trä intressant att undersöka.

Resultatet av undersökningen visade att det, utifrån tryckhållfasthet och den geotekniska bärformågan, hade varit möjligt att använda traditionella träpålar som grundläggningsmetod för de två tornen vid Göta älv. Detta beräknat utifrån de dimensionerande lastvärdena för konstruktionen, materialets dimensionerande bärformåga samt att en 30 x 40 meter stor bottenplatta används. Det skulle då krävas 502 stycken 22 meter långa träpålar. Används limträ skulle konstruktionen kunna grundläggas med 254 stycken, 27 meter långa limträpålar. Beräkningar visar också att mindre koldioxid släpps ut om grundläggning görs med traditionella träpålar eller limträpålar än om stadslinbanan grundläggs med betongpålar. Detta resultat beror delvis på att trä binder koldioxid under tillväxttiden. Grundläggning med traditionella träpålar bidrar till mindre miljöpåverkan, sett till koldioxidutsläpp, jämfört med limträpålar.

Nyckelord: träpålar, limträ, djup lera, grundläggning, koldioxidutsläpp, linbana

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	2
1.2	Problemformulering	2
1.3	Avgränsningar	2
1.4	Metod	2
2	Träpålar som grundläggningsmetod	4
2.1	Pålmetod	4
2.2	Historiskt användande	5
2.3	Skarvning	6
2.4	Limträ	8
2.5	Miljöpåverkan	8
2.6	Transport av pålar	9
3	Tekniska förutsättningar för projektet	10
3.1	Regional geologi	10
3.2	Lokal geologi	10
3.3	Hydrogeologiska förhållanden	11
3.4	Förutsättningar för grundläggning	12
4	Utvärdering av träpålar	14
4.1	Beräkning av pålkapacitet	14
4.2	Kontroll blockbrott	20
4.3	Materialåtgång	21
4.4	Analys av beräkningar	22
4.5	Hållbarhetsanalys	23
5	Diskussion	25
5.1	Metoddiskussion	25
5.2	Fortsatta studier	25
6	Slutsats	27
	Referenser	28
A	Bilagor	I
A.1	Borrhål Götatunneln	I
A.2	Intervjufrågor	II
A.3	Beräkningar	III

1 Inledning

Likt många andra städer växer Göteborg i snabb takt och på grund av detta vill Göteborgs Stad utveckla fler alternativ för hållbart resande. Förtätning av staden innebär att allt fler personer kommer behöva förflytta sig, inte minst runt Göta älv där stora satsningar på både nya arbetsplatser och boenden pågår (Tyréns, 2013). Med detta som bakgrund undersöks det nu hur transportmöjligheterna över älven kan utvecklas och ett förslag om en stadslinbana har tagits fram. Linbanan skulle bli ett komplement till den befintliga kollektivtrafiken och ytterligare ett sätt att binda samman de två sidorna av älven (Tyréns, 2013). Denna typ av transportmedel skulle inte behöva trafikera dyr markyta, utan skulle på ett säkert sätt kunna transportera invånarna i luften utan att hindra förtätning av staden.

Linbanor har länge använts som transportmedel men förekommer främst i mycket kuperad miljö där syftet med linbanan är att transportera till en högre höjd och associeras därför ofta med bergområden. Kännetecknet för en linbana är att den består av tre komponenter: gondoler, torn och vajer (Tyréns, 2013). På grund av förtätning i många städer har linbanor blivit ett sätt att utveckla kollektivtrafiken som inte konkurrerar med övriga transportmedel (Ny Teknik, 2015).

Trots fördelarna med en linbana finns det flera anledningar som gör genomförandet problematiskt. På grund av att Göta älv används som transportsträcka för fartyg behövs en hög frihöjd (Tyréns, 2013) vilket kräver att linbanan har höga torn. Dessa torn i kombination med den djupa leran i Göteborg gör grundläggningen problematisk. Samtidigt som Göteborg förtätas ställs det också större krav på minskade koldioxidutsläpp vid byggnation och efterfrågan på miljövänliga grundläggningsmetoder ökar.

Göteborg är byggt på mäktiga lager lera (Roupé, 2017). En grundläggningsmetod som passar i lera är träpålar (Björdal, 2015). Flera studier visar att trä är ett mer miljövänligt alternativ än betong (Tehrani och Froese, 2017) vilket gör materialet trä intressant för detta projekt. I en livscykelanalys som gjorts för att jämföra trä och betong som byggnadsmaterial undersöktes ett betonghus och ett liknande trähus. I denna studie konstaterades det att trä är ett mer miljövänligt byggnadsmaterial i åtta av de nio undersökta kategorier (Tehrani och Froese, 2017).

Bygg- och fastighetssektorn stod 2017 enligt Boverket för 19% av Sveriges totala utsläpp av växthusgaser (Boverket, 2020). För byggprocessen har det visat sig att byggnadsmaterial står för hela 84% av klimatpåverkan, där vanligt förekommande grundläggningsmaterialet betong står för en stor andel (Liljenström et al., 2015). Att utveckla nya metoder för att använda mer hållbara byggnadsmaterial och grundläggningslösningar är därför aktuellt. På grund av detta kommer byggnadsmaterialet trä undersökas närmare som en möjlig grundläggningsmetod.

1.1 Syfte

Syftet med kandidatarbetet är att undersöka trä som material till grundläggning för det planerade projektet stadslinbanan i Göteborg. Arbetet syftar till att utreda om trä är ett tekniskt möjligt och ekologiskt hållbart alternativ som grundläggningsmaterial till linbanan.

1.2 Problemformulering

Kandidatarbetet kommer baseras på följande frågeställningar:

- Är materialet trä ett möjligt grundläggningsmaterial till stadslinbanan i Göteborg för de två tornen vid Göta älv?
- Är materialet trä ett mer ekologiskt hållbart grundläggningsmaterial än det mer vanligt förekommande grundläggningsmaterialet betong?

1.3 Avgränsningar

Kandidatarbetet avgränsas till att undersöka grundläggningsmetoder för de två tornen som planerades att stå på varsin sida av Göta älv för projektet stadslinbanan i Göteborg. Vidare kommer endast materialet trä som grundläggningsmetod att undersökas. Denna avgränsning har gjorts då kandidatarbetet syftar till att beakta hållbara aspekter och det vanligaste pålmaterialet betong anses ha större miljöpåverkan än trä. Eftersom rapporten undersöker de geotekniska förutsättningarna för grundläggning kommer inte linbanans nytta för kollektivtrafik, förändring av transportmönster i Göteborg eller driftkostnader av transportmedlet att behandlas. Konstruktionsberäkningar för tornen kommer inte att genomföras då rapporten endast beaktar konstruktionens grundläggning.

Vidare kommer enbart beräkning av bärförmåga, blockbrott och materialåtgång att genomföras för de olika grundläggningsförslagen. Det finns andra potentiellt dimensionerande beräkningar för knäckning, draghållfasthet, sättningar och påhängslaster som kommer diskuteras men inte beaktas vid beräkning. Vid bedömning av den ekologiska hållbarheten hos pålförslagen kommer enbart koldioxidutsläpp beaktas. Inga andra växthusgaser eller potentiell påverkan på omgivande miljö kommer undersökas.

1.4 Metod

Kandidatarbetets metod utgörs av en litteraturstudie, framtagning av geotekniska förutsättningar, intervjustudie och beräkningar.

Litteraturstudie utfördes genom datasökningar via Google Scholar, Chalmers bibliotek och Scopus för att erhålla bakgrundsinformation till studiens teoridel.

För att få dem geologiska förutsättningarna för studien undersöktes den planerade linbanans geografiska placering och de förhållanden som råder på platsen. För att

tillhandahålla de geologiska förutsättningarna för området kring Göta älv användes data från närliggande undersökningar från Sveriges Geologiska Undersökningar, SGU. Denna data användes sedan för att ta fram en förenklad jordprofil över området.

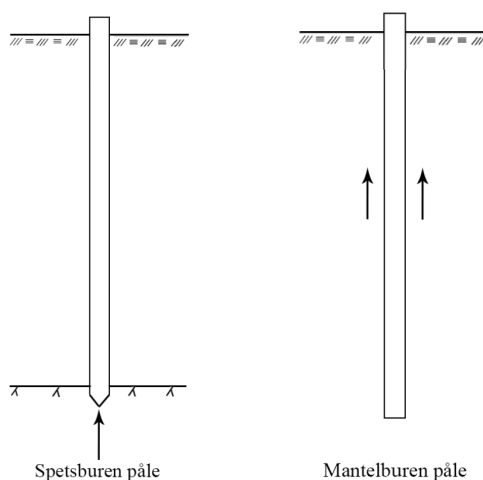
För att få mer förståelse och relevant information har intervjuer med sakkunniga inom geoteknik och om projektet stadslinbanan genomförts. Under projektets gång har två personer intervjuats. Samma frågor ställdes till båda personerna, se bilaga A.2. En digital intervju med Peter Alheid, geokonstrukör på Hercules grundläggning, genomfördes. Frågorna var förbestämda och svaren antecknades ned under intervjuens gång. Alheid har godkänt att svaren används löpande i kandidatarbetet. Som geokonstrukör i Hercules grundläggning har Peter Alheid varit delaktig i förarbetet för den tidigare planerade stadslinbanan. Den andra intervjun genomfördes enbart skriftligt via mejl med Karl-Magnus Bandh, avdelningschef på WSP Terra-sond. Karl-Magnus Bandh bedömdes av sin position på WSP och med sin kunskap om bevaring av träpålar kunna ge en bättre uppfattning av träpålars långsiktiga hållbarhet.

Beräkningar har genomförts för att bedöma träpålarnas bärförmåga i tryck. Utifrån träpålens bärförmåga och den totala lasten från torn och fundament kunde den erforderade längden för en enskild påle beräknas. Beräkningar utfördes både med och utan säkerhetsfaktorer. Data för beräkningar har erhållits från ett opublicerat dokument från Sweco samt från intervjukandidaten från Hercules grundläggning. Motsvarande beräkningar har utförts för pålar av limträ som ett alternativt grundläggningsförslag. Till skillnad från träpålen har limträets bärförmåga beräknats fram utifrån tvärsnitt och limträets tryckhållfasthet. Med samma tvärsnitt som för limträ har även erforderlig mängd betongpålar beräknats. Blockbrottsberäkningar har utförts för att kontrollera att pålarna inte placeras för tätt. I beräkningarna har dimensionerna av bottenplattan hämtats från tidigare nämnda dokument från Sweco. Utifrån beräkningarna har trä, limträ och betong analyserats och jämförts. Analyser har gjorts med avseende på materialåtgång och ekologisk hållbarhet.

2 Träpålar som grundläggningsmetod

En påle är ett långsmalt byggelement som borraras, slås, vibreras eller schaktas ner i jorden. Pålar har till uppgift att förflytta och fördela vertikala och horisontella laster genom svag jord ner till starkare jord eller berg (Pålkommisionen, 2019). Syftet med att grundlägga med pålar är att öka bärförmågan och minska sättningar i jorden (Pålkommisionen, 2019).

Pålar kan delas in i olika kategorier beroende på material, hur de för ner laster, hur de monteras samt om de är massförträngande eller icke-massförtängande. Pålar består vanligtvis av trä, stål eller betong (Pålkommisionen, 2019). Dessa kan i sin tur vara spets- eller mantelburna pålar, se figur 1. Spetsburna pålar slås ner till berg och lasten förs då ner till berget (Olsson och Holm, 1993). I jordar där pålning till berg inte är möjligt, används istället mantelburna pålar. Mantelburna pålar bär ner lasten till ett djup där bärigheten i jorden är högre (Alén, 2012). I leriga jordar kallas dessa kohesionspålar och i sandiga jordar kallas dessa friktionspålar. I projektet för stadslinbanan är kohesionspålar aktuellt för tornen närmst Göta älv på grund av det mäktiga lerlagret under tornen. Eftersom trä är ett hållbart material som kan användas till kohesionspålar kommer detta kapitel att behandla de mer traditionella träpålarna tillsammans med ett förslag om att tillverka pålar av limträ.



Figur 1: Figur över hur en spetsburen ner till berg respektive matelburen påle verkar. Egen figur med inspiration från (Alén, 2012).

2.1 Pålmetod

Träpålar är en av de äldsta grundläggningsmetoderna och kan i rätta förhållanden ha en lång livslängd utan någon typ av förbehandling. Pålarna gör det möjligt att bygga i områden där markförhållandena är sådana att en ytlig grundläggning inte är tillräcklig (Prakash och Sharma, 1990). För att pålarna ska behålla sin bärförmåga krävs det att de hela tiden är under grundvattenytan. Detta eftersom en grundvat- tensänkning gör att träpålarna kommer i kontakt med syre och riskerar att ruttna,

vilket leder till minskad bärförmåga (Björdal, 2015). I Sverige används gran eller furu till träpålar (Olsson och Holm, 1993) och är idag en av marknadens billigaste grundläggningsmetoder (Rajapakse, 2016). Trots detta används dem i begränsad utsträckning (Pålkommisionen, 2019).

I dagsläget används träpålar i huvudsak som kohesionspålar. De används med fördel i mjukare jordar som silt, sand och lera då mer kompakt jord riskerar att skada pålen när den slås ner. Pålen installeras med trätoppen nedåt för att enkelt få ned den till önskat djup (Hercules grundläggning, 2020b) och enligt Peter Alheid för att bärförmågan blir högre. Det är viktigt att trät inte är ruttet eller angripet av insekter, eftersom det kan bidra till sämre bärförmåga (Olsson och Holm, 1993). Ytveden på träpålen verkar som konservering för träet (Prakash och Sharma, 1990).

Träpålen kan förlora sin bärförmåga genom olika typer av nedbrytningsmekanismer som röta vid rustbädden och påltoppen eller bli angripen av bakterier och svampar. För att förhindra att träpålarna ska angripas av bakterier, svampar och så småningom ruttna. En metod har därför utvecklats på senare tid i Sverige som heter Euroborinjektering (Skoog, 2006). I euroborinjekteringen blandas bentonit och bor som injekterar jorden för att rötbädden ska skyddas.

Framförallt används träpålar till tillfälliga konstruktioner (Hercules grundläggning, 2020a) eftersom de är känsliga mot syrerikt vatten. Ska träpålar användas som en permanent lösning måste de slås under grundvattennivån på platser där vattnet ej är syrerikt (Hercules grundläggning, 2020b). Enligt Peter Alheid används träpålar på grund av att de är billigare jämfört med betong och stål. Träpålar slås inte hela vägen ned till berg eftersom detta kan skada träpålens spets. Om det finns risk för att penetrera hårdare lager kan en så kallad pålsko av plåt användas för att skydda pålspetsen (Olsson och Holm, 1993). När träpålar förs ner i mjuka leror kommer det undanträngda materialet flytta sig vilket skapar rörelser i marken (Prakash och Sharma, 1990). Detta går att undvika om hål förborras genom augerborrning. När augerborrning används fastnar materialet i borren och tas med upp ur hålet (Abdeldayem et al., 2019).

Vid djupa lerlager och stora laster kan det krävas långa pålar. Eftersom att gran och tall i Sverige blir som längst 28-30 meter, men normalt bara 13 meter kan skarvningsmetoder behövas (Petersson, 1999). Enligt Peter Alheid är träpålar i byggbranschen idag 18 meter långa, vilket är en av anledningarna till att det är svårt att få fram stora volymer. Vidare beskriver Peter Alheid att en träpåle i gran eller furu i brott last 550 kN i rotänden under maximalt gynnsamma förhållanden. För att en träpåle ska klara denna last krävs att den sitter djupt i leran vilket kan vara svårt att genomföra. I *Piling Engineering Third Edition* anges bärförmågan för en träpåle vara 500 kN (Fleming et al., 2009).

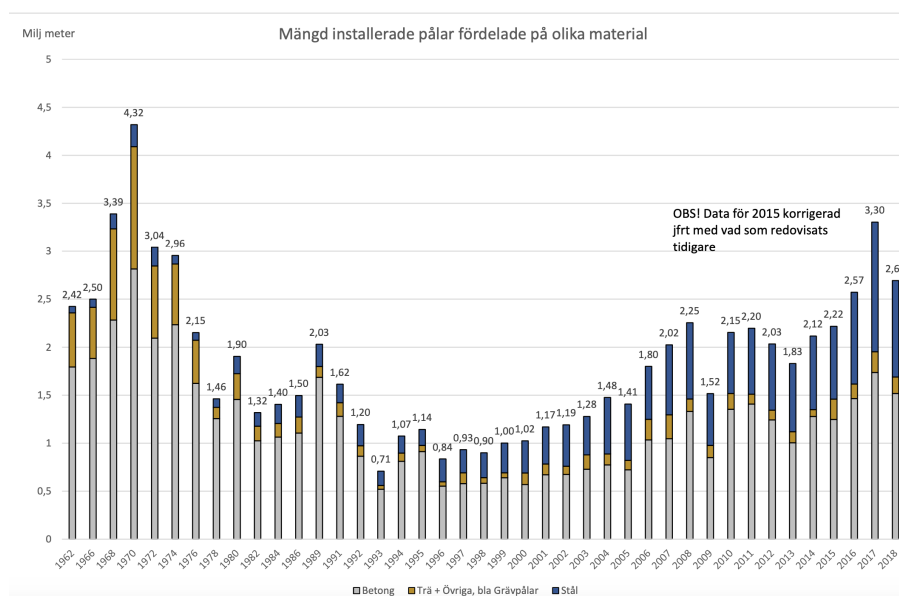
2.2 Historiskt användande

I Göteborg finns det flera stadsdelar som till stor del är grundlagt på träpålar. Träpålar kan vara funktionella i flera hundra år under rätt förutsättningar (Rajapakse, 2016). Stora Teatern i Göteborg är grundlagd på träpålar, till följd av olika typer av

infrastrukturprojekt som sänker grundvattennivån ökar risken för att träpålarna ska börja ruttna (Lamm W, 2017). Hotell Post vid Drottningtorget i Göteborg byggdes i början av 1920-talet och är grundlagt på 6000 träpålar. Även Masthuggskajen och Stigbergskajen byggdes med träpålar som grundförstärkning (Flodin och Broms, 1981).

I vissa fall har träpålar bevarats så bra i jorden att de kunnat återanvändas som ny grundläggning efter 1000 år i marken. Detta praktiserades i ett projekt i Venedig där grundvattennivån varit konstant hög vilket gjort att pålarna hela tiden varit under grundvattenytan (Rajapakse, 2016).

Enligt statistik från Pålkommissionen som visas i figur 2 har användningen av träpålar i nyproduktion minskat sedan år 1962. Det används inte lika mycket träpålar nu som vid 1960-talet när trä och betong var de två dominerade pålmaterialen (Pålkommissionen, 2019). De mest förekommande pålarna i Sverige är idag betongpålar. Träpålar utgör endast 6% av marknaden jämfört med betongpålar som utgör 57% (Pålkommissionen, 2019).



Figur 2: Statistik över pålmaterial vid nyproduktion mellan 1962-2018 (Pålkommissionen, 2019). Återgiven med tillstånd.

2.3 Skarvning

Som tidigare nämnt begränsas en träpåles maximala längd efter hur höga träden är. För att nå större djup med träpålar är skarvning en alternativ teknisk lösning. Skarvning med träpålar kan utföras träpåle mot träpåle samt genom träpåle mot betongpåle, varav den sistnämnde kallas för kombinationspåle (Olsson och Holm, 1993). Kombinationspålar används likt vanliga träpålar som kohesionspålar (Olsson och Holm, 1993). Det är enligt Peter Alheid genom kombinationspålar som träpålar i störst utsträckning används. Anledning till att träpålar i störst utsträckning används vid kombinationspålar är för att undvika problematik för träpålen vid en lägre

hamnar under grundvattenytan. Förr skarvades träpåle mot träpåle med de grövre ändarna mot varandra (Olsson och Holm, 1993). Enligt Peter Alheid görs inte detta längre. Idag skarvas träpålar med spetsen neråt men den övre pålen har ett större toppmått än den undre, detta eftersom beräkningar har visat att pålens bärförmåga då ökar. För att behålla träpålens bärförmåga vid skarvning ställs krav på att pålen med stor noggrannhet hålls rak. I Boverkets SBN -80 redogörs det krav på lutningsändring vid skarv som inte får överstigas (PFS 1980:1,).

2.4 Limträ

Limträ används vanligtvis som konstruktionsmaterial eftersom det är en stark byggkomponent (Svenskt Trä, 2020). I dagsläget används inte limträ som material vid pålning. Limträ kan produceras till långa element som skulle kunna användas som pålar, längre än traditionella träpålar. Limträpålar hade underlättat för grundläggning av linbanan eftersom långa element tar bort behovet av skarvning. Limträ är en av de starkaste byggkomponenterna i förhållande till sin vikt (Träguiden, 2018).

Limträ består av flera lager trä som är ihoplimmade parallellt med fiberriktningen. Dessa lager kallas för lameller (Svenskt Trä, 2020). De olika lamellerna kan ha olika hållfasthetsklasser. En högre hållfasthetsklass innebär starkare limträ. Homogent limträ är konstruerat med samma hållfasthetsklass genom hela limträet. När materialet i de yttre lamellerna har en högre hållfasthetsklass än de i mitten kallas det kombinerat limträ. Den kombinerade varianten är en effektiv lösning för att utnyttja allt trämaterial trots att det inte är lika starkt (Svenskt Trä, 2020).

Den tekniska utformningen av limträ gör att det har högre hållfasthet jämförts med traditionella träpålar (Träguiden, 2018). Det finns många olika hållfasthetsklasser för limträ där en av dem är GL30. Det är den karaktäristiska böjhållfastheten som presenteras i siffran 30 och har enheten MPa (Träguiden, 2017b).

2.5 Miljöpåverkan

För Sveriges totala utsläpp av växthusgaser står byggsektorn idag för 19 % av dessa (Boverket, 2020). En bidragande faktor är valet av material vid byggnation. För att få en förståelse över olika materials hållbarhet är nivåerna av koldioxidutsläpp en aspekt att jämföra. Värden för koldioxidutsläpp och koldioxidupptag kan variera mellan olika källor. I detta avsnitt redovisas hämtade exempelvärden som används för beräkningar av klimatpåverkan i hänsyn till koldioxid.

Sveriges vanligaste material till pålar är betong (Pålkommisionen, 2019). Därför jämförs här trä med betong. För betong är produktionen av cement den mest koldioxidkrävande processen (Svensk Betong, 2020). Alla världens länder har olika sätt att producera betong och ett genomsnittligt utsläppsvärde på $270 \text{ kg } CO_2 - eq/m^3$ kan antas för betongproduktionen (Miller et al., 2016).

Traditionella träpålar släpper ut $1,9 \text{ kg } CO_2 - eq/m$ (Trafikverket, 2019). För att få detta värdet jämförbart med de andra koldioxidutsläppvärden multipliceras således tvärsnittsarean med $1,9 \text{ kg } CO_2 - eq/m$.

Trä har då ett utsläppsvärde på $60,5 \text{ kg } CO_2 - eq/m^3$. Limträ har ett genomsnittligt koldioxidutsläpp på $274 \text{ kg } CO_2 - eq/m^3$ (Martinsson, 2020). Det är utsläpp från skog till färdig produkt, alltså beaktas inte transport från fabrik till byggarbetsplats. Den mest koldioxidkrävande processen vid limträproduktion är då virket ska torka, vilket görs med hjälp av biobränsle (Martinsson, 2020). En fördel med biologiska material som trä är att innan träet blir konstruktionsmaterial växer det i skog och binder där koldioxid (Träguiden, 2017a). Trä binder $1077 \text{ kg } CO_2 - bio/m^3$ under tillväxttiden i skogen, vilket bidrar till negativa koldioxidutsläpp (Martinsson, 2020).

2.6 Transport av pålar

Vid transport av långa element finns det olika föreskrifter som ska beaktas. Beroende på längd finns olika typer av krav. Tre olika transportsätt där det krävs långa fordon kan vara aktuellt för pålar: fordon mellan 24-30 meter, fordon mellan 30-35 meter och fordon över 35 meter (Trafikverket, 2019). Enligt Peter Alheid är träpålar vanligtvis inte längre än 24 meter men i vissa fall kan det förekomma. Beroende på pålarnas längd behöver olika regler följas. Längre last ställer högre säkerhetskrav på transporten (Transportstyrelsen, 2009). Pålar över 24 meter hör till kategorin odelbar last och reglerna ovan kan då behöva beaktas om det inte söks om dispens (Trafikverket, 2019). Vid pålar som går att dela och om lasten blir kortare än 24 meter behöver inte särskilda krav efterföljas.

Vid byggnation av linbanan kan problem med långa transporter uppstå, speciellt i centrala Göteborg. Ett alternativt transportsätt är att frakta långa element på lastfartyg. Denna metod användes vid transport av element till nya Hisingsbron och skulle förslagsvis kunna tillämpas även vid transport av träpålar (Göteborgs Stad, 2019).

3 Tekniska förutsättningar för projektet

En viktig del av projekteringen är att undersöka planområdets förutsättningar innan byggnation. Detta kapitlet redovisar olika tekniska villkor, exempelvis de hydrogeologiska förhållanden samt geologin runt området.

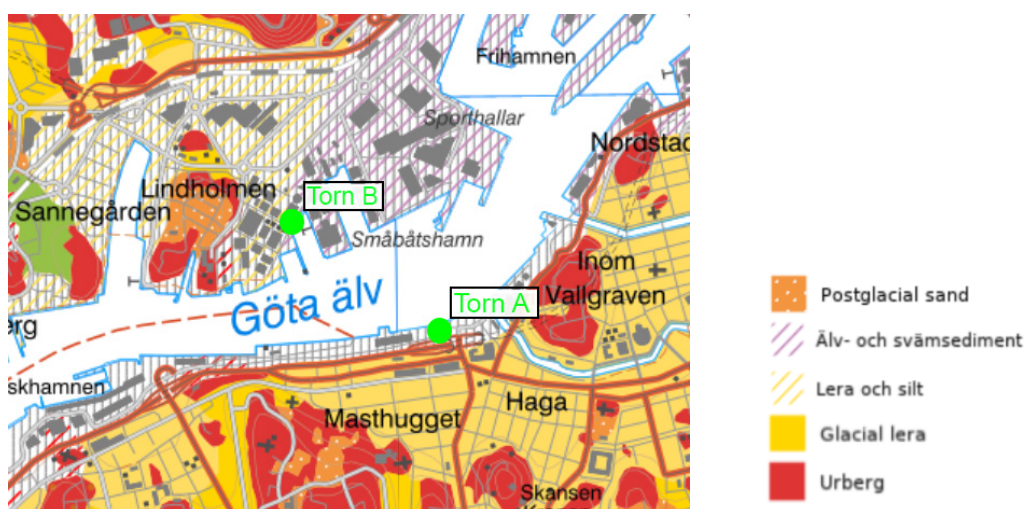
3.1 Regional geologi

Jordarter kan bildas på flera olika sätt, i Sverige har de främst bildats i samband med den senaste istiden som började för drygt 115 000 år sedan (SGU, 2020a). Den sista isen smälte för ungefär 10 000 år sedan (SGU, 2020a). Under isen pressades marken ner vilket gjorde att många jordarter bildades under havsytan; dessa kallas glaciala jordarter (SGU, 2020a). När isen smälte minskade nedtryckningen och en landhöjning som pågår än idag påbörjades (Lantmäteriet, 2020). Landhöjningen gör att jordarter som bildats under havsytan nu är över havsytan. De delar av Sverige som var långt under havsytan under istiden består idag av leriga och siltiga jordar eftersom dessa sediment sjönk långt från dåvarande strandlinje (SGU, 2020c). Det glaciala sedimentet består av material från isens smältvatten, men jordarterna kan också bestå av postglaciala sediment som avsetts efter att isen smält. Allt eftersom marken har höjts har de tidigare havsbottenarna stigit och bildat områden med lera (SGU, 2020c).

Leran på västkusten bildades för 14 000 år sedan och kan bestå av upp till över 100 meter mäktiga lerslager (Larsson och Sällfors, 1995). De understa delarna av det glaciala och postglaciala lagerna består av grövre material vilket beror på att grovt material sjunker snabbare än finkornigt material (Larsson och Sällfors, 1995).

3.2 Lokal geologi

Runt Göta älv finns områden med glacial lera, där torn A ska stå, se figur 4. Vid torn B finns det lera och silt samt ler- och svämsediment (SGU, 2020b).



Figur 4: Jordarter i området (SGU, 2020b). Återgiven och ändrad med tillstånd.

För att ta fram lerdjupet i området har tidigare utförda projekt i närheten av planområdet för de båda tornen analyserats. Leran kring älven är över 100 meter mäktig, se figur 5 (Roupé, 2017). För att bekräfta lerdjupet har ett borrhål i närheten analyserats, vilket har visat att lerdjupet i figur 5 och borrhålet från bilaga A.1 stämmer överens. Borrhålet vid Götatunneln är markerat i figur 5. Ur figur 5 går det att avläsa att de båda tornen är belägna på platser där lerans mäktighet uppgår till över 100 meter.



Figur 5: Lerdjup kring älven (Roupé, 2017) Återgiven och ändrad med tillstånd.

Fyllnadsmaterialet vid torn B och utgör en mäktighet mellan 1-2 meter (Tyréns, 2019). Samt uppgår fyllnadsmaterialet upp till cirka 8 meter kring torn A (Roupé, 2017) som ligger nära kajen. Ett problem som kan uppstå vid pålning genom fyllnadslagret är att träpålens spets kan förstöras eftersom fyllningen består av blandade material som grus, sand, lera och byggnadsrester som tegel och trä, se avsnitt 2.1. Det är därför nödvändigt att gräva bort fyllnadsmaterialet ned till lerlagret för att kunna installera träpålarna (Olsson och Holm, 1993).

3.3 Hydrogeologiska förhållanden

Hydrogeologin är viktig för projektering av grundläggning. Förändring av exempelvis grundvattennivå kan som tidigare nämnt, i avsnitt 2.1, skada träpålar. Det finns då risk för röta vilket i sin tur påverkar träpålens konstruktiva bärförmåga (Björdal, 2015). Grundvattenytan påverkas vid exploatering. För att ta reda på hur grundvattenytan påverkar torn A och B behöver en hydrogeologisk undersökning i området genomföras.

En av de saker som behöver undersökas är nederbörden i området. De senaste fem åren har nederbörden varierat mellan 751 - 1090 mm i Göteborg (SMHI, 2020). En annan aspekt som bör utredas är grundvattenytan vid torn A och B. År 2006 utfördes mätningar av grundvattennivån vid Lindholmen. Grundvattenytan varierade då mellan -0,6 till -1 meter under markytan (Tyréns, 2019). Vid torn A korresponderar grundvattennivån med vattennivån i Göta älv (Roupé, 2017).

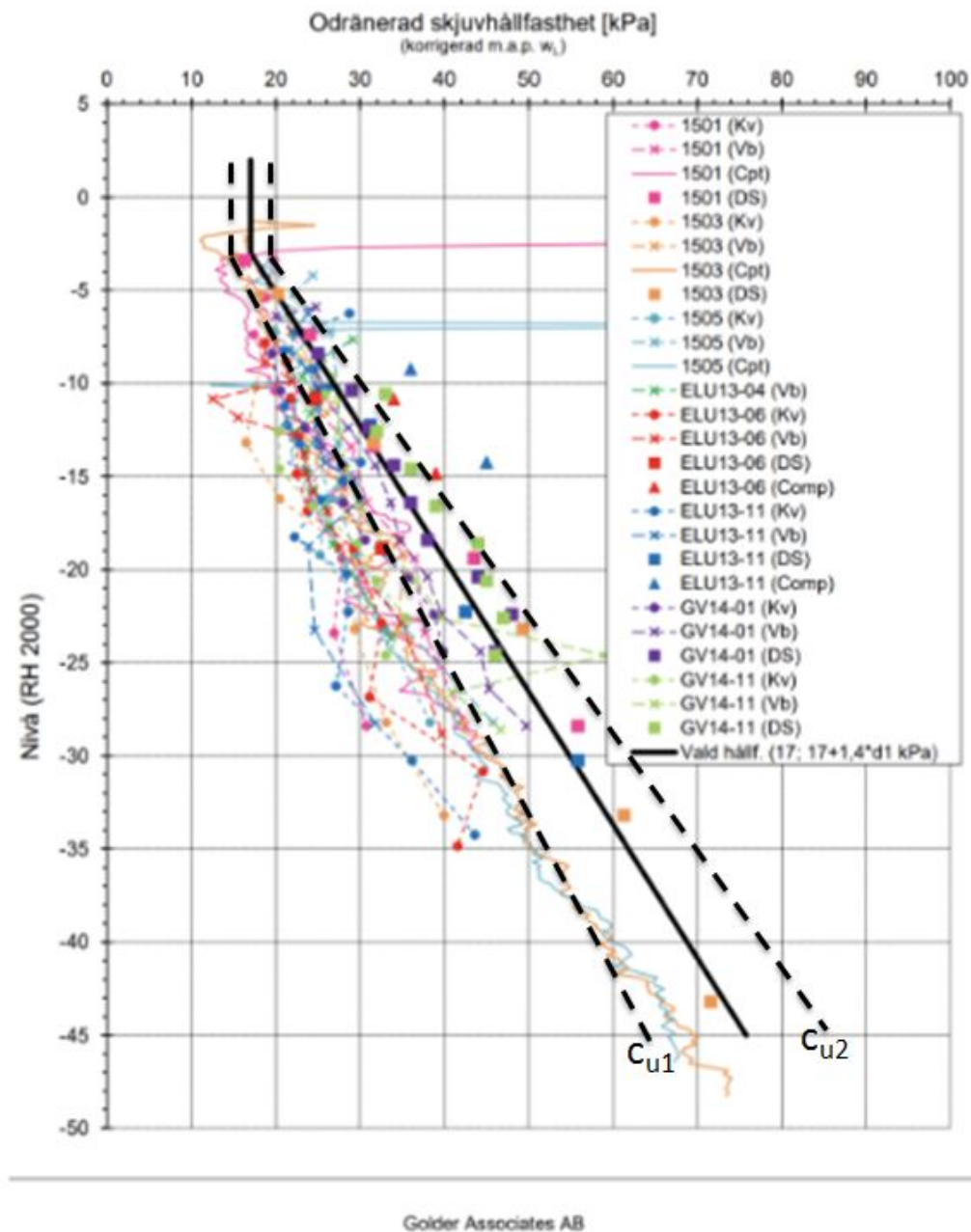
I framtiden förväntas mer extremväder som en konsekvens av global uppvärmning (SMHI, 2017). Detta kan leda till både höjningar och sänkningar av grundvattennivån som då resulterar i stora varianser från år till år. Till följd av klimatförändringarna förväntas en ökning av havsvattennivån på +2,30 meter till år 2070 (Tyréns, 2019).

3.4 Förutsättningar för grundläggning

För att ta reda på hur långa pålarna behöver vara samt hur många pålar som behövs behöver konstruktionens tyngd beräknas. Utifrån *Design report, Linbanan Göteborg, tower B* har fundamentets storlek förenklats till 30 x 40 meter, 3 meter högt och med en betong med densitet 2500 kg/m^3 (Sweco, uå). Fundamentets last beräknas till 81 611 kN. Lasten från ett torn har angivits till 34 200 kN (Sweco, uå). Den totala last, Q , som pålarna behöver bära beräknas med ekvation 1.

$$Q = 81611 + 34200 = 115811 \text{ kN} \quad (1)$$

Skjuvhållfastheten där torn A och B skulle stå har inte undersökts. Därför har data från ett närliggande projekt istället använts där den odränerade skjuvhållfastheten i leran testades (Roupé, 2017). Utifrån den uppskattade skjuvhållfastheten, svarta linjen, i figur 6 approximerades en lägsta, c_{u1} , och en högsta, c_{u2} , skjuvhållfasthet, se värden i tabell 1.



Figur 6: Odränerad skjuvhållfasthet, med ett uppskattat högsta och lägsta värde för skjuvhållfasthet, vid Järnvågen i Göteborg (Roupé, 2017). Återgiven och ändrad med tillstånd.

Tabell 1: Högsta och lägsta värde på skjuvhållfasthet vid nivå -3 samt ökning med djupet.

Skjuvhållfasthet	c_u [kPa]	Δc_u [kPa]
c_{u1}	15	1,2
c_{u2}	19	1,6

4 Utvärdering av träpålar

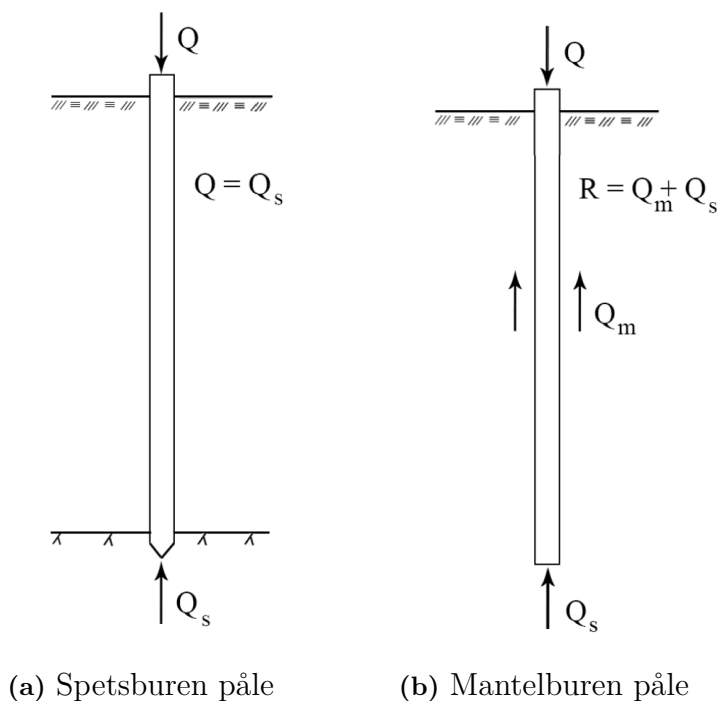
Möjligheten att använda traditionella träpålar och limträpålar som grundläggningsmetod för linbanan har undersökts. Beräkningar av bärkapacitet hos både enskilda pålar och pålgrupper har genomförts, beräkningarna finns dokumenterade i bilaga A.3. För att få en uppfattning om skillnader i materialåtgång och koldioxidutsläpp i användandet av olika material genomförs samma beräkningar för betongpålar. I beräkningarna har två olika fall genomförts.

I fall 1 har de karaktäristiska värdena för konstruktionens last och materialens tryckhållfasthet använts. Detta fall har genomförts för att kontrollera om det är teoretiskt möjligt att använda träpålar eller limträ som grundläggningsmetod för linbanan.

I fall 2 har samma tvärsnitt använts som i fall 1 men säkerhetsfaktorer har beaktats. De dimensionerande värdena har använts både för konstruktion och bärförmåga för de olika materialen. Detta genomfördes för att beakta de säkerhetsfaktorer som används i byggbranschen.

4.1 Beräkning av pålkapacitet

Den totala last som pålarna klarar att bära är summan av $Q_m + Q_s - W'$ där Q_m är mantelns bärförmåga, Q_s är spetsens bärförmåga och W' är pålens effektiva egen tyngd. Q_m och W' varierar med pålens längd och Q_s varierar med pålens tvärsnittsarea (Olsson och Holm, 1993), se figur 7. Eftersom träpålens effektiva egen tyngd, W' är liten i förhållande till konstruktionens last har denna försumrats.



Figur 7: Krafter som verkar på olika påltyper. Egen figur med inspiration från (Alén, 2012)

En påles geotekniska bärförmåga, R , påverkas av jordens egenskaper och pålens längd. Enligt Alén (2012) används ekvation 2 vid beräkning av den geotekniska bärförmågan.

$$R = Q_m + Q_s = f_m \cdot A_m + f_s \cdot A_s \quad (2)$$

Pålens mantelarea betecknas A_m och A_s är spetsarean. Q_s är bärförmågan vid pålens spets, detta värde antas vara försumbart. På grund av att Q_s försummas kan R beräknas enligt ekvation 3.

$$R \approx Q_m \quad (3)$$

Friktionen mellan mantelytan på pålen och den omgivande jorden betecknas f_m och beräknas enligt ekvation 4 (Alén, 2012).

$$f_m = c_u \cdot \alpha \quad (4)$$

Den empiriskt framtagna adhesionsfaktorn, α , beaktar lertyp, skjuvhållfasthet, överkonsolideringsgrad och pållängd (Olsson och Holm, 1993), se tabell 2. Adhensionsfaktorn för en träpåle valdes till 1,2 på grund av minskande tvärsnittsarea mot botten av pålen (Alén, 2012).

Tabell 2: Adhensionsfaktor för olika material (Alén, 2012)

Material	Adhensionsfaktor, α
Trä	1,2
Limträ	1,0
Betong	1,0

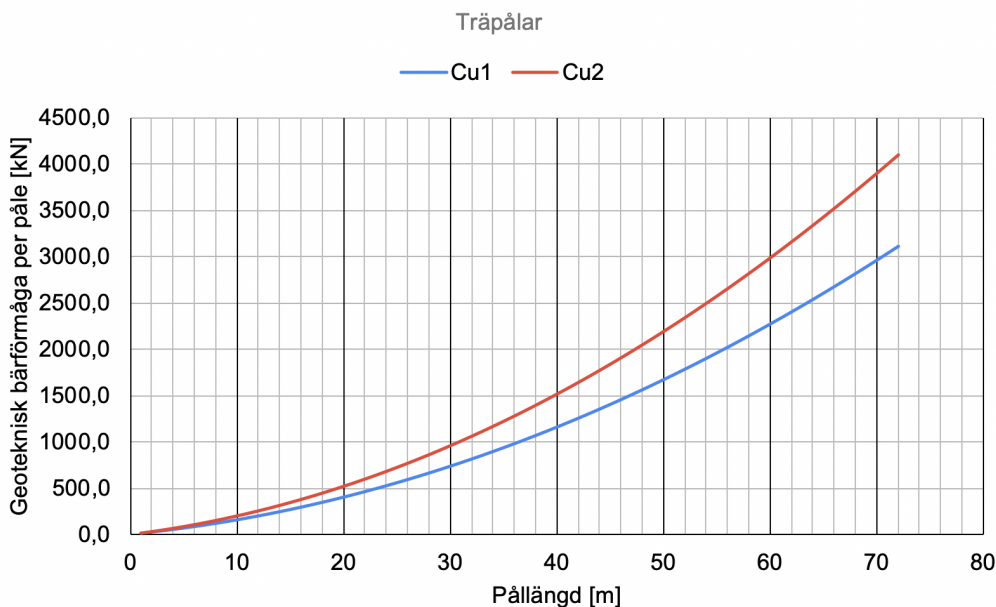
I tabell 3 redovisas den omkrets som använts vid beräkning av den geotekniska bärförmågan för en enskild påle för respektive material, se ekvation 5. En större omkrets och längd ger en större mantelarea som kohesion kan verka på. För träpålar har medelvärdet av omkretsen för rotända och pålspets, 620 mm, använts.

Tabell 3: Pålarnas dimensioner för fall 1 och 2.

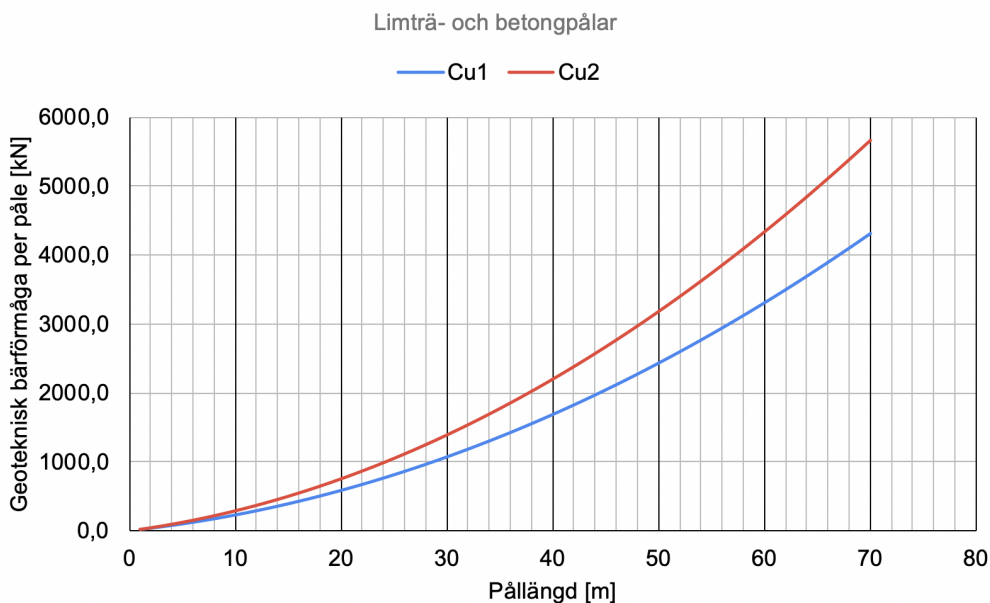
Material	Dimensioner tvärsnitt [mm]	Omkrets [mm]
Träpåle rotända	270	845
Träpåle pålspets	130	393
Kvadratisk limträpåle	270 · 270	1 080
Kvadratisk betongpåle	270 · 270	1 080

$$Q_m = L \cdot O \cdot \alpha \left(c_u + \left(\frac{\Delta c_u \cdot L}{2} \right) \right) \quad (5)$$

För pålarna med dimensioner enligt tabell 3 beräknas två olika Q_m där c_u och Δc_u varierar mellan ett lägsta och ett högsta värde. Resultatet blir att två linjer i samma diagram kan plottas för att se inom vilket intervall bärförmågan för vardera material varierar. Den geotekniska bärförmågan, Q_m , beräknat som en funktion av längden på pålen, L , presenteras i figur 8 för trä och i figur 9 för limträ och betong. Tvärsnittet och adhesionsfaktorn α är samma för limträ och betong därför presenteras den geotekniska bärförmågan för dessa material i samma figur.



Figur 8: Geoteknisk bärförmåga för traditionella träpålar



Figur 9: Geoteknisk bärförmåga för limträ- och betongpålar

Den geotekniska bärförmågan ökar med ökad pällängd. En påle kan teoretiskt sett vara exempelvis 70 meter lång och klara högre laster än vad den konstruktiva bärförmågan för respektive påle är. I många fall för träpålar och långa kohesionspålar i betong är den konstruktiva bärförmågan dimensionerande och inte den geotekniska (Pålkommissionen, 2004), vilket dessa beräkningar utgår från. På grund av detta beräknas antal pålar utifrån den konstruktiva bärförmågan i både fall 1 och 2.

Den konstruktiva bärförmågan för en påle beror främst på tvärsnittsarean och materialets tryckhållfasthet. Limträet antas vara av hållfasthetsklass GL30 vilket ger en tryckhållfastheten på 30 MPa (Svenskt Trä, 2015). Betongens hållfasthetsklass antas vara C55/67 vilket ger en tryckhållfastheten på 55 MPa (Al-Emrani et al., 2013). För en träpåle med dimensioner enligt tabell 3 är den dimensionerande konstruktiva bärförmågan, R_d , 550 kN. Värdet 550 kN användes även som karaktäristisk konstruktiv bärförmåga, R_k , då det inte finns ett separat värde för detta. Värdena i tabell 3 används för att beräkna den konstruktiva bärförmågan för limträ och betong.

För fall 1 har den karaktäristiska konstruktiva bärförmågan, R_k för limträ- och betongpålar beräknats utifrån respektive materials tryckhållfasthet och respektive påles tvärsnitt. I figur 10 och 11 illustreras erforderlig längd på pålarna utifrån den karaktäristiska bärförmågan för respektive pålmaterial. Antalet pålar som krävs för de olika materialen beräknas genom att den totala lasten Q , se ekvation 1, divideras med en påles konstruktiva bärförmåga. Detta resultat redovisas i tabell 4.

Tabell 4: Karakteristiska konstruktiva bärförmågan per påle, R_k , pällängd och antal pålar för fall 1.

Material	R_k [kN]	Längd [m]	Antal pålar [st]
Trä	550	22	219
Limträ	2 190	43	53
Betong	4 010	61	30

För fall 2 behöver den dimensionerande bärförmågan, R_d , beräknas. Detta redovisas i tabell 5 för limträ och i tabell 6 för betong. För att beräkna den dimensionerande bärförmågan R_d multipliceras den dimensionerande tryckhållfastheten, f_d för limträ och f_{cd} för betong, med tvärsnittsarean.

För limträ beräknas den dimensionerande tryckhållfastheten, f_d , i brottgränstillstånd enligt ekvation 6 (Al-Emrani et al., 2013).

$$f_d = k_{mod} \frac{f_k}{\gamma_M} \quad (6)$$

Tabellvärdet k_{mod} tar hänsyn till lastens varaktighet och fuktförhållanden, f_k , är karaktäristisk tryckhållfasthet i aktuell belastning och γ_M är materialets partialkoefficient (Al-Emrani et al., 2013).

Tabell 5: Parametrar som använts för beräkning av dimensionerande bärförmågan för en limträpåle.

Material	k_{mod} [-]	f_k [MPa]	γ_M [-]	f_d [MPa]	R_d [kN]
Limträ	0,6	30	1,25	14,40	1 050

För betong beräknas den dimensionerande tryckhållfastheten, f_{cd} , med ekvation 7 (Al-Emrani et al., 2013)

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (7)$$

där α_{cc} är en faktor som tar hänsyn till hållfasthetsreduktion vid långvarig belastning och γ_c är en partialkoefficient.

Tabell 6: Parametrar som använts för beräkning av dimensionerande bärförmågan för en betongpåle.

Material	α_{cc} [-]	f_{ck} [MPa]	γ_c [-]	f_{cd} [MPa]	R_d [kN]
Betong	1,0	55	1,5	36,67	2 670

För att beräkna det dimensionerande värdet på lasten, Q_d , används ekvation 8 (Alén, 2012). De ingående parametrarna för att beräkna det dimensionerande värdet på lasten redovisas i tabell 7.

$$Q_d = Q \cdot \gamma_{Rd} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_n \quad (8)$$

Tabell 7: Parametrar för beräkning av dimensionerande värdet på lasten Q.

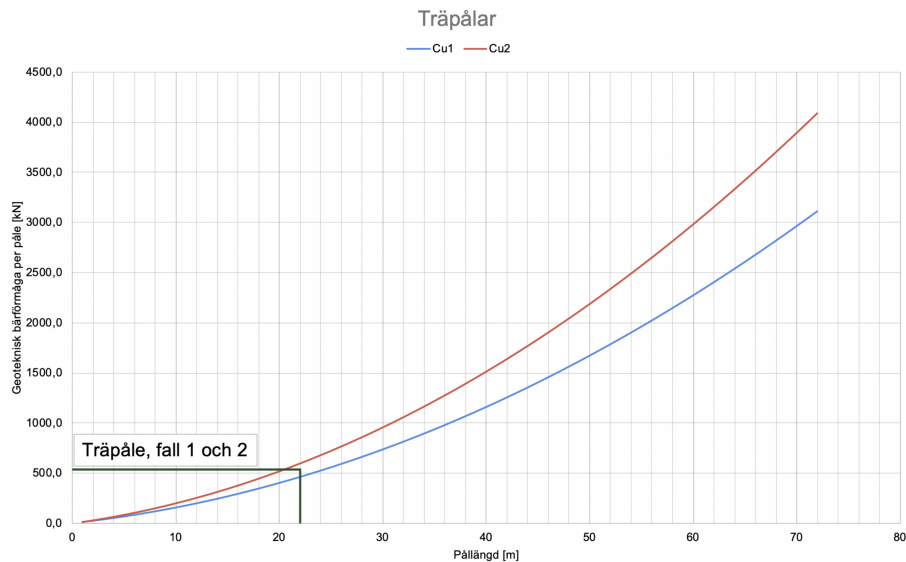
Last, Q [kN]	γ_{Rd} [-]	γ_m [-]	γ_n [-]
115 811	1,7	1,35	1,0

Den dimensionerande lasten från konstruktionen blir utifrån ovanstående ekvation $Q_d=265\,786$ kN. Antalet pålar som krävs för de olika materialen beräknas genom att den dimensionerande lasten Q_d divideras med en påles dimensionerande konstruktiva bärförmåga R_d . Detta resultat redovisas i tabell 8.

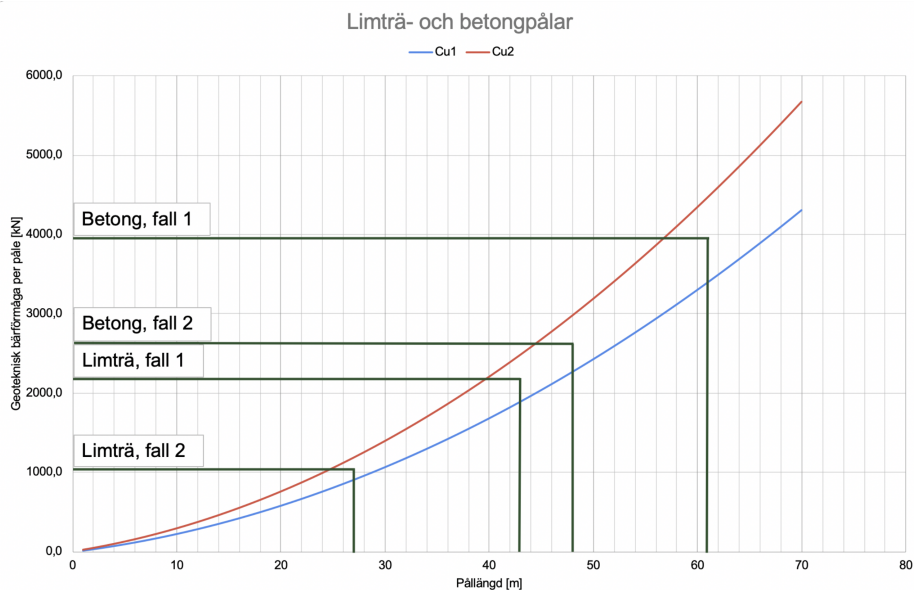
Tabell 8: Dimensionerande konstruktiva bärförmågan, R_d , pällängd och antal pålar för fall 2.

Material	R_d [kN]	Längd [m]	Antal pålar [st]
Trä	550	22	502
Limträ	1 050	27	254
Betong	2 670	48	102

Resultat från tabell 4 och 8 sammanställs tillsammans med den geotekniska bärförmågan i figur 8 och 9. Detta skapar figur 10 och 11 där erhållen geoteknisk bärförmåga, konstruktiv bärförmåga och pällängd illustreras.



Figur 10: Geoteknisk bärförmåga för traditionella träpålar, där de svarta linjerna illustrerar pålarnas konstruktiva bärförmåga och den längd som motsvarar likvärdig geoteknisk bärförmåga för fall 1 och 2.



Figur 11: Geoteknisk bärförmåga för limträ- och betongpålar, där de svarta linjerna illustrerar pålarnas konstruktiva bärförmåga och den längd som motsvarar likvärdig geoteknisk bärförmåga för respektive material för fall 1 och 2.

4.2 Kontroll blockbrott

När en konstruktion kräver många pålar på en begränsad yta kan pålarna komma att sitta tätt vilket gör att de påverkar varandra. Pålgruppen verkar då som ett block tillsammans med den inneslutande jorden och pålgruppens bärförmåga måste beräknas med hänsyn till eventuellt blockbrott (Fleming et al., 2009).

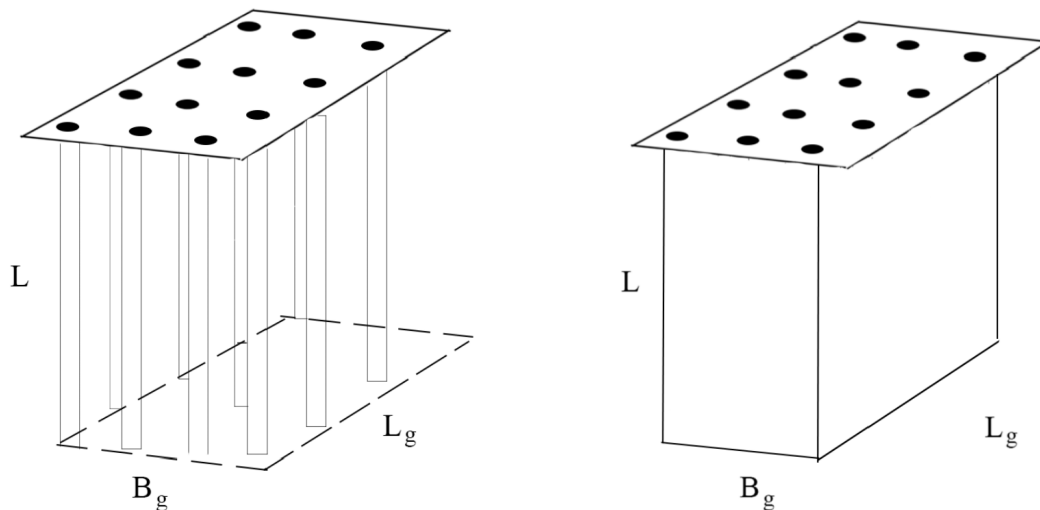
Bärförmågan för en pålgrupp i lera beräknas enligt ekvation 9

$$q_{bf} = A_{base} \cdot N_c \cdot c_u \quad (9)$$

där A_{base} är pålgruppens bottenarea, N_c är bärighetsfaktorn och c_u är skjuvhållfastheten i jorden vid pålens spets. Bärighetsfaktorn, N_c , beräknas enligt ekvation 10 (Fleming et al., 2009)

$$N_c = 5 \left(1 + \frac{0,2B_g}{L_g} \right) \left(1 + \frac{0,2L}{B_g} \right) \quad (10)$$

där B_g och L_g är blockets bredd respektive längd och L är längden på en påle, se figur 12.



(a) Brott för enskild påle

(b) Blockbrott

Figur 12: Bild över hur enskilda pålar verkar samt hur flera av dessa kan verka som ett block. Egen figur med inspiration från (Fleming et al., 2009)

I beräkningarna har bottenplattan antagits till 30 x 40 meter. Ett antagande att pålarna placeras en meter in från bottenplattans kant gjordes. På grund av att bottenplattan i detta förslag är rektangulär behövde båda riktningar kontrolleras för blockbrott. Dessa riktningar och dess mått redovisas i tabell 9.

Tabell 9: De två riktningar samt mått som kontrollerades för blockbrott

	B_g [m]	L_g [m]	A_{base} [m ²]
Riktning 1	28	38	1064
Riktning 2	38	28	1064

Det föreligger mer risk för blockbrott när B_g är 28 meter, eftersom pålgruppens bärförmåga q_{bf} då blir lägre. Därför redovisas endast resultatet av riktning 1 nedan. I beräkningarna beaktas de traditionella träpålarna då det enligt tabell 4 och 8 krävs kortare och fler träpålar än limträpålar och betongpålar.

För fall 1 beräknades pålgruppens bärförmåga, q_{bf} , utifrån antal traditionella träpålar och pällängd från tabell 4. Om dessa pålar fördelas jämnt under bottenplattan skulle de sitta med 2,2 meters avstånd. Blockbrott behöver bara kontrolleras om centrumavståndet mellan pålarna är kortare än 5 gånger påldiametern (Ranjan, 2007). Träpålens rot diameter är 270 mm, vilket resulterar i att 5 gånger påldiametern är mindre än centrumavståndet. Blockbrott behöver alltså inte kontrolleras. Görs detta ändå visar det att pålgruppens bärförmåga blir 313 920 kN, vilket är högre än den totala lasten, 115 811 kN, som grundläggningen behöver klara, se resultat i tabell 10.

För fall 2 beräknades pålgruppens bärförmåga, q_{bf} , utifrån antal traditionella träpålar och pällängd från tabell 8. Om dessa träpålar fördelas jämnt under bottenplattan skulle centrumavståndet vara 1,46 meter, vilket är större än 5 gånger diametern. Trots detta kontrollerades pålgruppens bärförmåga. Beräkningarna visar att risk för blockbrott inte förekommer då pålgruppens bärförmåga blir 337 620 kN, vilket är större än den dimensionerande lasten 265 786 kN, se resultat i tabell 10.

Tabell 10: Sammanställning av pålar, pålgruppens bärförmåga samt last från konstruktionen för respektive fall

	Antal pålar	Pällängd [m]	q_{bf} [kN]	Q [kN]	Q_d [kN]
Fall 1	219	20	313 920	115 811	-
Fall 2	502	22	337 620	-	265 786

4.3 Materialåtgång

Materialåtgång är en betydande parameter att ta i beaktande vid valet av vilket grundläggningmaterial som ska användas. I tabell 11 och 12 presenteras den totala volym material som behövs vid pålning tillsammans med det totala koldioxidutsläppet och den totala bundna koldioxid i grundläggningen för respektive val av

pålmateriel. Vid beräkning av materialåtgång har värden för antalet pålar använts från avsnitt 4.1.

För att beräkna totalt koldioxidutsläpp samt den totalt bundna koldioxid för grundläggning med respektive material används värden från avsnitt 2.5. I tabell 11 och 12 står utsläpp för det totala koldioxidutsläppet för produktion av pålar för respektive material. Bundet står för den totala mängd koldioxid som träden binder under sin tillväxttid.

Tabell 11: Materialåtgång och koldioxidutsläpp för fall 1 då karaktäristiska värden har använts.

Material	Volym [m ³]	Utsläpp [kg CO ₂ -eq]	Bundet [kg CO ₂ -bio]
Trä	147	8 894	158 158
Limträ	166	45 484	178 932
Betong	133	35 910	-

Tabell 12: Materialåtgång och koldioxidutsläpp för fall 2 då säkerhetsfaktorer har beaktats.

Material	Volym [m ³]	Utsläpp [kg CO ₂ -eq]	Bundet [kg CO ₂ -bio]
Trä	337	20 389	362 536
Limträ	500	137 000	538 444
Betong	357	96 390	-

4.4 Analys av beräkningar

I fall 1 analyseras de karaktäristiska värdena för last och tryckhållfasthet medan fall 2 utgår från de dimensionerande värdena. Beräkningarna i fall 1, utan säkerhetsfaktorer, visade att det utifrån karaktäristiska värden är möjligt att grundlägga med både traditionella träpålar och limträpålar. Det var också därför intressant att undersöka om grundläggning med respektive pålmateriel även klarar de dimensionerande värdena som används i byggbranschen.

Vid beräkning av antalet traditionella träpålar som krävs för att bära lasten från konstruktionen har den konstruktiva bärförmågan antagits till 550 kN. Detta värde är den dimensionerande konstruktiva bärförmågan, men samma värde har använts för den karaktäristiska konstruktiva bärförmågan. Detta gör att antalet träpålar i fall 1 skulle kunna vara färre än vad resultatet visar. Förenklingen gör att en större säkerhetsmarginal beaktats. För limträpålar har ett karaktäristiskt och ett dimensionerande värde för den konstruktiva bärförmågan beräknats. Jämförs den konstruktiva bärförmågan för limträ och trä i fall 1 är skillnaderna stora på grund av att det dimensionerande värdet för traditionella träpålar redan använts i detta fall.

Beräkningarna visar att det krävs färre limträpålar än traditionella träpålar utifrån den konstruktiva bärförmågan, se tabell 13 och 14. Anledningen till detta är att den

karaktäristiska konstruktiva bärförmågan för limträ med ett tvärsnitt på 270 x 270 mm är 2 190 kN. Detta är uppemot fyra gånger större konstruktiv bärförmåga än för en traditionell träpåle, vilket innebär att limträ hade varit det mest optimala materialet vid pålgrundläggning ur en resultatbaserad analys. I jämförelse med en traditionell träpåle är fördelen med limträ att dimensionerna för den sistnämnda är flexibla. Ett större tvärsnitt för limträpålar, än vad som används i beräkningarna, hade medfört större konstruktiv bärförmåga och därmed minskat behov av antal pålar.

Tabell 13: Karakteristiska konstruktiva bärförmågan per påle, R_k , pällängd, dimensioner för tvärsnitt samt antal pålar för fall 1, då karaktäristiska värden har använts.

Material	R_k [kN]	Längd [m]	Dimensioner tvärsnitt [mm]	Antal pålar [st]
Trä	550	22	$D_{rot}=270$ $D_{spets}=130$	219
Limträ	2 190	43	270 · 270	53
Betong	4 010	61	270 · 270	30

Tabell 14: Dimensionerande konstruktiva bärförmågan per påle, R_d , pällängd, dimensioner för tvärsnitt samt antal pålar för fall 2, då säkerhetsfaktorer har beaktats.

Material	R_d [kN]	Längd [m]	Dimensioner tvärsnitt [mm]	Antal pålar [st]
Trä	550	22	$D_{rot}=270$ $D_{spets}=130$	502
Limträ	1 050	27	270 · 270	254
Betong	2 670	48	270 · 270	102

Beräkningarna visar att om de traditionella träpålarna används behöver skarvning endast ske med en trä- betongskarv då pålarna inte behöver vara längre än 22 meter. Eftersom de traditionella träpålarna som används i byggbranschen idag är 18 meter räcker det med en sådan och en några meter lång betongpåle i rotändan.

Utifrån resultatet av beräkningarna i avsnitt 4.2 finns det ingen risk för blockbrott, varken i fall 1 eller 2. Detta beror på att den bottenplattan tillåter avstånd mellan pålarna som är tillräckligt stora. Det föreligger alltså ingen risk för blockbrott så länge bottenplattan är 1 200 m² stor. Pålgruppen klarar mer last i fall 2 än fall 1 på grund av att pålarna är längre och jordens skjuvhållfasthet således är större vid pålspets. Där emot är skillnaden mellan pålgruppens bärförmåga och lasten från konstruktionen mindre i fall 2 än fall 1. Detta visar att det finns mindre marginal till blockbrott vid fall 2.

4.5 Hållbarhetsanalys

Likt tidigare nämnt står byggsektorn i Sverige för 19 % av koldioxidutsläppen. De val som kan gynna miljön är viktiga ur ett hållbarhetsperspektiv. Materialval är ett typiskt exempel på detta. I avsnitt 2.5 som behandlar miljöpåverkan från olika material redovisas koldioxidutsläpp för materialen trä, limträ och betong. I avsnitt

4.3 redovisas att traditionella träpålar bidrar till drygt fyra gånger mindre koldioxidutsläpp jämfört med betongpålar. Limträ däremot släpper under tillverkningsprocessen ut mer koldioxid än betong, men att välja limträ framför betong kan trots detta vara bättre för miljön. Förklaringen till detta är att trä binder koldioxid när det växer, vilket nämns i avsnitt 2.5. Om de biologiska materialens förmåga att uppta koldioxid inte beaktas vid framtagning av datan får dessa material en felaktig hållbarhetsbedömning. I tabell 15 och 16 redovisas att både de traditionella träpålarna och limträpålarna tar upp mer koldioxid under sin tillväxtperiod än vad de släpper ut vid produktion. I tabell 15 och 16 har en total påverkan beräknats utifrån värde för utsläppt och bundet koldioxid för respektive pålmaterial från tabell 11 och 12. Om traditionella träpålar jämförs med limträpålar är slutsatsen att trä inte behöver bearbetas lika mycket som limträ, därför har trä lägre koldioxidutsläpp vid produktion.

Tabell 15: Materialåtgång, koldioxidutsläpp från produktion och total påverkan för fall 1 då karaktäristiska värden har använts.

Material	Volym [m ³]	Utsläpp [kg CO ₂ -eq]	Total påverkan [kg CO ₂ -eq]
Trä	147	8 894	- 149 264
Limträ	166	45 484	- 133 448
Betong	133	35 910	35 910

Tabell 16: Materialåtgång och koldioxidutsläpp för fall 2 då säkerhetsfaktorer har beaktats.

Material	Volym [m ³]	Utsläpp [kg CO ₂ -eq]	Total påverkan [kg CO ₂ -eq]
Trä	337	20 389	- 342 147
Limträ	500	137 000	- 401 444
Betong	357	96 390	96 390

De pågående klimatförändringarna och exploatering kan bli ett problem i framtiden, detta kan leda till att grundvattnivån sänks och grundläggningar av trä då drabbas. Detta eftersom trä inte ska utsättas för syre utan vara under grundvattenytan för att inte riskera röta. I avsnitt 3.3 presenteras framtida förväntade höjda havsnivåer till följd av den globala uppvärmingen, om detta leder till höjd grundvattnivå påverkas inte träpålarnas konstruktiva bärförmåga.

Används de mer traditionella träpålarna är lasten kortare än 24 meter och de särskilda kraven för lång transport behöver inte efterföljas, se avsnitt 2.6. Limträpålarna sätts ihop till sin fulla längd redan i fabrik och blir alltså odelbar last vilket gör att transporten inte kan delas upp i kortare längder. På grund av detta kan det vara bättre med kortare pålar som minskar risken för trafikstockning. Alternativt kan dessa pålar fraktas via Göta älv till byggplatsen för att minska problem med trafiken i Göteborgs innerstad.

5 Diskussion

Målet med denna rapport är att ge svar på om trä är ett lämpligt material att använda till grundläggning av stadslinbanans torn närmst Göta älv. Detta kan analyseras utifrån många aspekter. I detta avsnitt följer reflektioner kring resultatets trovärdighet samt vilka brister som finns i arbetet.

5.1 Metoddiskussion

I arbetet med kandidatarbetet har metod valts för att komma fram till ett så bra resultat som möjligt utifrån frågeställningen. Dessa val hade kunnat varit annorlunda och på så sätt ge ett annat och kanske bättre resultat.

En stor utmaning med arbetet har varit att hitta uppdaterad information om detaljer kring användandet av träpålar. Under intervjun med Peter Alheid nämnde han att mycket information och kunskap som finns i branschen inte är dokumenterad. Detta tyder på att om fler intervjuer hade genomförts med sakkunniga hade arbetet kunnat grundas på mer fakta och mer information hade kunnat användas. Det har varit svårt att hitta information om liknande konstruktioner och förutsättningar även om det från början var tänkt att använda denna typ av fakta. Om personer med specialkunskap inom grundläggning av höghus eller, exempelvis, vindkraftverk hade intervjuats hade deras kunskap varit till nytta för detta arbete. För att underlätta sökning av information, som det lagts mycket tid på under arbetets gång, hade specifika sökord kunnat väljas. Det hade gjort insamlingen av information mer strukturerad och effektiv. Att använda specifika sökord hade varit speciellt bra i början för att snabbt hitta mycket och relevant information.

I rapportens beräkningsdel har både pålarnas konstruktiva och geotekniska bärkapacitet, risk för blockbrott samt materialåtgång analyserats. Vid beräkning av pålarnas längd och geotekniska bärkapacitet har, den så kallade, alfametoden använts. Dessa beräkningar går också att genomföra med, den så kallade, betametoden. I betametoden används friktionsfaktorn, β , medans alphametoden istället baseras på adhesionfaktorn, α . Om båda beräkningsmetoderna genomförts hade analysen kunnat baseras på ett bredare underlag och gett ett mer tillförlitligt resultat.

Vid beräkning med koldioxidutsläpp och koldioxidupptag för de olika pålmaterialen skulle en mer tillförlitlig jämförelse kunna genomföras om de hämtade värden kunnat erhållas från samma källa.

Sammanfattningsvis anses de valda metoderna för studien vara relevanta och tillräckliga för att besvara frågeställningen. Trots det hade metoderna kunnat utvecklas för att ge ett mer övergripande resultat av arbetet.

5.2 Fortsatta studier

Några av de saker som har diskuterats under arbetets gång, men som inte har undersökts ytterligare, kommer nämnas kort nedan. Dessa fortsatta studier hade kunnat förbättra resultatet och bidra till ett mer komplext resultat av arbetet.

En viktig del i ett fortsatt arbete är att beräkna risk för knäckning av pålarna och kontrollera sättningar. Detta har inte genomförts eftersom fokus i arbetet har varit att ta reda på längd av pålar och utvärdera vilken bärförmåga varje specifikt pålmaterial har. Knäckning och sättningar behöver undersökas för att ge ett resultat mer likt verkligheten. Det är viktigt att undersöka sättningar då dessa riskerar att blir stora när relativt korta träpålar används i ett mäktigt lager lera. Om knäckning hade tagits med i beräkningarna skulle detta troligtvis medfört en lägre bärförmåga och att fler pålar hade behövts för att klara den totala lasten. Resultatet hade troligtvis visat att det behövdes mer traditionella träpålar än limträ och betong för att klara knäckning. Trots det hade inte resultatet av att träpålarnas totala klimatavtryck i hänsyn till koldioxid är mindre än betongpålarnas ändrats, då träets bundna koldioxid fortfarande kommer vara större än utsläppet oavsett volym.

I vidare studier hade limträ behövt undersökas närmare då det inte är ett vedertaget pålmaterial. Detta arbete visar att det utifrån den konstruktiva och geotekniska bärförmågan hade varit möjligt att använda limträpålar men det finns fler aspekter att undersöka. En större dimension på limträpålen skulle ge en högre bärförmåga vilket skulle kunna göra det möjligt att använda längre pålar och eventuellt färre pålar.

För ett mer korrekt svar på vad som är miljömässigt hållbart kan fler aspekter än koldioxidutsläpp studeras. Det hade varit intressant att studera hur träproduktion och avverkning av skog påverkar ekologin och människors upplevelse av naturen. Ytterligare faktorer som kan påverka är var materialet produceras, hur långa transporterna blir till byggplatsen och hur dessa sker. Vidare bör det även genomföras en fullständig livscykelanalys av de olika materialen för att stärka valet av trä ytterligare.

Något som diskuterats under arbetets gång är att använda träpålar i kombination med deep mixing, en typ av markförstärkning och på så sätt minska behovet av antal träpålar. Om detta undersöks finns det flera aspekter att utreda, men framförallt om det är genomförbart. Vad som kan vara problematiskt med ett eventuellt genomförande hade enligt Peter Alheid varit att det blir ett kritiskt moment i byggprocessen. Han menar att träpålarna kommer behöva slås ner strax efter markförstärkningen vilket utgör en risk för försening om de två momenten inte samspelar. Det kan också bli problematiskt att få ner pålarna om markförstärkningen hunnit stelna. Komplexiteten i detta förslag gjorde att det inte undersöktes i projektet.

Avslutningsvis kan återanvändande av träpålar vara ett förslag på en fortsatt studie. Träpålar som tas upp ur lera är ofta av god kvalitet, därför hade det varit intressant att ur ett hållbarhetsperspektiv undersöka om dessa kan återanvändas till andra produkter eller till framställning av energi.

6 Slutsats

En av utmaningarna som Göteborg står inför är hur staden kan exploateras trots att den står på mäktiga lager lera. Vid byggnation krävs det därför omfattande arbete med grundläggning. I kandidatarbetet har det utretts om trä är ett möjligt materialval för grundläggning av den tänkta stadslinbanan. Trä valdes med bakgrund av att byggsektorn står för nästan 20% av Sveriges totala koldioxidutsläpp. Genom att öka användningen av hållbara material kan koldioxidutsläppen minska.

Resultatet av beräkningar med α -metoden visar att träpålar klarar lasten från linbanans torn och fundamentet, även med säkerhetsfaktorer. Används traditionella träpålar, som har en dimensionerande konstruktiv bärförmåga på 550 kN, skulle det krävas 502 stycken 22 meter långa pålar för att klara lasterna. Även limträpålar undersöktes då deras dimensionerande bärförmåga är betydligt högre än de traditionella träpålarna. Om limträ skulle användas räcker det med 254 stycken 27 meter långa pålar. Kontroll för blockbrott visar att det inte finns risk för detta. Beräkningarna har avgränsats till att enbart ta hänsyn till pålarnas bärförmåga. Andra möjligt dimensionerande parametrar så som knäckning och bärförmåga i drag har inte tagits i beaktning.

Den andra aspekten som undersökts i arbetet var om trä är ett mer hållbart alternativ till grundläggning jämfört med det mer vanligt förekommande materialet betong. Eftersom trä binder mer koldioxid vid tillväxt än vad det släpper ut vid produktion erhålls en totalt sett negativ klimatpåverkan med hänsyn till koldioxid för traditionella träpålar och limträpålar. Traditionella träpålar och limträpålar har därmed lägre klimatpåverkan med hänsyn till koldioxid än betongpålar.

I denna rapport har frågeställningarna besvarats och målet med att undersöka trä som material till grundläggning har uppnåtts. Detta kandidatarbete kan användas som vägledning för framtida forskning inom samma område.

Referenser

- Abdeldayem, M. A., Mabrouk, M. H., och Abo_Elnor, M. (2019). Estimating uncertainties for the driving torque in continuous flight auger machine during space sampling drilling operation. I *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Kairo, Egypten. doi: 10.1088/1757-899X/610/1/012024.
- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., och Johansson, P. (2013). *Bärande konstruktioner del 1*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Alén, C. (2012). *Pile foundations - Short handbook*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Björdal, C. G. (2015). Nedbrytning av trä i mark och vatten. I *Grundvattendagarna*, 2015. Göteborg, s.14-15.
- Boverket (2020). Miljöpåverkan ökar från byggsektorn. Hämtad 2020-04-27 från <https://www.boverket.se/sv/om-boverket/publicerat-av-boverket/nyheter/miljopaverkan-okar-fran-byggsektorn/>.
- Fleming, K., Weltman, A., Randolph, M., och Elson, K. (2009). *Piling Engineering* (Third Edition). New York: Taylor and Francis.
- Flodin, N. och Broms, B. (1981). *Soft Clay Engineering*. Stockholm: Kungliga tekniska högskolan.
- Göteborgs Stad (2019). Första pusselbiten till hisingsbron närmar sig. Hämtad 2020-02-21 från <http://www.mynewsdesk.com/se/goteborgsstad/pressreleases/foersta-pusselbiten-till-hisingsbron-naermar-sig-2945167>.
- Hansbo, S. (1990). *Grundläggning av byggnader och maskinfundament*. Chalmers tekniska högskola, Stockholm: Svenskt Tryck.
- Hercules grundläggning (2020a). Kostnadseffektivt och perfekt för tillfälliga lösningar. Hämtad 2020-05-05 från <https://hercules.se/grundlaggning/palning/trapalar/>.
- Hercules grundläggning (2020b). *Kostnadseffektivt och perfekt för tillfälliga lösningar*. Hämtad 2020-02-18 från <http://www-cs-faculty.stanford.edu/~uno/abcde.html>.
- Lamm W, S. (2017). Han räddar träpälarna som våra städer står på. *Epoch Times [ET]*. Hämtad från <https://www.epochtimes.se/han-raddar-trapalarna-som-vara-stader-star-pa/>.
- Lantmäteriet (2020). Landhöjning. Hämtad 2020-02-18 från <https://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/gps-geodesi-och-swepos/Referenssystem/Landhojning/>.

- Larsson, R. och Sällfors, G. (1995). *Sättningsegenskaper i lös lera på grund av geologisk avsättning och "åldring"*. Hämtad från <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1300344/FULLTEXT01.pdf>.
- Leimet (2020). Pålskarvar. Hämtad 2020-03-24 från <https://www.leimet.fi/swe/produkter/palskarvar>.
- Liljenström, C., Malmqvist, T., Erlandsson, M., Fredén, J., Adolfsson, I., Larsson, G., och Brogren, M. (2015). *Byggandets klimatpåverkan: Livscykelberäkning av klimatpåverkan och energianvändning för ett nyproducerat energieffektivt flerbostadshus i betong*. (Nr B 2217). Hämtad från Svenska Miljöinstitutets hemsida: <https://www.ivl.se/>.
- Martinsson (2020). Carbon footprint limträ. Hämtad 2020-04-24 från <https://www.martinsons.se/carbon-footprint-limtra/>.
- Miller, S. A., Horvath, A., och Monteiro, P. J. M. (2016). Readily implementable techniques can cut annual co2 emissions from the production of concrete by over 20%. Res. Lett. 11 074029.
- Ny Teknik (2015). Storstaden satsar på linbanenät för kollektivtrafik. *Ny Teknik*. Hämtad 2020-05-14 från <https://www.nyteknik.se/fordon/storstaden-satsar-pa-linbanenat-for-kollektivtrafik-6392742>.
- Olsson, C. och Holm, G. (1993). *Pålgrundläggning*. Solna: AB Svensk byggtjänst.
- Petersson, H. (1999). *Biomassafunktioner för trädskador av tall, gran och björk i Sverige*. Hämtad från Sveriges lantbruksuniversitet webbplats: slu.se.
- PFS 1980:1. *Svenskbygnorm, SBN 1980*. Stockholm.
- Prakash, S. och Sharma, H. D. (1990). *Pile foundations in engineering practice*. Toronto: John Wiley & Sons.
- Pålkommisionen (2004). *Kohesionspålar*. Hämtad från <http://www.palkommissionen.org/web/page.aspx?refid=29>.
- Pålkommisionen (2019). *Pålstatistik för Sverige 2018*. Hämtad från <http://www.palkommissionen.org/web/page.aspx?refid=73>.
- Rajapakse, R. (2016). *Pile Design and Construction Rules of Thumb*. New York: Elsevier.
- Ranjan, G. (2007). *Basic and Applied Soil Mechanics*. New Delhi: New Age International limited publishers.
- Roupé, S. (2017). Teknisk beskrivning - Järnvågen.
- SGU (2020a). Från istid till nutid. Hämtad 2020-02-18 från <https://www.sgu.se/om-geologi/jord/fran-istid-till-nutid/>.
- SGU (2020b). Jordarter 1:25 000-1:100 000. Hämtad 2020-03-03 från <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-jordarter-25-100.html>.

SGU (2020c). Landhöjning - från havsbotten till lerslätt. Hämtad 2020-02-18 från <https://www.sgu.se/om-geologi/jord/fran-istid-till-nutid/landhojning-fran-havsbotten-till-lerslatt/>.

Skoog, G. (2006). Räddning finns för rutten grund. *Göteborgs-Posten [GP]*. Hämtad från <https://www.gp.se/nyheter/sverige/r%C3%A4ddning-finns-f%C3%B6r-rutten-grund-1.1222004>.

SMHI (2017). Klimatberäkningar visar på mer extremt väder. Hämtad 2020-02-05 från <https://www.smhi.se/forskning/forskningsnyheter/nya-klimatberakningar-visar-pa-mer-extremt-vader-1.12922>.

SMHI (2020). Års- och månadsstatistik. Hämtad 2020-05-03 från <https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/manadens-vader-och-vatten-sverige/manadens-vader-i-sverige/ars-och-manadsstatistik>.

Svensk Betong (2020). Koldioxidutsläpp. Hämtad 2020-04-21 från <https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-prefab/miljo-och-hallbarhet/koldioxidutslapp>.

Svenskt Trä (2015). *Hållfasthetsklasser för limträ*. Hämtad från https://www.svenskttra.se/siteassets/5-publikationer/pdfer/hallfasthetsklasser-for_limtra.pdf.

Svenskt Trä (2020). Om limträ. Hämtad 2020-05-01 från <https://www.svenskttra.se/bygg-med-tra/om-limtra/>.

Sweco (u.å). *Linbana Göteborg, Foundation tower B*. Design report. Opublicerad.

Tehrani, M. A. och Froese, T. M. (2017). A comparative life cycle assessment of tall buildings with alternative structural systems: Wood vs. concrete. I *6th CSCE-CRC International Construction Specialty Conference*, 2017, Vancouver, Kanada, s. 19-28.

Trafikverket (2019). Geokalkyl. Hämtad 2020-04-24 från <https://www.trafikverket.se/tjanster/system-och-verktyg/Prognos--och-analysverktyg/geokalkyl/?fbclid=IwAROMIJWpsmW2ACD4PJNznJUWdkmjeopf4YDwvjJ46a07gYE9vzsA0uo2vyQ>.

Trafikverket (2019). Regler gällande transport. Hämtad 2020-03-10 från <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/vag/Transportdispens/Villkor/>.

Trafikverket (2019). Transport av odelbar last utan dispens. Hämtad 2020-05-10 från <https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/vag/Transportdispens/Transport-av-odelbar-last-utan-dispens/>.

Transportstyrelsen (2009). Allmänna råd vid långa transporter. Hämtad 2020-03-10 från https://www.transportstyrelsen.se/TSFS/TSFS_2009-62.pdf.

Träguiden (2017a). 1.2 limträ i kretsloppet. Hämtad 2020-04-24 från <https://www.traguiden.se/konstruktion/>

limtrakonstruktioner/projektering-av-limtrakonstruktioner/
limtra-som-konstruktionsmaterial1/limtra-i-kretsloppet/
limtra-i-kretsloppet/.

Träguiden (2017b). Hållfasthet. Hämtad 2020-05-03 från <https://www.traguiden.se/konstruktion/limtrakonstruktioner/fakta-om-limtra/fakta-om-limtra/egenskaper/hallfasthet/?previousState=0010>.

Träguiden (2018). Limträ som byggmaterial. Hämtad 2020-05-01 från <https://www.traguiden.se/konstruktion/limtrakonstruktioner/fakta-om-limtra/limtra-som-byggmaterial1/>.

Tyréns (2013). *Förstudie: Linbanor som alternativ kollektivtrafik i Göteborg*. Hämtad från [https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planobygg.nsf/vyFiler/Stadslinbana%20i%20G%C3%B6teborg%20%E2%80%93%20ett%20nytt%20s%C3%A4tt%20att%20%C3%A5ka%20kollektivt-F%C3%B6rstudie-Linbanor%20som%20alternativ%20kollektivtrafik%20i%20G%C3%B6teborg/\\$File/slutrappport_Forstudie_linbanor.pdf?OpenElement](https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planobygg.nsf/vyFiler/Stadslinbana%20i%20G%C3%B6teborg%20%E2%80%93%20ett%20nytt%20s%C3%A4tt%20att%20%C3%A5ka%20kollektivt-F%C3%B6rstudie-Linbanor%20som%20alternativ%20kollektivtrafik%20i%20G%C3%B6teborg/$File/slutrappport_Forstudie_linbanor.pdf?OpenElement).

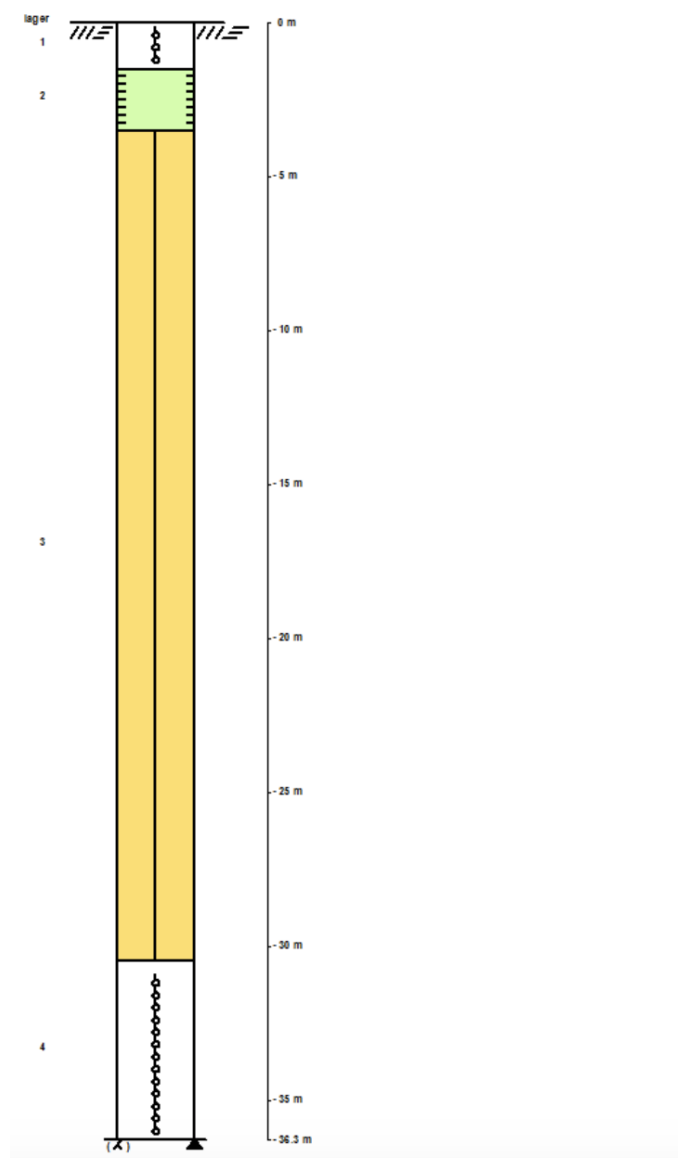
Tyréns (2019). Miljöbeskrivning till detaljplaner för linbanan. Hämtad från [https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planobygg.nsf/vyFiler/Stadslinbana%20-%20Station%20Lindholmen-Plan%20utökat%20förfarande%20-%20granskning-Miljökonsekvensbeskrivning/\\$File/MKB%20Linbanan_Granskningshandling.pdf?OpenElement](https://www5.goteborg.se/prod/fastighetskontoret/etjanst/planobygg.nsf/vyFiler/Stadslinbana%20-%20Station%20Lindholmen-Plan%20utökat%20förfarande%20-%20granskning-Miljökonsekvensbeskrivning/$File/MKB%20Linbanan_Granskningshandling.pdf?OpenElement).

A Bilagor

A.1 Borrhål Götatunneln

Id: SE980222
Avslut: mot block eller berg
Observations typ: Borring/sondering; maskindriven
Koordinater SVREF 99 TM: 6399573, 318421

nr	Quotm	Kommentar	Obs
1	0.0	1.5	lång-block (fraktionjord)
2	1.5	3.5	ull
3	3.5	33.5	heller
4	33.5	36.3	lång-block (fraktionjord)



Återgiven med tillstånd.

A.2 Intervjufrågor

Vilken/vilka skarvningsmetoder är idag vanligast förekommande vid skarvning av träpåle mot träpåle?

Kan man skarva ihop mer än två träpålar?

Kan man skarva ihop två träpålar och även ha en betongpåle över?

Hur långa är de träpålar respektive kombinationspålar som idag finns i Göteborg?

Hur stor andel utgör betongdelen av kombinationspålar?

Vad finns det för begränsningar med kombinationspålar?

Vad finns det för begränsningar med skarvning av träpålar?

Är det ekonomiskt fördelaktigt att använda träpålar som grundläggningsmetod?

Finns det andra hållbara grundläggningsmetoder som är under utveckling?

A Bilagor

FALL 1 BLOCKBROTT							
Träpålar	Beräkning	Beteckningar/källa	Anmärkningar				
Bredd (B_g)	28	[m]					
Höjd (L_g)	38	[m]					
Area (base)	1064	[m]					
Längd påle	20	[m]					
påle diameter	0,2	[m]					
max mellan	x	[m]					
antal pålar	219	antal pålar					
Max mellan pålarna	250 = pålar i höjd * pålar i bredd						
pålar i höjd	38/x						
pålar i bredd	28/x						
Ekvationen	$(38/x)*(28/x) = 250$						
x^2 =	4,858447489						
x =	2,204188624	Avstånd mellan varje påle [m]					
cu_medelvärde_20 meter [kN]	45	[kN] från "Fall 1"					
Antal pålar i höjd	17,23990388						
Antal pålar i bredd	12,70308707						
A base	1064	[m^2]					
q_bf = A_base*N_c*C_u [kN]	313920	[kN]	bottenplattas failure				
total bärförmåga	115811	[kN] (från "DENNA GÄLLER")					
Nc_1 (38 år längd, 28 år bredd)	6,556390977	(från föreläsning ACE060 Deep Foundations)					
Nc_2 (28 år längd, 38 år bredd)	7,026315789						
q_bf_1	313920	[kN]					
q_bf_2	336420	[kN]					
Limträ	Beräkning	Beteckningar/källa	Anmärkningar				
Bredd (B_g)	28	[m]					
Höjd (L_g)	38	[m]					
Area (base)	1064	[m]					
Längd påle	20	[m]					
påle diameter	0,2	[m]					
max mellan	x	[m]					
antal pålar	53	(antal)					
Max mellan pålarna	250 = pålar i höjd * pålar i bredd						
pålar i höjd	38/x						
pålar i bredd	28/x						
Ekvationen	$(38/x)*(28/x) = 250$						
x^2 =	20,0754717						
x =	4,480566002	Avstånd mellan varje påle [m]					
cu_medelvärde_20 meter [kN]	45	[kN]					
Antal pålar i höjd	8,481071361						
Antal pålar i bredd	6,249210476						
A base	1064	[m^2]					

q_bf = A_base*N_c*C_u [kN]	313920	[kN]	bottenplattas failure				
total bärförmåga	115809,7	[kN]					
Nc_1 (38 år längd, 28 år bredd)	6,556390977	(från föreläsning ACE060 Deep Foundations)					
Nc_2 (28 år längd, 38 år bredd)	7,026315789						
q_bf_1	313920	[kN]					
q_bf_2	336420	[kN]					

FALL 2 MATERIALÅTGÅNG									
	Träpälär			Limträ (homogent)			Betong		
Diameter Rot	0,27	[m]		Bredd	0,2700	[mm]	Bredd	270,0000	[mm]
Diameter spets	0,13	[m]		Höjd	0,2700	[mm]	Höjd	270,0000	[mm]
Diameter Medel	0,20	[m]		Tvårsnitt	0,0729	[mm ²]	Tvårsnitt	72900,0000	[mm ²]
Radie	0,10	[m]		area	0,0729	[m ²]	area	0,0729	[m ²]
längd	22,00	[m]		längd	27,0000	[m]	längd	48,0000	[m]
area	0,030479618	[m ²]		volym	1,9683	[m ³]	volym	3,4992	[m ³]
volym	0,670551604	[m ³]		antal pälär	254,0000	[st]	antal pälär	102,0000	[st]
antal pälär	502	[st]		total volym	499,9482	[m³]	total volym	356,9184	[m³]
total volym	336,6169053	[m³]		upptag koldioxid	1077				
upptag koldioxid	1077			total upptag	538444,2114				
total upptag	362536,407								

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2020

www.chalmers.se



CHALMERS