YRKESHÖGSKOLAN NOVIA

Grundläggningsförhållandenas inverkan på koldioxidavtrycket av nya flervåningsbyggnader

Martin Kolistaja

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Utbildning i byggnads- och samhällsteknik

Raseborg 2023

EXAMENSARBETE

Författare: Martin Kolistaja

Utbildning och ort: Utbildning i byggnads- och samhällsteknik, ingenjör (YH), Raseborg

Inriktning: Konstruktionsplanering

Handledare: Toni Wasenius, Isa Melander- Ekström

Titel: Grundläggningsförhållandenas inverkan på koldioxidavtrycket av nya flervåningsbyggnader

---

Datum: 26.3.2023 Sidantal: 69 Bilagor: 3

Abstrakt

Byggande och byggnader står för cirka en tredjedel av Finlands växthusgasutsläpp. För att Finland ska kunna uppnå sina klimatmål måste också utsläppen från byggsektorn minska. Ett sätt att minska utsläppen är att öka kunskapen om klimatsnålt byggande. I detta examensarbete behandlas grundläggningsförhållandenas inverkan på koldioxidavtrycket av nya flervåningsbyggnader. Syftet med examensarbetet är att jämföra växthusgasutsläpp mellan tre olika grundläggningsmetoder, samt ta reda på de största faktorerna gällande grundläggningsförhållandena, som påverkar grundkonstruktionernas koldioxidfotavtryck.

I detta examensarbete begränsades undersökningen till de bärande grundkonstruktionerna av ett verkligt objekt. De bärande grundkonstruktionerna simulerades att konstrueras för två olika markförhållanden. En, var markförhållandena är goda och byggnaden kan byggas på en markförlagd grundkonstruktion, och en var markförhållandena är svaga, och byggnaden måste byggas på en pålgrund. För pålgrund jämfördes dessutom grundkonstruktioner på både stålpålar och betongpålar, vilka är vanligt använda i Finland. De bärande grundkonstruktionerna dimensionerades med förenklade beräkningar och beräkningsmetoder, varefter växthusgasutsläpp för de olika grundkonstruktionerna beräknades och jämfördes.

Beräkningarna för växthusgasutsläppen resulterade i stora skillnader mellan de tre grundkonstruktionerna. Det konstaterades att valet av tomt kan ha en stor inverkan på byggnadens totala växthusgasutsläpp. Dessutom kunde man konstatera att pålar ger upphov till stora mängder växthusgasutsläpp och att en tidigt utförd och kvalitativ projektering, kan reducera växthusgasutsläppen rejält.

Språk: svenska
Nyckelord: växthusgasutsläpp, grundläggningsförhållanden, grundkonstruktioner

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Martin Kolistaja

Koulutus ja paikkakunta: Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri (AMK), Raasepori

Suuntautumisvaihtoehto: Rakennesuunnittelu

Ohjaaja(t): Toni Wasenius, Isa Melander- Ekström

Nimike: Perustamisolosuhteiden vaikutus uusien monikerroksisten rakennusten hiilijalanjälkeen

---

Päivämäärä: 26.3.2023 Sivumäärä: 69 Liitteet: 3

Tiivistelmä

Rakentaminen ja rakennukset aiheuttavat noin kolmanneksen Suomen kasvihuonekaasupäästöistä. Jotta Suomi voi saavuttaa ilmastotavoitteensa, myös rakennussektorin päästöjä on vähennettävä. Yksi tapa vähentää päästöjä on lisätä tietoisuutta ilmastoystävällisestä rakentamisesta. Tässä opinnäytetyössä käsitellään perustamisolosuhteiden vaikutus uusien monikerroksisten rakennusten hiilijalanjälkeen. Opinnäytetyön tavoitteena on vertailla kasvihuonekaasupäästöjä kolmen eri perustamistavan välillä ja selvittää tärkeimmät perustamisolosuhteisiin liittyvät tekijät, jotka vaikuttavat pohjarakenteiden hiilijalanjälkeen.

Tässä opinnäytetyössä tutkimus rajattiin koskemaan todellisen kohteen kantavia pohjarakenteita. Kantavat pohjarakenteet simuloitiin rakennettavaksi kahteen eri maaperäolosuhteeseen. Yhteen, jossa maaperäolosuhteet ovat hyvät ja rakennus voidaan rakentaa maanvaraisen pohjarakenteen varaan, ja toiseen, jossa maaperäolosuhteet ovat heikot ja rakennus on rakennettava paaluperustuksen varaan. Paaluperustusten osalta vertailtiin myös Suomessa yleisesti käytössä olevien teräspaalujen ja betonipaalujen varaan perustettavia pohjarakenteita. Kantavat pohjarakenteet mitoitettiin käyttäen yksinkertaistettuja laskelmia ja laskentamenetelmiä, minkä jälkeen eri pohjarakenteiden kasvihuonekaasupäästöt laskettiin ja niitä verrattiin keskenään.

Kasvihuonekaasupäästölaskelmien perusteella kolmen perusrakenteiden välillä oli suuria eroja. Tämän perusteella todettiin, että rakennuspaikan valinnalla voi olla merkittävä vaikutus rakennuksen kokonaiskasvihuonekaasupäästöihin. Lisäksi todettiin, että paalut aiheuttavat suuria määriä kasvihuonekaasupäästöjä ja että varhaisella ja laadullisella suunnittelulla voidaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä merkittävästi.

Kieli: ruotsi
Avainsanat: kasvihuonekaasupäästöt, perustamisolosuhteet, pohjarakenteet

BACHELOR'S THESIS

Author: Martin Kolistaja

Degree Programme: Civil and construction Engineering

Specialisation: Structural Design

Supervisor(s): Toni Wasenius, Isa Melander- Ekström

Title: The Impact of the Foundation Conditions´ on the Carbon Footprint of New Multi-storey Buildings

---

Date: 26.3.2023 Number of pages: 69 Appendices: 3

Abstract

Construction and buildings account for about one third of Finland's greenhouse gas emissions. For Finland to achieve its climate goals, emissions from the construction sector must also be reduced. One way to reduce emissions is to increase knowledge of climate-friendly construction. This thesis dealt with the impact of foundation conditions´ on the carbon footprint of new multi-storey buildings. The purpose of this thesis is to compare greenhouse gas emissions between three different foundation methods, and to find out the main factors regarding foundation conditions´ that affect the carbon footprint of foundation structures.

In this thesis, the investigation was limited to the bearing foundation structures of a real object. The bearing foundation structures were simulated to be constructed for two different ground conditions. One, where the soil conditions are good and the building can be built on a ground-based foundation structure, and one where the soil conditions are weak, and the building must be built on a pile foundation. For pile foundations, a comparison was also made between steel and concrete pile foundations, which are commonly used in Finland. The bearing foundation structures were designed using simplified calculations and calculation methods, after which the greenhouse gas emissions of the different foundation structures were calculated and compared.

The greenhouse gas emission calculations resulted in large differences between the three foundation structures. Based on this, it was concluded that the choice of plot can have a significant impact on the total greenhouse gas emissions of the building. In addition, it was concluded that piles cause large amounts of greenhouse gas emissions, and that an early and qualitative design can significantly reduce greenhouse gas emissions.

Language: Swedish
Key words: greenhouse gas emissions, foundation conditions´, foundation structures

Innehållsförteckning

1 Inledning ... 1
1.1 Uppdragsgivare ... 1
1.2 Bakgrund ... 2
1.3 Syfte och mål ... 2
1.4 Metoder och avgränsningar ... 2
2 Beräkning av koldioxidfotavtryck ... 4
2.1 Livscykelanalys (LCA) ... 5
2.2 EPD ... 9
2.3 Växthusgaser ... 10
2.3.1 Koldioxidekvivalent ... 11
3 Byggnadsplatsens grundläggningsförhållanden ... 13
3.1 Grundundersökning ... 14
3.2 Jordarter ... 16
3.3 Berggrund ... 18
3.4 Grundvatten och grundvattennivå ... 19
3.4.1 Dränering ... 20
3.4.2 Tjäle ... 21
3.5 Förorenad mark ... 21
3.6 Markstabilisering ... 22
3.6.1 Massutskiftning ... 23
3.6.2 Geosyntetiska produkter ... 24
3.7 Växthusgasutsläppsdata för olika markarbeten ... 25
4 Grundläggningsmetoder ... 28
4.1 Grundläggning på mark ... 28
4.2 Grundläggning på pålar ... 30
4.2.1 Dimensionering av slagna spetsburna pålar ... 30
4.2.2 Betongpålar ... 31
4.2.3 Stålpålar ... 33
5 Jämförelse av grundläggningsmetoder ur ett CO_2 perspektiv ... 36
5.1 Forskningsobjektet ... 36
5.2 Beräkningsmetoder ... 36
5.2.1 Begränsningar för dimensioneringen ... 38
5.3 Pelarfundamenten ... 39
5.3.1 Pelarfundamenten på betongpålar ... 41
5.3.2 Pelarfundamenten på stålpålar ... 42

5.3.3 Markförlagda pelarfundament 43
5.4 Fortlöpande fundamenten 44
5.4.1 Fortlöpande fundament på pålar 45
5.4.2 Markförlagda fortlöpande fundament 48
5.5 Fundamenten under schakten 50
5.5.1 Pålfundamenten under schakten 51
5.5.2 Markförlagda fundament under schakten 54
5.6 Källarvåningens golvplattor 56
5.7 Växthusgasutsläppsberäkningar 57
6 Resultat och slutsatser 59
7 Källor 63

Bilageförteckning

Bilaga 1. Växthusgasutsläppsberäkning för markförlagda grundkonstruktionen

Bilaga 2. Växthusgasutsläppsberäkning för grundkonstruktionen på betongpålar

Bilaga 2. Växthusgasutsläppsberäkning för grundkonstruktionen på stålpålar

Terminologi

LCA

LCA står för livscykelanalys. En LCA beaktar allt från att råvaror till byggnadsmaterialen utvinns, till att produkterna återanvänds eller bortskaffas. (Boverket,2019. b).

EPD

Förkortningen EPD kommer från det engelska begreppet för miljövarudeklaration- Environmental Product Declaration. I en miljövarudeklaration (EPD) redovisas resultatet från en livscykelanalys för en viss produkt eller produktgrupp i komprimerat format. (Boverket,2019. a).

CO_2e. eller CO_2ekv.

CO_2e. eller CO_2ekv. står för koldioxidekvivalent som är en term för att beskriva olika växthusgaser i en gemensam enhet. Koldioxidekvivalenten som ett begrepp, gör det möjligt att uttrycka flera växthusgaser som ett enda tal. För varje typ av växthusgas anger koldioxidekvivalenten, den mängd koldioxid som skulle ha motsvarande effekt på den globala uppvärmningen. (Matthew,2012)

RDE-verktyget

RDE-verktyget är ett optimerings- och dimensioneringsverktyg för pelarfundament, som Ramboll Finland utvecklat och som användes i beräkningarna för detta examensarbete.

1 Inledning

Enligt en tidigare undersökning (Rakli, 2015) är de bästa byggplatserna ofta bebyggda, vilket betyder att de som påbörjar byggprojekt tvingas använda sämre tomter än tidigare. I synnerhet i huvudstadsområdet är det vanligt att man hamnar bygga på tomter med sämre grundläggningsförhållanden. Dåliga markförhållanden ökar kostnaderna för byggprojektet, vilket kan riskera att projektet inte blir lönsamt.

Klimatpåfrestning är en aktuell fråga i samhället just nu. För att Finland ska kunna uppnå sina klimatmål måste också utsläppen från byggsektorn minska. Ett sätt att minska utsläppen är att öka kunskapen om klimatsnålt byggande inom byggnadssektorn, vilket denna undersökning förhoppningsvis bidrar till.

I detta examensarbete undersöks hur grundläggningsförhållandena påverkar koldioxidavtrycket för en kontorsbyggnad. Kontorsbyggnaden består av fem våningar med en källarvåning, och en stålstomme med WQ-balkar och samverkanspelare. Undersökningen görs genom att dimensionera grundfundamenten för tre olika grundläggningsmetoder, och sedan beräknas materialmängder och dess växthusgasutsläpp (kap 5).

1.1 Uppdragsgivare

Uppdragsgivaren till detta examensarbete är Ramboll Finland Oy. Ramboll är ett planerings- och konsultföretag som grundades i Danmark 1945. Företaget har cirka 17 000 anställda i 35 länder. Som ett internationellt företag har Ramboll starka positioner i Norden, Storbritannien, Nordamerika, Mellanöstern, Asien och Stillahavsområdet. I Finland fungerar Ramboll landsomfattande på flera olika orter med över 2 500 arbetare, samt med huvudkontoret i Esbo. (Ramboll, u.å. a). Ramboll Finlands bakgrund går tillbaka till år 1962, då företaget Viatek grundades. Från början av 1990-talet hörde Viatek till den svenska Scandiaconsult-koncernen, och efter en förening med Ramboll år 2003, blev Ramboll Finland en del av den internationella Ramboll-koncernen. (Ramboll, u.å. b).

1.2 Bakgrund

Ämnet för examensarbetet uppkom i samband med min företagsförlagda utbildning, som jag utförde vid Ramboll Finland Oy i Esbo. Ämnet valde jag dels för att klimatpåfrestningen är en aktuell fråga just nu, på grund av den nya bygglagen som träder i kraft den 1 januari 2025 och som kräver klimatdeklaration av byggnader, dels för att jag vill lära mig mera om grundkonstruktioner.

1.3 Syfte och mål

Syftet med examensarbetet är att jämföra växthusgasutsläppen mellan tre olika grundläggningsmetoder, samt ta reda på vilka de största faktorerna gällande grundläggningsförhållandena, som påverkar grundkonstruktionernas koldioxidfotavtryck. I samband med detta examensarbete håller Ramboll Finland Oy på att utveckla ett optimeringsprogram för pelarfundament, vilket kommer att användas i denna undersökning. Målet med detta examensarbete är att öka mina personliga kunskaper, samt sprida information om, grundkonstruktioner och klimatsnålt byggande.

1.4 Metoder och avgränsningar

Examensarbetet inleddes med att läsa litteratur om ämnet, varefter beräkningarna för växthusgasutsläpp från grundkonstruktionerna planerades. För att konkretisera arbetet valdes ett verkligt byggprojekt som forskningsobjekt. Med avsikt att jämföra grundläggning på betongpålar, stålpålar samt direkt på mark. Detta för att simulera skillnaderna med att bygga på en tomt med dåliga grundläggningsförhållanden, var man måste påla eller göra massutbyte, jämfört med en tomt med bra grundläggningsförhållanden, var man kan bygga på mark eller på berg. I samband med planeringen av beräkningarna för detta examensarbete konstaterades att, optimeringsprogrammet för pelarfundament som Ramboll Finland utvecklar, kunde användas och testas i examensarbetet.

För att begränsa examensarbetets innehåll fokuserades beräkningarna för växthusgasutsläpp till två olika spetsburna pålar samt på grundkonstruktioner med markförlagda fundament. Trots att byggnadens totala massa eller vikt påverkar grundfundamenten och således också fundamentens koldioxidfotavtryck, begränsades beräkningarna till endast ett forskningsobjekt (kap. 5.1). Beräkningarna för

grundfundamentens växthusgasutsläpps begränsades dessutom, att endast omfatta grundfundamentens växthusgasutsläpp i produktskede (se figur 2).

Grundkonstruktionerna och de specifika fundamenten dimensionerades med förenklade beräkningar och beräkningsmetoder. Det viktiga är att fundamenten dimensioneras och materialen till fundamenten optimeras för varje grundläggningsmetod med samma utgångspunkter, vilket möjliggör att grundläggningsmetoderna kan jämföras. Mera specifika avgränsningar för dimensioneringen av grundfundamenten och beräkningarna för växthusgasutsläppen förklaras i (kap. 5).

2 Beräkning av koldioxidfotavtryck

Byggande och byggnader orsakar cirka en tredjedel av Finlands växthusgasutsläpp. I Finland används årligen ca 7 miljarder euro på offentliga byggprojekt, vilket är ca 30 procent av alla offentliga upphandlingar. Möjligheten att påverka är stor, eftersom värdet av den offentliga upphandlingen utgör cirka 14 procent av hela EU:s bruttonationalprodukt. Det gäller att hitta nya lösningar i arbetet med att minska utsläppen inom byggsektorn. (Miljöministeriet, u.å. a)

Konkret innebär koldioxidsnålhet en förändring i hur företagen inom sektorn arbetar. Företagen måste utgå från att de själva måste planera och genomföra koldioxidsnålhet. Även om de viktigaste utsläppen genereras av vissa verksamheter, kan varje företag ge ett betydande bidrag till försörjningskedjan med låga växthusgasutsläpp och dess utveckling. (Rakennusteollisuus, 2020, a, s. 14–16)

Enligt en tidigare undersökning (Rakennusteollisuus, a, 2020, s.14–16) kan en minskning av energiutsläppen från byggnader i bruk, bidra till en totalsumma som motsvarar 3/4 av byggnadsindustrins och den byggda miljöns nuvarande koldioxidavtryck. Enligt en undersökning år 2017 fördelades utsläppen per utsläppskälla, från den byggda miljön i Finland enligt följande:

- 76 % kommer från energi i användningsskedet
- 15 % kommer från byggnadsmaterial (byggnader, transportnät, kommunalteknik).
- 7 % kommer från transporter och verksamhet på plats.
- Mindre än 2 % kommer från alla andra källor (rivning, avfall).

Byggnadsmaterialens andel, dvs. de produktbundna utsläppen av enskilda byggnaders koldioxidfotavtryck är också stor, dels för att en stor del utsläpp uppstår av tillverkningen av byggmaterial och byggprodukter. För att styra dessa produktbundna utsläpp använder man i dag olika verktyg för miljöbedömning av byggnader, som till exempel den amerikanska klassificeringsmetoden LEED och den brittiska metoden BREEAM. Genom att välja material som uppfyller kriterierna av dessa klassificeringssystem kan smartare

materialval göras, vilket motiverar produkttillverkarna att utveckla sina produkter och produktionssätt. (Miljöministeriet, u.å. b)

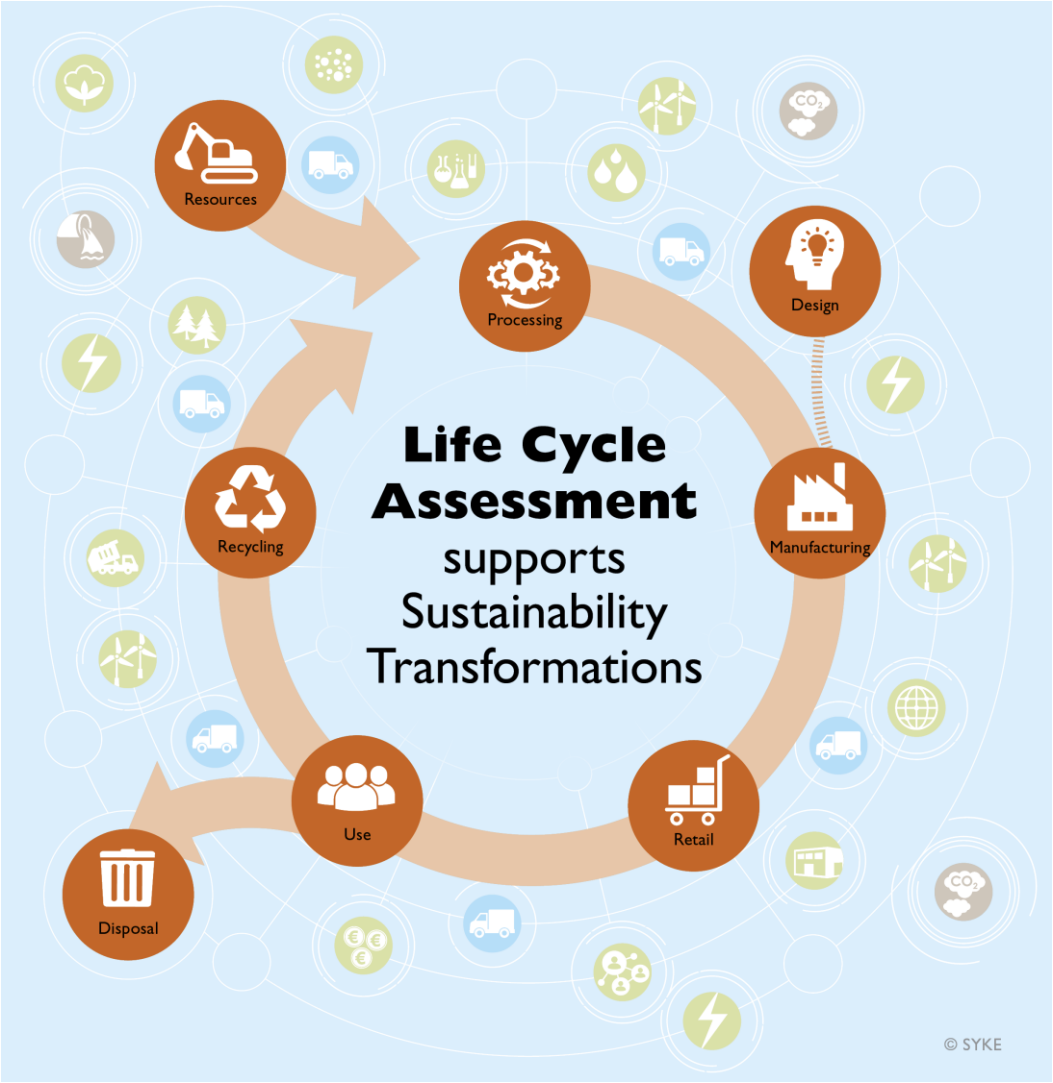
Finland har som en del av Europeiska unionen förbundit sig till klimatavtalet från Paris, som trädde i kraft den 4 november 2016. Avtalet innebär långsiktiga klimatåtgärder, så att EU kan bli klimatneutralt senast 2050. Regeringens mål är att Finland är klimatneutralt 2035 och att Finland strävar efter att bli världens första fossilfria välfärdssamhälle. (Statsrådet, u.å.)

Finlands riksdag godkände en ny bygglag den 1 mars 2023 som träder i kraft den 1 januari 2025. Den nya bygglagen ställer bland annat nya tekniska krav på byggnadernas koldioxidsnålhet och deras livscykel. Med stöd av den nya lagen kommer det att utfärdas förordningar om klimatdeklaration för byggnader, materialspecifikation för byggnader samt gränsvärden för byggnadernas koldioxidfotavtryck. (Miljöministeriet, 2023)

Materialvalen samt optimering av mängden byggnadsmaterial som används är väldigt viktigt vid planeringsskede, speciellt för bärande konstruktioner. Materialen och produkterna är svåra att ändra på när de är installerade, medan till exempel energiförbrukningen kan effektiveras under hela byggnadens livslängd. Detta är en av orsakerna varför beräkningarna för växthusgasutsläppen, i detta examensarbete koncentrerat sig på materialåtgången för de bärande grundfundamenten, och dess koldioxidfotavtryck.

2.1 Livscykelanalys (LCA)

Livscykelanalys (Life Cycle Assessment, LCA) är en ISO-standardiserad, väletablerad analysmetod som samtidigt kan fastställa flera miljöeffekter under en produkts eller tjänsts hela livscykel. Livscykeln för en produkt eller tjänst kan vara mycket komplex, börjande från utvinning av råmaterial till bearbetning och produktion, från handel till användare och slutligen till återvinning eller bortskaffande av materialen (se figur 1). I varje livcykelskede finns det olika faktorer att ta hänsyn till, till exempel energi- och vattenförbrukning, transporter och datanätverk. Alla dessa faktorer beaktas i en livscykelanalys. (Syke,2022, a)



Figur 1. De huvudsakliga livscykelskedena av en LCA. (Syke, 2022).

Europastandarden SFS-EN-15 978 specificerar beräkningsmetoden och regler, baserad på livscykelanalys (LCA) och annan kvantifierad miljöinformation, för att bedöma en byggnads miljöprestanda, och ger metoder för rapportering och kommunikation av resultatet från bedömningen. (SFS-EN-15 978:2011, s.7).

Enligt Boverket (2019. c) kan byggnader och byggnadsutformningar med samma funktion jämföras och utvärderas med hjälp av en LCA. För att jämföra byggnader måste LCA:n baseras på samma metodval, omfattning, och datakvalitet. Dessutom finns det flera miljöpåverkanskategorier eller miljöindikatorer, en LCA kan analysera. En LCA begränsas ofta till indikatorn global uppvärmning eftersom den anses vara det största miljöhotet, men i LCA-standarder för byggnader som används i Europa ingår även följande miljöpåverkanskategorier:

- Global uppvärmnings potential (GWP – global warming potential)
- Försurning (AP – acidification potential)
- Övergödning (EP – eutrophication potential)
- Utarmning av icke-fossila resurser (ADPe - abiotic depletion potential – elements)
- Utarmning av fossila resurser (ADPf – abiotic depletion potential – fossil fuels)
- Ozonnedbrytning (ODP – ozone depletion potential)
- Marknära ozon (POCP – photochemical oxidant creation potential).

I en LCA för en byggnad redogörs bland annat i vilket skede av byggnadens livscykel miljöpåverkan är som störst, eller vilka byggnads produkter orsakar största miljöpåverkan. Med hjälp av en LCA kan byggnader projekteras och byggas på ett miljövänligare sätt. Uppgörande av en LCA i tidigt skede vid projekteringsfasen möjliggör att, projekteraren lättare kan påverka och föreslå miljöförbättringar på konstruktionslösningar och materialval. (Boverket,2019. b).

En LCA för en byggnad delas in i tre huvudsakliga skeden; byggskedet, användningsskedet och slutskede. Dessutom delas dessa skeden in i informationsmoduler, som beskriver de processer som uppstår under de olika livscykelskedena. Indelningen görs för att lättare kunna tolka resultaten, samt redovisa resultaten på ett likformigt sätt. Informationsmodulerna och livscykelskedena i en LCA benämns med bokstavsbeteckningar (se figur 2). För att förtydliga delas byggskedet in i två delar, produktskede (A1-A3) och byggproduktionsskede (A4-A5). (Boverket,2019. b).

A1–5 Byggskede		
A1–3 Produktskede	A1	Råvaruförsörjning
	A2	Transport
	A3	Tillverkning
A4–5 Byggproduktionsskede	A4	Transport
	A5	Bygg- och installationsprocess
B1–7 Användningsskede	B1	Användning
	B2	Underhåll
	B3	Reparation
	B4	Utbyte
	B5	Ombyggnad
	B6	Driftsenergi
	B7	Driftens vattenanvändning
C1–4 Slutskede	C1	Demontering, rivning
	C2	Transport
	C3	Restproduktsbehandling
	C4	Bortskaffning
D Fördelar och belastningar utanför systemgränsen		

Figur 2. De olika skedena och informationsmodellerna i en LCA. (Boverket, 2019. b).

Systemgränsen bestämmer vilka processer som beaktas för bedömningsobjektet. För en ny byggnad ska systemgränsen omfatta byggnadens hela livscykel (A1-C4+D). För en befintligbyggnad, eller en del av den, ska systemgränsen omfatta alla stadier som representerar den återstående livslängden och byggnadens slutskede. Om bedömningen är begränsad till en del av en byggnad eller till ett monterat system (del av byggnadsverk), eller till en del av en livscykel, eller om några relevanta effekter eller aspekter inte behandlas, ska detta dokumenteras och rapporteras i samband med resultatredovisningen. (SFS-EN-15 978:2011, s.16,19).

Eftersom beräkningarna för växthusgasutsläppen i detta examensarbete begränsas till produktskedet för endast grundkonstruktionerna av forskningsobjektet, tas inte byggnadens hela livscykel i beaktande. På grund av detta används termen växthusgasutsläppsberäkningar och inte livscykelanalys. Nedanstående stycke förklarar hur gränsdragningen för produktskedets utsläpp skall göras enligt standard SFS-EN 15798.

Gränserna för produktskede, de vill säga modulerna A1-A3 specificeras som ”cradle to gate” direkt översatt ”från vaggan till port”. Modulerna A1- A3 omfattar processerna från att råmaterialen utbryts till att produkten står vid fabriksdörren. Miljöinformation för produktskedet (A1-A3) definieras i produkternas EPD: er. Om en specifik eller representativ EPD enligt kraven i standarden EN 15804 finns tillgänglig för produkten som används i byggnaden, får inga ändringar göras i informationsmodulen för produktskedet (A1 till A3). (SFS-EN-15978:2011, s.33,41).

Enligt (SFS-EN-15 978:2011, s.33) omfattar Byggproduktionsskedet (A4-A5) perioden från att byggprodukterna transporteras till byggnadsplatsen till det praktiska slutförandet av byggnadsarbetet. Modul A4 omfattar transport av produkter, material, tjänster och utrustning till och från byggarbetsplatsen medan modul A5 omfattar bygg- och installationsprocessen, alltså byggande på plats, byggande utanför byggarbetsplatsen, montering av prefabricerade produkter eller en kombination av dessa. Till Byggproduktionsskedet kan följande inkluderas om det är betydande och relevant:

- Markarbeten
- Transport av material, produkter, avfall och utrustning inom byggplatsen
- Byggprocessen
- Installation av produkter, inklusive kompletterande produkter som inte räknas in i produkternas miljövarudeklarationer

2.2 EPD

Förkortningen EPD kommer från det engelska begreppet för miljövarudeklaration- Environmental Product Declaration. I en miljövarudeklaration (EPD) redovisas resultatet från en livscykelanalys för en viss produkt eller produktgrupp i komprimerat format. När en tillverkare gör en EPD utgår man från ett antal produkttypsspecifika kriterier inför livscykelanalysen av produkten. Dessa kriterier är bland annat detaljerade riktlinjer om avgränsning, metodval, dataunderlag för en vald produktgrupp. En produktgrupp kan vara till exempel dörrar, byggskivor eller isoleringsmaterial. De produktspecifika kraven tas vanligen fram i samråd med branschorganisationerna och benämns PCR. Förkortningen PCR kommer från det engelska begreppet- Product Category Rules. (Boverket,2019. a).

Informationen i en EPD kan presenteras i enlighet med standarderna ISO 14025, TS/14 027 och 14 040. För byggnads- och anläggningssektorn skall tillverkarnas eller branschorganisationernas EPD: er uppfylla standarderna ISO 21930 och EN 15804. Dessutom bör EPD: er verifieras av en utomstående organisation. På så sätt säkerställs att uppgifterna i deklarationerna är jämförbara (The international EPD system, u.å.).

I Finland publiceras EPD:er av till exempel Rakennustietosäätiö. Rakennustietosäätiö upprätthåller en databas för EPD:er och har publicerat EPD: er sedan 2016. Andra publikationsoperatörer som ofta används av produkttillverkare i Finland är The International EPD System, som har starka rötter i Sverige. Verifieringen ska utföras av ett organ som godkänts som verifierare av den som ansvarar för publiceringen av EPD:n. Till exempel kan Rakennustietosäätiös EPD:er endast verifieras av verifieraren som godkänts av Rakennustietosäätiö. När EPD:n har verifierats är den giltig i fem år från och med datumet då EPD:n har beviljats. (Lindqvist, 2022. s.31-32).

För att ta reda på klimatpåverkan för en enskild byggnad genomförs en beräkning på materialåtgången för projektet, och med hjälp av produktspecifika EPD: er kan en totalsumma för de växthusgasutsläpp som produktvalen medfört beräknas. En av faktorerna som redovisas i en EPD, är klimatpåverkan som produkten bidragit med, med andra ord de växthusgasutsläpp som produkten orsakar i de olika skedena i produktens livscykel. Produktens eller produktgruppens klimatpåverkan redovisas i en så kallad ”declared unit” eller ”functional unit” som exempelvis kan vara, kilogram koldioxidekvivalent per kvadratmeter ($kgCO_2e/m^2$) eller per kg ($kgCO_2e/kg$). (Saint-Gobain, 2020)

2.3 Växthusgaser

De vanligaste långlivade växthusgaserna som bidrar till den globala uppvärmningen är koldioxid (CO_2), metan (CH_4) och dikväveoxid (även kallad lustgas, N_2O), vars koncentrationer ökar på grund av mänsklig verksamhet. Metan sipprar exempelvis ut från soptippar, och boskapsdjur rapar upp gasen när de idisslar. Lustgas frigörs framför allt från kvävegödslad åkermark. Både metan och lustgas når också ut i luften från naturliga källor såsom sumpmarker och skogsjordar. (Naturvårdsverket, u.å.)

Koldioxid (CO_2) är en färglös och luktfri gas som bildas bland annat vid förbränning av kolhaltiga bränslen som olja, naturgas, eller biobränsle. Molekylformeln CO_2 står för den kemiska föreningen mellan kol(C) och syre(O). Koldioxidhalten i vår atmosfär ligger runt 400ppm i frisk utomhusluft, medan i miljöer med höga utsläpp som till exempel i storstäder eller industriområden, kan koldioxidhalten uppgå till 800ppm. (Nordtec, u.å.)

Det har uppkommit nya växthusgaser som människan har producerat, växthusgaser som inte fanns förrän människan börja tillverka dem för några decennier sen. Hit hör framför allt ett antal gaser som innehåller fluor, de så kallade freonerna. På 1980-talet stod det klart att de bryter ned det ozonskikt som skyddar oss från solens skadliga ultravioletta strålning, vilket också förklarar varför freonernas användning är reglerat idag. En annan närbesläktad grupp av ämnen till freoner, är fluorkolväten eller (HFC). Fluorkolväten används nuförtiden i stället för freoner. Liksom koldioxiden är freoner och andra fluorhaltiga växthusgaser långlivade i luften. De flesta överlever där åtminstone något hundratal år innan de bryts ned, men för några kan livslängden räknas i tiotusentals år. (Naturvårdsverket, u.å.)

Eftersom det finns väldigt många olika växthusgaser, med olika effekter på miljön eller som faller i olika miljöpåverkanskategorier, har man förenklat enhetshanteringen med att använda koldioxidekvivalenter som förklaras i nästa kapitel.

2.3.1 Koldioxidekvivalent

Koldioxidekvivalent som ofta förkortas CO_2e. eller CO_2ekv. är en term för att beskriva olika växthusgaser i en gemensam enhet. För varje typ av växthusgas anger CO_2e alltså koldioxidekvivalenten, den mängd koldioxid som skulle ha motsvarande effekt på den globala uppvärmningen. Koldioxidekvivalenten är ett mycket användbart begrepp av flera skäl, det gör det möjligt att uttrycka flera växthusgaser som ett enda tal, vilket gör det lättare att jämföra olika växthusgaser på samma gång, i samma beräkning. (Matthew,2012)

Under rubriken 2.1 LCA, nämns de olika indikatorerna en livscykelanalys kan analysera. Specifikt indikatorn klimatpåverkan, även kallad Global Warming Potential (GWP), anges som koldioxidekvivalent (CO_2e.).

Tabell 1. Växthusgaser och deras globala uppvärmnings potential.

Greenhouse Gas		Global Warming Potential (GWP)
1.	Carbon dioxide (CO_2)	1
2.	Methane (CH_4)	25
3.	Nitrous oxide(N_2O)	298
4.	Hydrofluorocarbons (HFCs)	124 – 14,800
5.	Perfluorocarbons (PFCs)	7,390 – 12,200
6.	Sulfur hexafluoride (SF_6)	22,800
7.	Nitrogen trifluoride (NF_3)[3]	17,200

(Matthew,2012).

Olika växthusgaser finns kvar i atmosfären under olika lång tid, och de absorberar också olika mycket värme. Den globala uppvärmningspotentialen som kommer från det engelska begreppet Global Warming Potential (GWP), anger hur mycket uppvärmning den specifika gasen orsakar under en viss tidsperiod, normalt 100 år. GWP är ett index, där koldioxid har indexvärdet 1, och GWP för alla andra växthusgaser är talet gånger mer uppvärmning de orsakar jämfört med koldioxid (se tabell 1). Exempelvis 1kg av metan orsakar 25 gånger mer uppvärmning under en 100 årsperiod jämfört med 1kg koldioxid. (Matthew,2012)

3 Byggnadsplatsens grundläggningsförhållanden

I detta kapitel behandlas grundläggande information om geoteknik och hur byggnadsplatsens grundläggningsförhållanden påverkar projektering och byggande.

Vid val av byggnadsplatsen bör man sträva efter att hitta en byggnadsplats med lämplig terräng och gynnsamma markförhållanden, samtidigt som man tar hänsyn till projektets totala ekonomi. För att kunna göra detta och bland annat försäkra sig om att markens stabilitet är tillräcklig på hela byggnadens område, måste en grundundersökning utföras, vilket redovisas i (kap.3.1). Grundläggningshöjden bör i allmänhet baseras på terrängens naturliga höjd, med beaktande av kraven på dränering och torkning. Grundläggningshöjden påverkar mycket på grävnings och återfyllningsarbetet. (RIL-121-2004, 2004, s.69–70)

Ibland är det möjligt att hitta den optimala grundläggningslösningen för en byggnad genom att variera dess placering på tomten eller dess form samt genom användning av källarutrymme. Man skall undvika användning av olika grundläggningsmetoder under samma byggnad, eftersom det då är svårt att hantera de sättnings skillnader olika grundläggningsmetoder kan orsaka. Optimering av grundläggningslösning kan leda till mycket stora besparingar i byggkostnaderna. Däremot för en på plats låst projekterad byggnad, finns det ofta få alternativ för grundläggningslösningar och små möjligheter att påverka kostnaderna. (Jääskeläinen, 2016. s.47)

Grundkonstruktionerna bör utformas med hänsyn till grunden för närliggande byggnader och dess grundkonstruktioner. Dessutom bör framtida byggnationer, schaktning och fyllningsarbeten samt eventuella förändringar i grundvattennivåerna tas i beaktande. Om en ny byggnad måste byggas djupare än en befintlig grannbyggnad, ska grunderna för grannbyggnaden skyddas till ett tillräckligt djup eller på annat sätt förstärkas så, att grannbyggnaden inte skadas. Utöver de normala inspektionerna ska eventuella sättningar och förskjutningar av grannbyggnaden övervakas under grundläggningsarbetena. Byggnadens grundläggning speciellt nära tomtgränsen till grannfastigheten ska konstrueras på ett sådant sätt, att den inte hindrar ett senare byggande av en grannbyggnad. Lätta små byggnader som garage och uthus, får dock etableras utan att ta hänsyn till den framtida grannbyggnadens grundläggningssätt. (RIL-121-2004, 2004, s.71)

3.1 Grundundersökning

Syftet med grundundersökningen är att fastställa byggnadsplatsens markförhållanden. En grundundersökning skall utföras så, att byggnadens grundläggning kan planeras på ett tillförlitligt sätt. Detta kräver kännedom om platsens jordlager och deras kvalitet, bergsytans kvalitet och grundvattennivån. Dessutom bör man få en uppfattning om markens vattengenomsläpplighet och frostbeständighet. Det är även viktigt att ta reda på om det finns ett behov av radonreducerande åtgärder, eller om det finns anledning att misstänka förorenad mark på byggnadsplatsen. (Jääskeläinen,2014. s.240–241)

Resultaten från en grundundersökning presenteras i form av grundundersökningsrapport som innehåller tolkningar av de utförda undersökningarnas resultat samt en modell som presenterar markytans konturer, grundvattennivå, jordlagrens hållfasthet samt hårda jordlager eller bergsytans konturer och nivåer. På basen av grundundersökningens uppgifter, bör olika beräkningar kunna utföras, som är till exempel markens lastkapacitet, sättningsberäkningar, jordtrycksberäkningar och så vidare. (Jääskeläinen, 2014. s.240–241)

Enligt (Jääskeläinen, 2014. s.242–243) erhålls informationen om markgrunden genom olika undersökningsmetoder, varav vanligt använda metoder i Finland är följande:

- Testgropar
- Viktsondering
- Hejarsondering
- Sondering med borrmaskin
- Vingborrning
- Trycksondering
- Jordprov

På tomter där bergytan ligger nära marknivån, kan en grävmaskin frilägga en tillräckligt stor yta berg, så att slutsatser kan göras med endast denna åtgärd. På tomter där bergytan ligger djupare ner, måste maskinella sonderingsmetoder användas. En maskinell metod behövs för att kunna göra ett tillräckligt bra och djupt borrhål i markgrunden och vid behov i berget,

för att på ett tillräckligt pålitligt sätt kunna dra slutsatser om bland annat markgrundens egenskaper och bergytans nivå. (Jääskeläinen, 2014. s.242–243)

Viktsondering är den vanligaste sonderingsmetoden i Finland. Med metoden får man grundinformation i jordarter från mjuklera till halvfast morän. Om jordarter förklaras mera i följande kapitel (kap.3.2). Viktsondering görs oftast med en larvbandsförsedd borrningsvagn. En förborrning görs alltid före den egentliga sonderingen, för att avlägsna faktorer som kan orsaka ett felaktigt resultat. Sonderingen börjar med att mäta om borren sjunker med endast tryckkraft. Principen är att man hela tiden mäter den minsta vikten som orsakar borren att sjunka med en viktserie på 5-15-25-50-75-100 kilogram. Om borren sjunker med en hastighet högre än 50 mm/s bör vikten minskas. (Jääskeläinen, 2014. s.246–249)

När jordborren är belastad med den största vikten och inte längre sjunker, börjar man borra. Borrningen mäts och dokumenteras i halvvarv, genom att räkna hur många halvvarv borren måste snurra för varje 20 cm neråt i jorden. När jordborren inte längre sjunker med borrning applicerar man slagkraft på jordborren. När jordborren inte längre sjunker med slagning kan sonderingen avslutas. Av dokumentationen av alla dessa steg kan ett diagram ritas, som beskriver markens bärförmåga i olika djup. (Jääskeläinen, 2014. s.246–249)

När det gäller tomter där grundläggning på pålar troligen är det lönsammaste alternativet, är det nödvändigt att kunna bedöma pålarnas djup samt risk för vältning. Det är även viktigt att ta i beaktande risken att pålens nedre enda kan glida, och om det finns stora stenblock i marken som kan förskjuta pålen eller till och med knäcka pålen vid applicering. Slagpålarnas längder kan uppskattas utifrån resultaten av en viktsondering, men hejarsondering ger pålitligare resultat, eftersom hejarsonderingsmaskinen fungerar som en liten pålningsmaskin. (Jääskeläinen, 2014. s.241–243)

Vid hejarsondering släpps en hejare med en viss vikt, alltid från samma höjd mot ett fäste som är fäst i sonderingsstången. Samma fysiska arbete utförs alltså vid varje slag och detta arbete förvandlas till den brytande kraften i marken under spetsen. Spetsen i stångens nedre ände är också alltid ett standardiserat stycke, med en tvärsnittsarea på 16 kvadratcentimeter (cm^2). Genom att mäta det antal slag som krävs för en viss sjunkning, kan man få en uppfattning om jordens hållfasthetsegenskaper och jämföra de olika jordlagren med varandra. Man börjar med att trycka ner stången till ett jordlager var slag

behövs, varefter man räknar antalet slag för att få stången att sjunka 20 centimeter (cm). Stången bör roteras efter varje slagserie för att korrigera eller centrera stängerna och minska risken för att stängerna skall bli snedvridna. (Jääskeläinen, 2014. s.253–254)

Om pålar används ska grundundersökningen dessutom visa, att det inte finns någon mjuk jord omedelbart under fundamentets jordlager, som kan leda till oacceptabla stansbrott eller sättningar. Dessutom bör vibrationskänsliga konstruktioner och utrustning som finns i närheten av byggnadsplatsen, identifieras senast vid planeringsskedet av pålningsarbete. Innehållet och antalet geotekniska undersökningar som görs inför ett pålningsarbete, måste anpassas till det specifika undersökningsobjektet och den geotekniska klassen för projektet. Objekt delas in i geotekniska klasser enligt följande, enkla objekt (GL1), krävande objekt (GL2) och väldigt krävande objekt (GL3). (RIL 254–2016, 2016, s. 35–39).

Vid situationer där man behöver säker information om var bergytan ligger samt vilken kvalitet bergytan har, används sondering med borrmaskin. Denna metod passar även för jordar som innehåller stora stenblock. När det gäller andra sonderingsmetoder finns det alltid en liten osäkerhet, eftersom de inte alltid slipper ner till bergytan på grund av till exempel stora stenblock. Situationer där något av jordlagren nära markytan är väldigt hårda eller innehåller stora mängder stenblock, är det nästan omöjligt att undersöka de undre jordlagren utan sondering med borrmaskin. Dessutom krävs en sondering med borrmaskin vid platser, var det skall byggas djupa konstruktioner i berget, eftersom det kräver informationen om bergets kvalitet. Dock finns det nuförtiden multifunktionella sonderingsmaskiner, som gör det möjligt att utföra olika undersökningar på samma gång. (Jääskeläinen, 2014. s.257)

3.2 Jordarter

Vid geoteknisk jordklassificering delas jordarterna in i jordgrupper på grund av geologiskt ursprung, humushalt och artinnehåll eller kornsammansättning. Jordgrupperna är organiska, finkorniga, grovkorniga och moränjordar. Marken kan dessutom anses vara naturlig jord, utfyllnads jord, utbytt jord (massutbyte) och förstärkt jord. Vid byggande på mark ska de geotekniska jordlagren och deras geotekniska dimensioneringsvärden bestämmas med hjälp av allmänna grundundersökningsmetoder, eller en

undersökningsmetod som är lämplig för den aktuella grundläggnings- eller förstärkningsmetoden, innan projektering och byggande. (RIL-121-2004, 2004, s.19, 67)

Organiska jordar består av organiskt material eller innehåller mer än 6 % organiskt material. Organiska jordarter är torv och (ler)gyttja. Torv bildas av växtrester med olika grad av nedbrytning. Humushalten i lergyttja är över 6 procent, men den består huvudsakligen av mineralämnen. Om humushalten är över 20 viktprocent kallas jordtypen endast gyttja. Organiska jordars jordmaterial komprimeras och flyter under belastning, vilket leder till kontinuerlig och ibland långvarig sättning. Därför är det inte lämpligt att bygga på organiska jordar. Oftast fås endast tillfälliga eller sekundära konstruktioner byggas på organiska och mjuka finkorniga jordar. (RIL-121-2004, 2004, s.19–20, 67)

Sorterade jordar har huvudsakligen tvättats och sorterats av vatten, med en eller högst två huvud arter som dominerande arter. Finkorniga jordar innehåller mer än 50 procent finkorn, mindre än 6 viktprocent humus och är sorterade. Finkorn är korn med en diameter mindre än 0,06 millimeter. Finkorniga jordlager har mycket dålig vattengenomsläpplighet och är utsatta för långvarig kompression under belastning, så byggnader och konstruktioner i dessa områden grundläggs vanligtvis på pålar. (RIL-121-2004, 2004, s.19, 67)

För finkorniga jordar är sättningsberäkningar ett grundläggande mått på dimensioneringen. Sättningsberäkningen bör utgå från att grundvattennivån med tiden kommer att sjunka med en meter, därför att det lätt sker att grundvattennivån sjunker vid tätortsbebyggelse, och finkorniga jordar är känsliga för sättningar på grund av att grundvattennivån sänks. (Jääskeläinen, 2016. s.40)

Moränjordarterna är osorterade och innehåller flera olika arter. Osorterade jordar är inte sköljda med vatten eller sorterade på ett sådant sätt att en art är klart dominerande. Morän är en term som används för att beskriva den osorterade jord som uppkommit genom glaciärverkan. En naturlig jordmån kallas morän om den innehåller minst 5 procent grus och minst 5 procent finkorn. Moränlager och grovkorniga jordlager är vanligtvis mycket bärande och kan därför användas som grund för markförlagda fundament, förutsatt att de inte utsätts för onormala belastningar, eller att ett mindre bärande jordlager ligger under det grovkorniga jordlagret. (RIL-121-2004, 2004, s.19–20, 67)

Mineraljordarterna bestäms på grund av hur mycket stenmaterial med en diameter på över 64 millimeter arten innehåller. Antalet stenar och block påverkar inte namnet på jordarten, men mängden stenar och block ska vid behov anges separat vid beskrivningen av jordarten eller jordlagret. Mineraljordarter, med undantag för lera, bestäms med d_{50}-metoden. Jordtypen namnges efter huvud sorten, där kornstorleken som motsvarar 50 procent genomsläpplighet i jordens kornstorlekskurva finns. En lera definieras som en jord som innehåller över 30 viktprocent partiklar mindre en 0,002 millimeter, medan lerorna benämns eller specificeras utifrån mängden lervarianter. (RIL-121-2004, 2004, s.19–20)

3.3 Berggrund

Berggrundens kvalitet bestäms huvudsakligen på basen av bergets sprickbildning. Om det finns en svaghetszon i berget eller om bergets sprickbildning är ogynnsam för grundkonstruktionernas funktion, måste dess effekter undersökas och vid behov måste bergförstärkning planeras. Fast den finska berggrunden normalt är sprickig är den ofta tillräckligt stark för att man skall kunna bygga på den. I Finland finns det sällsynta sedimentära bergarter som är mindre motståndskraftiga, men även de är vanligtvis tillräckligt hållfasta för att grundlägga på dem. (RIL-121-2004, 2004, s.67,69)

Vid sprängning bredvid en byggnad eller en konstruktions grundfundament under grundläggningsnivån, ska en sprängnings- och hållfasthetsplan av berget utföras. Som tumregel brukar man jämna ut eller gradera grundläggningsnivån genom sprängning, om bergets lutning på grundläggningsnivån är mer än 15 grader. Detta beror dock mycket på bergets naturliga form, om bergytan under fundamentet har en form som förhindrar glidning kan man låta bli att jämna ut den. Dessutom kan glidning förhindras genom att förankra grunden eller grundkonstruktionen i berget med till exempel bergbultar. (RIL-121-2004, 2004, s.68–69)

För grundläggning på krossad berggrund ska sprängningen eller stenbrytningen sträcka sig minst 1 meter under grundläggningsnivån. Stenblock med en diameter på mer än 300 millimeter på ytan av den krossade zonen ska krossas eller avlägsnas. Efter sprängningen skall ytan av sprängstens lagret kilas med grov krossad sten och komprimeras med effektiv utrustning. Grundläggning på krossat och komprimerat berg behandlas som grundläggning

på mycket bärande mark. Däremot om berget är helt vittrat behandlas det vanligtvis som kompakt morän vid projektering och dimensionering. (RIL-121-2004, 2004, s.68–69)

3.4 Grundvatten och grundvattennivå

Grundvattnet är en av Finlands naturliga rikedomar, därför är våra bästa grundvattenresurser strikt övervakade och skyddade. Det strömmande grundvattnet i marken är svalare, och renare än ytvattnet. Bakterier dör i vatten som strömmat och filtrerats tillräckligt länge i marken. I genomsnitt absorberas ca 20 % av regnvattnet i grundvattnet. I grovkorniga jordar kan detta vara till och med mellan 30 % och 80 %. Träsk absorberar mycket vatten i marken, men å andra sidan avdunstar de så mycket vatten att endast cirka 30 % absorberas till grundvattnet. Moränjordar absorberar endast 10–20 %av regnvattnet, medan ler- och siltjordar absorberar knappt alls. (Jääskeläinen, 2014. s.42–44)

Avståndet från grundvattenytan till markytan är ofta 1–3 meter, men på vattengenomsläppliga åser kan avståndet vara tiotals meter. Höjden på grundvattennivån kan variera med flera meter under olika årstider. Vanligtvis på våren när snön har smält brukar grundvattennivån vara hög medan den under sommaren sjunker, för att sedan stiga igen under höstregnen. När frosten tränger sig ner i marken börjar grundvattennivåerna sjunka, som fortsätter tills snösmältningen återigen höjer vattennivån. Av denna orsak skulle det vara idealiskt om grundvattenobservationer på byggnadsplatser kunde göras under minst ett års tid innan projektet inleds, vilket tyvärr ofta är omöjligt på grund av projektets tidtabell. Information om grundvattennivån är viktig för varje byggprojekt, eftersom den bestämmer i stor utsträckning grundlösningarna och arbetsmetoderna för projektet. Vid geotekniska beräkningar spelar grundvattennivåns läge också en stor betydelse. Brist på grundvattendata har orsakat många problem och skador på byggarbetsplatser. (Jääskeläinen, 2014. s.280–281)

På jämna små tomter kan det räcka med ett enda observationsrör. På något större projekt används ofta tre eller fler rör för att också få reda på grundvattenflödets riktning. Observationsrörets nedre ända ska sträcka sig in i det vattenledandeskiktet och ha en perforerad sektion. Hålet ska vara väl förslutet på markytan för att förhindra att ytvatten tränger sig in i hålet. Den övre ändan av röret bör sticka ut ungefär en meter över marken, så att den är lätt att hitta på vintern och inte kan skadas av misstag. Man kan säkerställa

att observationsrörets funktion genom att turvis hälla vatten i röret och pumpa ut det med en sugpump. Om detta resulterar i att röret sväljer vatten eller att vattnet sugs ut ur det av sugpumpen är det ett gott tecken på att observationsröret fungerar tillförlitligt. Efter installationen görs flera mätningar tätt på varandra för att ta reda på den nivån grundvattnet kommer att sätta sig till. När nivån har stabiliserats görs en första avläsning. Därefter upprättas en plan för att fastställa när ytterligare mätningar ska göras. (Jääskeläinen, 2014. s.280–281)

Man bör ta i beaktande att grundläggningsarbeten som kan orsaka en sänkning av grundvattennivån inte får genomföras utan grundlig planering av grundvattenhantering. Vid planering av utrymmen som ligger under grundvattennivån eller ledningsdiken för kommunalteknik, måste miljökonsekvenserna bedömas. Innan grundläggningsarbetena påbörjas ska åtgärder för att förhindra skador överenskommas med de berörda parterna. Riskerna med sänkta grundvattennivåer kan orsaka till exempel sättningar av finkorniga jordlager och stödkonstruktioner, ökade pål-laster på pålkonstruktioner och skador på vegetationen. (RIL-121-2004, 2004, s.70)

3.4.1 Dränering

Vatten kan röra sig genom jordens porer genom kapillärverkan. I horisontellt kapillärflöde är vattnets hastighet och färdsträcka betydligt större än i vertikalt kapillärflöde. Kapillariteten hos det material som används i dräneringsskikten som är i kontakt med grundkonstruktionerna, måste vara tillräckligt låg för att förhindra den horisontella och vertikala kapillära överföringen av vatten från marken till grundkonstruktionerna. (RIL-121-2004, 2004, s.35)

Dräneringsrör skall alltid omringas med minst 100 millimeter dräneringsgrus åt alla håll, med undantag på dräneringsrörets övre sida, var det skall vara minst 200 millimeter dräneringsgrus. Täckningsdjupet skall dock vara högre speciellt om marken ovan kommer att hållas fri från snö. Dessutom bör dräneringsrörets lutning vara minst 0,5 procent, vilket på längre sträckor påverkar täckningsdjupet. Återfyllningen, alltså dräneringsgruset kan skiljas från jorden med ett lager fiberduk eller filtersand. Grundregel är att dräneringsröret ska vara, under fundamentets undersida och minst 0,4 meter under undersidan av den intilliggande eller överliggande golvkonstruktionen. Detta är dock inte alltid möjligt om avståndet till utsläppspunkten är lång eller om grundläggningsnivån är djup. I detta fall kan

dräneringsröret placeras intill grunden eller grundfundamentet, men på ett sådant djup att fukt inte kan stiga kapillärt till övre delen av grundmuren eller fundamentet. (RIL-132-2000, 2000, s.97–99)

3.4.2 Tjäle

Tjäle uppstår då vattnet i marken fryser och expanderar, vilket kan orsaka enorma krafter i marken som kan skada bland annat grundkonstruktioner. Tjälen eller vattnets expansion, beror på vattenhalten och den kapillära stigkraften i jorden som är vanligtvis hög i siltjordar, medan i grovkorniga jordar är kapillärsugningen liten. Grundkonstruktioner bör byggas och planeras för att uppnå ett tillräckligt skydd mot tjäle. Skador som orsakas av tjälen kan förhindras med att grundlägga tillräckligt djupt ner i marken eller använda sig av tjälisolering, dock kan man också till ett tillräckligt djup byta ut jordenmaterialet till ett icke tjälfarligt jordmaterial. (Taloon, u.å.)

Till lika med grundundersökningen skall tillräckligt med grundläggande uppgifter om markens tjälfarlighet fås fram, för att möjliggöra planering av åtgärder för att förhindra eventuella negativa effekter på grund av tjälen. Jordarnas tjälfarlighet kan uppskattas med hjälp av siktkurvor, men en mer tillförlitlig uppskattning kan erhållas genom kapillär och tjälfarlighetstester i laboratorier samt genom observationer av tjällyftningar på fält. (RIL-121-2004, 2004, s.35).

Enligt (Jääskeläinen, 2016. s.148–149) skall proverna tas på olika djup från markytan till tjälens inträngningsdjup. Bedömning av tjälfarligheten kan även göras till exempel genom att mäta den kapillära stigningen. I jordar med låg tjälfarlighet är den kapillära stigningen mindre än en meter. Dock byggs de allra flesta grunder i Finland på tjälskjutande jordar, fast man vet att berggrunder och en del grus eller sandjordar kan vara icke tjälfarliga.

3.5 Förorenad mark

Marken på byggplatsen måste undersökas med avseende på föroreningar. Koncentrationen av skadliga ämnen som överförs från marken till byggnaden får inte överskrida de värden som fastställts för byggnadens avsedda användning. Dessutom måste byggnadsarbetet förberedas för åtgärder att hantera hälso- och miljöfarliga ämnen ifall dessa påträffas under byggtiden. Föroreningar sprids vanligen i marken med hjälp av

strömmande vatten. När man bygger på bebyggda områden kan dock den större risken bestå av att ämnen som fastnat i jordkornen förflyttas till följd av schaktning, damm, eller till och med genom lekande barn. Utöver det finns gasformiga föreningar som dessutom kan tränga sig genom markförlagda konstruktioner och in i byggnaden. (RIL-121-2004, 2004, s.42).

Undersökning av förorenad mark kräver en utredning av tidigare verksamhet på byggplatsen och en bedömning av tidigare gjorda undersökningar som till exempel, gjorts vid planeringen av områdets detaljplan. I undersökningarna bör föroreningens kvalitet fastställas och därefter ska omfattningen av de förorenade områdena och eventuella saneringskrav undersökas. För att utvärdera resultaten av undersökningen krävs vanligtvis en bedömning av bakgrundskoncentrationerna i området. (RIL-121-2004, 2004, s.43). Enligt (Närings-, trafik- och miljöcentralen, 2023) är industriell verksamhet den vanligaste orsaken till förorening av mark eller grundvatten.

På basen av undersökningarna görs en riskbedömning, var koncentrationerna av föroreningar jämförs med riktvärden. Om riskbedömningen identifierar miljö- eller hälsorisker som är tillräckligt höga för att kräva riskhanteringsåtgärder, inleds saneringsplaneringen för att permanent avlägsna markföroreningar eller avsevärt minska riskerna. Saneringsmetoderna är bland annat inkapsling, avlägsnande och behandling av förorenad jord på annan plats, biologisk behandling, tvättning, eller termiska metoderna. De regionala miljöcentralerna utfärdar föreskrifter och anvisningar om identifiering och sanering av misstänkt förorenade områden. För grundläggningsplatser där det inte finns någon rimlig anledning att misstänka markföroreningar, kan det vara att fältundersökningar inte behövs. De slutsatser som dragits på grund av den preliminära undersökningen om att byggplatsen inte är förorenad, ska dock redovisas skriftligen. (RIL-121-2004, 2004, s.43).

3.6 Markstabilisering

Det finns ett stort antal metoder för markförstärkning, bland annat djupstabilisering, injicering, jet-injektering, massutskiftning, och djuppackning. För att avgöra om dessa förstärkningar är lyckade behövs, utöver de allmänna metoderna för grundundersökningar, kvalitetsundersökningar som vanligtvis är specifika för varje förstärkningsmetod. För att

förstå samspelet mellan de förstärkta jordkomponenterna och den naturliga jorden mellan och runt omkring dem krävs också djupgående kunskaper i geoteknik. (RIL-121-2004, 2004, s.68). Dessa stabiliseringsmetoder är väldigt olika och därför begränsas detta examensarbete till endast stabiliseringsmetoden massutskiftning.

3.6.1 Massutskiftning

Massutskiftning innebär att den icke bärkraftiga jorden ersätts med friktionsjord eller sprängsten. Med en massutskiftning vill man med hjälp av återfyllnads-massor överföra laster till underliggande bärkraftiga jordlager eller berg. Vanligast är att man utskiftar all lös jord, och kallas då fullständig utskiftning, men vid till exempel vägbyggen kan man göra en partiell utskiftning var man endast byter ut en del av den lösa jorden. Massutskiftning bör utformas med hänsyn till topografi, det naturliga jordlagrets hållfasthet och sättningsegenskaper, grundvattenförhållanden, omgivningspåverkan samt återfyllnadsmaterialets egenskaper. (Trafikverket, 2005)

Massutskiftning är praktisk när massöverföringsdjupet är grunt, 0–3 meter. När djupet ökar, ökar även mängden material som måste grävas upp och avlägsnas och mängden material som måste transporteras till platsen snabbt, vilket betyder att kostnaden för metoden ökar kraftigt. (Jääskeläinen, 2010. s.145). Det samma gäller i princip för växthusgasutsläppen, eftersom största delen av utsläppen för massutskiftning orsakas av transporten och grävningsarbete. Mera om växthusgasutsläpp för olika markarbeten förklaras i (kap.3.7)

Normalt får inte massutskiftning eller fyllningar som icke är packade användas som bärande underlag för byggnader eller konstruktioner. Förstärkt mark måste undersökas och dimensioneras med geotekniska metoder. Massbyten samt återfyllningar skall enligt planering komprimeras i lager och genom torrbearbetning, enligt kraven för den grundläggning eller de markarbeten som ska byggas. Fyllning under vattennivå för byggnadsändamål får endast ske genom att mjuka jordlager avlägsnas och fylls med grovt material som djupkomprimeras. (RIL-121-2004, 2004, s.68)

De jord- och stenmaterial som används vid jordarbeten på en byggarbetsplats ska ha tekniska egenskaper som är lämpliga för den avsedda användningen och vara av jämn kvalitet. Den bärande kapaciteten tillhandahålls av ett fördelnings och ett bärande skikt:

syftet med fördelnings skiktet är att öka den bärande kapaciteten hos jordkonstruktionen. Syftet med det bärande lagret är att öka markstrukturernas bärighet och jämna ut underlaget för beläggningen. Den krossade stenens kornstorlek bestäms av tjockleken på lagret, desto tjockare lager desto större måste den maximala kornstorleken i stenmaterialet vara. Den minsta lagertjockleken för fyllnadsmaterialet måste dock vara 3 gånger den minsta kornstorleken i stenmaterialet. (Rudus, u.å.).

3.6.2 Geosyntetiska produkter

Geosyntetiska produkter används ofta inom anläggningsbranschen, men en grov indelning av geosyntetiska produkter är vävar, nät, tätningsfilmer (geomembran), och samverkansprodukter (geokompositer). Med geosyntetiska produkter anses främst produkter som kan ersätta användningen av naturliga jordmaterial. I vissa fall kan de spara betydande mängder grävningsarbete, borttagning av uppgrävd jord och transport av ersättnings jord av bättre kvalitet. Ibland kan geosyntetiska produkter användas för att bygga geokonstruktioner som till exempel en brant eller en hög vall, av till och med silt som annars skulle ha behövt köras bort från byggnadsplatsen. Förutom att dessa produkter är miljövänliga och kostnadseffektiva, uppnår de vanligtvis en hög kvalitet på lösningarna. Användningen av syntetiska geokonstruktioner är ett bra sätt att spara på naturresurser. (Jääskeläinen, 2010. s.158)

De geosyntetiska materialens funktioner kan delas in enligt följande, separation, filtrering, ledning av vatten och gas på vävnadsnivå, förstärkning, skydd och isolering. Ibland fyller en produkt flera funktioner samtidigt medan det ibland behövs flera produkter tillsammans för att uppnå de önskade funktionerna. För att klargöra de viktigaste funktioner menar man med separering att hålla två olika jordarter åtskilda från varandra för att undvika blandning. Detta kan behövas till exempel mellan den tjälskjutande undergrunden och det icke tjälskjutande fyllnads lagret ovanpå. Med filtrering menar man i de flesta fall att man låter vatten sippra genom materialet, men inga jordpartiklar tillåts passera igenom. Med förstärkning menar man att med hjälp av geosyntetiska material sprida laster i jorden, eller förhindra glidytor att röra sig till exempel vid kanter av jordlager. (Jääskeläinen, 2010. s.158–159)

3.7 Växthusgasutsläppsdata för olika markarbeten

I detta stycke analyseras växthusgasutsläpps data och bakgrundsrapporterna, som hittas på nätsidan Co2data.fi. Meningen är att skapa en bredare kunskap om växthusgasutsläpp för olika markarbeten och produkter som behövs till markarbeten.

Analyserar man växthusgasutsläppen för olika stenmaterial eller fyllnadsmaterial i databasen Co2data.fi, kan man konstatera att för naturstensarterna spelar sorteringen knappt någon skillnad på växthusgasutsläppen i produktskede. Enligt en tidigare undersökning (Vares, 2022, a) utgår man ifrån att olika kornstorleksnivåer inte har en betydande effekt på växthusgasutsläppen i produktskede för kross, grus, eller sand.

Dock bör man ta i beaktande att detta är genomsnittlig klimatdata och att koldioxidekvivalenterna för olika stenmaterial påverkas av flera olika faktorer, som till exempel maskinernas energikälla, alltså är maskinerna som används för tillverkningen av krossat stenmaterialet ström drivna eller drivs de av fossila bränslen. I tabell 2 nedan redovisas koldioxidekvivalenter i produktskede för olika fyllnadsmaterial. Från tabellen utsticker den höga koldioxidekvivalenten för lättgrus, vilket beror på att tillverkningsprocessen är helt annan jämfört med naturstens materialen.

Tabell 2 . Koldioxidekvivalenter för fyllnadsmaterial (A1-A3).

Material	$kgCO_2e./kg$
Sand, fog sand	0,004
Grus, 16/32	0,006
Grus, 5…8-32mm	0,006
Kross, bergkross, KaM 0/180	0,006
Kross, dräneringskross 8-32mm	0,006
Lättgrus	0,330

(Vares, 2022, a).

Fast naturstensmaterialen inte har höga koldioxidekvivalenter över lag, bör man ta i beaktande att materielmängderna för fyllnads-massor ofta blir stora vid markarbeten. Enligt (Rakennusteollisuus. 2020, b) orsakar transporten en stor del av stenmaterialens utsläpp, framför allt på grund av den mängd massa som behövs, men också på grund av avstånden mellan lagringsplatserna och byggnadsplatserna. Dessutom måste överskottsmassor transporteras från byggnadsplatsen vilket även bör tas i beaktande. I

tabell 3 nedan redovisas genomsnittlig klimatdata för transporter med två olika fordon, med olika koldioxidekvivalenter beroende på mängden last fordonet transporterar och var fordonet kör, enheten för koldioxidekvivalenterna är kilogram CO_2e. per tonkilometer.

Tabell 3. Koldioxidekvivalenter för transporter, A4.

Fordon	Utsläpp, kgCO_2e./tkm
Fullständig fordonskombination (76t)100% last, landsväg	36,19
Fullständig fordonskombination (76t)100% last, stadskörning	64,52
Fullständig fordonskombination (76t)40% last, landsväg	69,23
Fullständig fordonskombination (76t)40% last, stadskörning	116,12
Jordtransportsfordon (32t) 100% last, landsväg	51,63
Jordtransportsfordon (32t) 100% last, stadskörning	93,91
Jordtransportsfordon (32t) 40% last, landsväg	108,42
Jordtransportsfordon (32t) 40% last, stadskörning	179,25

(Hämäläinen, 2022).

Utöver transporter behöver man också ta i beaktande arbetsmaskiner som inte är avsedda för trafik, som används på byggnadsplatserna. Med tanke på växthusgasutsläpp som orsakas av dessa maskiner kan de årliga drifttimmarna variera från några dussin till flera tusen, vilket påverkar utsläppen. År 2019 uppgick växthusgasutsläppen från arbetsmaskiner till 2,4 Megaton CO_2e., vilket är cirka 4,5 % av Finlands totala utsläpp. Utsläppen från arbetsmaskiner har legat på ungefär samma nivå under de senaste åren. Maskiner drivs fortfarande nästan enbart av förbränningsmotorer. Diesel eller brännolja står för nästan 90 % av utsläppen från bränslen för arbetsmaskiner. Åtgärder för att minska utsläppen bör därför i första hand inriktas på dieseldrivna maskiner. (Linjama, 2022). I tabell 4 nedan redovisas genomsnittlig klimatdata för några vanligt använda maskiner inom markarbeten, inom informationsmodellen transport, A4.

Tabell 4. Koldioxidekvivalenter per arbetstimme för grävmaskiner, vältar, och pålmaskiner (A4).

Produkt/maskin	Utsläpp, kgCO_2e./h
Vält 7–15 ton	28,90
Vält under 7 ton	10,50
Vält över 15 ton	47,20
KKH 14, grävmaskin, med larvband	22,79
KKH 30, grävmaskin, med larvband	48,79
KKH 55, grävmaskin, med larvband	89,34
pålningsmaskin, under 40 ton	45,30
pålningsmaskin, över 40 ton	86,80
pålningsmaskin, el driven	8,50

(Syke, 2022, c).

4 Grundläggningsmetoder

Kiilsgaard (2019) menar att beroende på markens egenskaper och den belastning som marken utsätts för, kan grundläggningsmetoder utföras på många olika sätt. Vid fastare jordar eller berg räcker oftast en ytlig grundläggning, varav de vanligaste är platta på mark, krypgrund eller plintgrund. Vid lösare jordar behövs djupare grundläggning för att uppnå en tillräcklig stabilitet för konstruktionen, djup grundläggning utförs till exempel med pålar och kallas då pålgrundläggning. Pålar används för att överföra laster från en överbyggnad ner till bärkraftig jord eller berg.

Detta examensarbete koncentreras till grundläggning på mark samt grundläggning på spetsburna pålar. I detta kapitel behandlas grundläggande information om dessa grundläggningsmetoder.

4.1 Grundläggning på mark

En grundläggning anses vara markförlagd när den är upprättad direkt på marken eller på en grusbädd som är byggd ovanpå berg. Den minsta tjockleken på grusbädden på berg ska vara 200 millimeter, annars ska fundamentet gjutas direkt mot berget. Krossbädden har en dämpande effekt på eventuella vibrationer i omgivningen, från till exempel stenbrytning. Därför rekommenderas användning av stenkross mellan berget och bottenplattan i stadsområden, men även i andra områden som är känsliga för vibrationer. Men om ett eventuellt sönder sprucket rör eller någon liknande incident kan orsaka en onormal risk för erosion av krossbädden bör grunden gjutas direkt på berget. (Liikennevirasto, 2017)

Bottenbjälklaget får inte planeras och byggas som markförlagd om den skulle sätta sig mycket mer än de intilliggande bärande konstruktionerna, eller ifall sättnings skillnaden skulle försämra komforten i bostaden eller förhindra användningen av utrymmet. Fyllningen eller jordlagren under golvet bör byggas upp i lager till avsedd täthet så att det inte sätter sig mer än 5 millimeter mer än byggnaden. Storleken på fundamenten dimensioneras geotekniskt mot markbrott och för att hålla fundamentens sättningar och sättningsskillnader inom grundkonstruktionens toleranser med en tillräcklig säkerhet. Genom fundament fördelas pelar- och vägglasterna till den bärande markkonstruktionen. Dessutom ska grundfundamentens grundläggningsdjup vara minst 0,5 meter mätt från den

intilliggande marknivån. Grundläggningsdjupet kan dock vara mindre på insidan av byggnaden. (RIL-121-2004, 2004, s.72, 94)

Grävningsarbeten på områden där fundament skall placeras, måste utföras med försiktighet för att marken under fundamenten får inte rubbas. Fundamenten dimensioneras ofta för en sättning på ca 10–20 millimeter, och om ett tunt lager av rubbad jord lämnas kvar under fundamenten, kommer det lätt att svälja hela sättningsmarginalen under belastning. Dessutom är det inte tillåtet att gjuta fundament på frusen mark. Speciellt om det frusna jordlagret innehåller finkornig jord är det vanligtvis inte möjligt att komprimera jorden, och då måste jorden avlägsnas. Den mest besvärliga situationen är om jorden tillåts frysa under de redan gjutna fundamenten. För att lösa denna situation bör en särskild plan för det specifika fallet utarbetas. (Jääskeläinen, 2016. s.42–43)

Den geotekniska bärförmågan bestäms vanligen på basis av beräkningar för bärförmåga och sättningar. Den geotekniska bärförmågan är oftast den dimensionerande bär förmågan, medan den viktigaste delen av den geotekniska dimensioneringen av markförlagda fundament är beräkningen av sättningar och sättningsskillnader, eftersom det oftast avgör om markförlagda fundamentet kan användas. Sättningar beräknas med att använda karakteristiska laster med hänsyn till lasternas verkningstider. Dessutom bör man i beräkningarna ta i beaktande fundamentets bärförmåga på marken i förhållande till de grävnings- och fyllningsnivåer som råder i de olika skedena av byggnadsarbete. Att göra fundament på finkorniga jordlager kräver att de bärande konstruktionerna tål de sättningsskillnader som orsakas av packningen av de finkorniga jordlagren. Över lag är det inte lämpligt att göra markförlagda fundament på organiska, mjuka, eller finkorniga jordlager. (RIL-121-2004, 2004, s.73,76)

Om byggnaden utsätts för jämn sättning är de negativa effekterna som är kopplade till byggnaden främst på rörledningar, utgångar o.s.v. Dock är de tillåtna värdena för jämn sättning så höga att de i praktiken inte förekommer. En stor sättning orsakar vanligtvis alltid en ojämn sättning. Även under normala förhållanden har det observerats att även om sättningsberäkningarna ger samma sättning för fundamenten, så uppkommer en del sättningsskillnader i verkligheten. Ju högre de tillåtna sättningarna är, desto större tenderar sättningsskillnaderna bli. (Jääskeläinen, 2016. s.45)

Det ska också kontrolleras att hela konstruktionen och de enskilda fundamenten har ett tillräckligt motstånd mot vältning och glidning. För att kontrollera att det inte finns någon risk för glidning mellan fundamentet och marken, beräknas friktionskoefficienten mellan marken och fundamentet. (RIL-121-2004, 2004, s.77). En allmän rekommendation är att markens lutning mellan två fundaments nedre hörn inte överskrider lutningen 1:3. Om lutningen var brantare kunde till och med krafter från det övre fundamentet förflytta sig genom marken, på det nedre fundamentet. (Jääskeläinen, 2016. s.41)

4.2 Grundläggning på pålar

För klassificering av pålar och pålsystem brukar olika indelningsgrunder användas. Indelningsgrunderna kan baseras på pålarnas material, funktionssätt eller utförande sätt. Med material som indelningsgrund menar man betong-, trä- eller stålpålar, med funktionssätt menar man om pålarna är till exempel spetsburna eller mantelburna. En annan indelningsgrund är utförandesätt, alltså är pålarna slagna, borrade eller vibrerade ner till stadig grund. (Olsson &Holm, 1993, s.53).

I detta examensarbete koncentreras undersökningen till slagna betongpålar och SSAB:s RR- och RD stålpålar, som faller i kategorin spetsburna pålar. Detta på grund av att de är vanligt använda inom byggbranschen i Finland och dessutom kan användas i många olika grundläggningsförhållanden.

4.2.1 Dimensionering av slagna spetsburna pålar

Vid pålkonstruktioners dimensionering är grundundersökningen en väldigt viktig informationskälla för konstruktionsplaneraren. För att kunna dimensionera slagpålar behöver konstruktionsplaneraren få en hel del information från grundundersökningen. Konstruktionsplaneraren behöver bland annat få reda på hur långt ner i marken den stadiga grunden ligger, vad jordlagren har för skjuvhållfasthet för att säkerställa att pålarna får ett tillräckligt stöd mot knäckning, eller om negativmantelfriktion behöver tas i beaktande. Negativmantelfriktion uppstår då marken runt pålen sätter sig mera en själva pålen. En viktig kännedom är att pålar med längd under 1,5 meter inte får användas, detta gäller för både stål och betongpålar. Pålar under 3 meter bör fästas med fastinspänning i fundamentet för att minska risken för att pålarna skulle välta. (RIL 254–2016, 2016, s. 45–47, 96).

När en grupp pålar är bundna tillsammans med ett pålfundament, dimensioneras pålfundamentet som en strukturell styv pålplatta. Pålarnas infästning i pålfundamentet ska visas i grundkonstruktionsplanerna. Pålfundamentet ska konstrueras på ett sådant sätt att det med säkerhet klarar effekten av de tillåtna avvikelserna i pålarnas läge som påverkar pålarnas belastning och pålfundamentets påfrestningar. Pålfundamenten ska vara tjälisolerade, såvida tjällyftningar på pålfundamentet inte kan förhindras på annat sätt. (RIL-121-2004, 2004, s.91)

Snedpålar kan användas för att öka stabiliteten i pålfundamenten, bland annat stöda fundamenten mot krafter som påverkar i horisontell riktning. Vid användning av snedpålar måste man dock ta hänsyn till de spänningar som orsakas av eventuella deformationer av jordlagren på snedpålarna. Tyngden av eventuell fyllning intill grunden kommer att orsaka deformation av jordlagren och böjning av snedpålarna. Snedpålarnas maximala lutning beror på pålningsmaskinen men i normala fall räknar man med en maximal lutning på 1:4. (RIL 254–2016, 2016, s.181–183).

4.2.2 Betongpålar

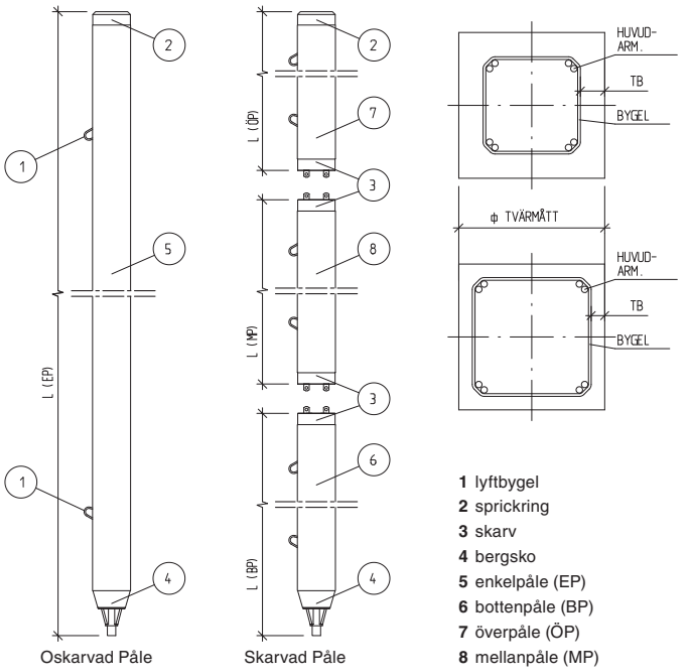
Vanliga användningsområden för betongpålar är trafik- och vägkonstruktioner, industribyggnader, massiva maskinfundament samt bostadsbyggande. Fördelarna med armerade betongpålar är bland annat, bra korrosionsbeständighet, hög knäckningshållfasthet, hög bärförmåga, och ett landsomfattande nätverk av pålfabriker. Betongpålar bör tillverkas av typgodkänd armering och betongen skall tillverkas enligt standarden SFS-EN 206. I tabell 5 nedan redovisas information om några vanligt använda betongpåletyper. (Rakennusteollisuus, 2018)

Tabell 5. Vanliga betongpåletyper.

Paalutyyppi	Sivumitta [mm]		Paino [kg/m]	Poikki-leikkauksen ala [mm2]	Vaipan ala [m2/m]	Betonin lujuus [MPa]
RTB-250-16	250		156	62 500	1,00	C40/50
RTB-300-16	300	+15	225	90 000	1,20	C40/50
RTC-300-16	300	-10	225	90 000	1,20	C45/55
RTC-350-16	350		307	122 500	1,40	C45/55

(Rakennusteollisuus, 2018).

Betongpålar består av ett armerat betongelement med ingående delar som lyftbygel, sprickring, skarv och bergsko (se figur 3). Bygelarmeringen häft-svetsas oftast till huvudarmeringen som tillsammans bildar armeringskorgar. Svetsningen medför en hög och jämn kvalitet. Bygelarmeringen skall täckas med minst 25mm betong och betongens maximala kornstorlek är 25mm. (Hercules Grundläggning, 2018)



Figur 3. Betongpålens vanligaste delar med namn. (Hercules Grundläggning, 2018).

På basen av mark- och grundvattenanalyserna bestäms exponeringsklasserna för betongpålarna, vilket påverkar de egenskaper som krävs av pålarna. Exponeringsklasserna beskriver de miljöförhållanden eller påfrestningar betongkonstruktionen utsätts för under hela sin livslängd. Utöver de vanliga XC-exponeringsklasser, kan ytterligare exponeringsklasser definieras för pålar, om det finns motiverade skäl. Motiverade skäl kan bland annat vara att marken eller grundvattnet innehåller sulfater, klorider eller andra kemiska belastningar. För att pålprodukterna skall uppfylla kraven för sulfatexponeringsklasserna XA1 och XA2, ändras betongens sammansättning. (Rakennusteollisuus, 2018)

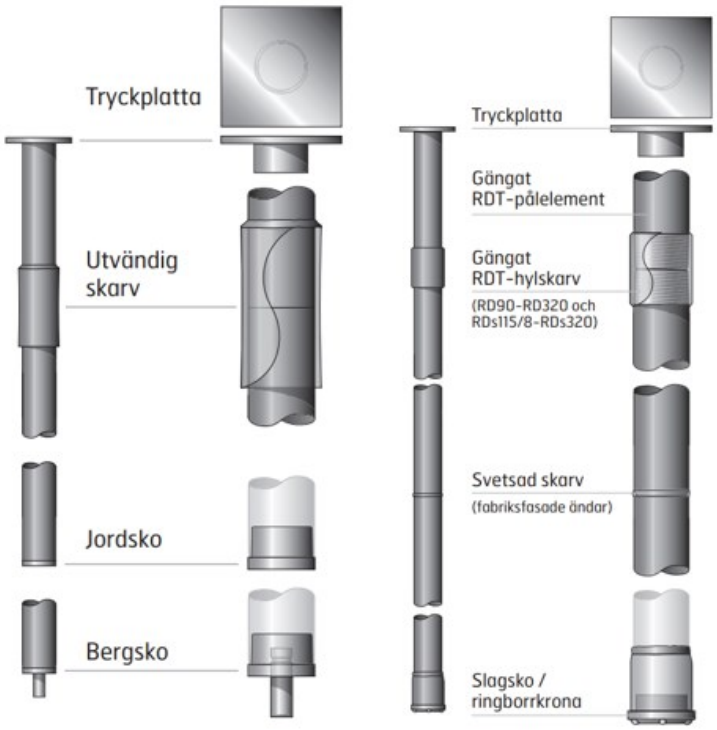
Pålens utformning bestäms enligt pålarbetsklassen (PTL1-PTL3) som tar hänsyn till pålarnas normala belastningar och exponeringsförhållanden. Vid utformningen av

pålkonstruktionen bör man inte bara ta hänsyn till pålningsarbetet utan även till platsens egenskaper, som beskrivs av konsekvensklassen och den geotekniska klassen. (RIL 254–2016, 2016, s.101).

4.2.3 Stålpålar

SSAB är en av de ledande leverantörerna av stålpålar i Europa, och deras stålpålar är vanliga inom byggbranschen i Finland. Av denna orsak har största delen av informationen och fakta om stålpålar, tagits från deras manualer och skrifter. I detta examensarbete koncentreras informationen på RR- och RD stålpålar.

Huvudsakliga skillnaden mellan RR och RD pålar är att RR pålar slås ner, medan RD pålar borras ner till stadig grund. För RR-pålarna används friktionsskarvar, medan RD-pålarna skarvas med gängade hylsor. Typen av pålsko anpassas efter omständigheterna. Det finns tre typer av bergskor till grova RR-pålar var av bergsko med dubb är vanligast (se Figur 5). Bergskon bör alltid användas när pålarna slås in snett eller om bergytan överlagras av ett moränlager. RR samt RD pålarna brukar delas in i två grupper, pålar med liten diameter och pålar med stor diameter (grova pålar). I figur 4 nedan redovisas RR-pålen till vänster och RD-pålen till höger. (SSAB,u.å.b)



Figur 4. RR-och RR pålarnas uppbyggnad. (SSAB, u.å.b).

Figur 5. Pålskor för grova stålpålar. (SSAB, u.å.b).

Fördelarna med RR-pålar är att det är möjligt att använda lättare installationsutrustning, och de är snabba att installera, vilket leder till att de också är kostnadseffektiva. Dessutom orsakar de minimalt med spill, eftersom man kan använda kapade pålar på nytt. (SSAB, u.å.a)

RD- pålar är ypperliga att använda vi krävande markförhållanden som till exempel när marken innehåller hinder som är svåra att penetrera, stora stenblock eller befintlig grundläggning. Vid situationer där berggrunden lutar och det finns risk för att pålarna börjar glida, eller där berggrunden ligger nära markytan och det finns risk för att pålen skulle välta är det möjligt att borra RD- pålarna en bit in i berget för att förhindra pålen att glida eller välta. Genom att borra ner RD-pålarna i berget kan man även lösa situationer där det förekommer dragkrafter i pålarna. Andra viktiga fördelar med RD- pålar är att pålningsarbetet inte orsakar stora vibrationer eller markförskjutningar, och risken för böjning eller knäckning av pålarna är mindre eftersom de borras ner i marken. (SSAB, u.å.a)

RR- och RD- pålar med liten diameter

RR- och RD-pålarna med liten diameter bygger på längdsvetsade stålrör, och tillverkas med stålkvaliteten S440J2H. RRs och RDs pålar är de samma pålar med en högre stålkvalitet, som är S550J2H. Med RR75–RR220 och RD90-RD220 pålar använder man mekaniska skarvar eller så levereras dom som pålrör och skarvarna svetsas på bygget. RR/RD270–RR/RD320-pålarna levereras endast som pålrör och skall svetsas på bygget. RR- och RD-pålarna med liten diameter passar ypperligt för grundläggning av småhus, bostadshus, kontorsbyggnader eller till grundförstärkning av befintliga grunder. (SSAB, u.å.a)

RR- och RD- pålar med stor diameter

RR- och RD-pålarna med stor diameter bygger på spiralsvetsade stålrör och tillverkas med diametrar från 400 till 1200 millimeter. För RR- och RD-pålar med stor diameter används standardstålkvalitet S355J2H men tillverkas också med S440J2H och S550J2H stålkvaliteter. Dessa pålar kan levereras med längder upp till 45 meter om transporten tillåter, vilket sparar en hel del tid på svetsarbeten. Vid behov kan dessa RR- och RD-pålarna skarvas på byggplatsen genom svetsning. RR- och RD-pålarna med stor diameter kan användas bland annat till byggnation av broar, hamnar eller större bostadshus och kontorsbyggnader. (SSAB, u.å.a)

Enligt en tidigare undersökning (Vares, 2022, B) är SSAB den största stålproducenten i Norden, där stålproduktionen baseras på malmbaserat stål (BOF-metoden). En stålpåle tillverkad med en malm baserad tillverkningsprocess kan då beräknas med en koldioxidekvivalent (genomsnitt av både pålar med stor och liten diameter) på 2,5 kgC02e./kg, då värdet anges per meter stålpåle. I tabell 6 nedan redovisas koldioxidekvivalenterna i produktskede (A1-A3) för några pålprofiler som exempel.

Tabell 6. Koldioxidekvivalenter för stålpålar (A1-A3).

Produkt, (diameter/väggtjocklek)	Utsläpp, kgCO_2e./kg	Utsläpp kgCO_2e./m
Stålpåle, d90 (12,8 kg/m)	2,5	32
Stålpåle, d140/10 (32 kg/m)	2,5	80
Stålpåle, d170/12,5 (48 kg/m)	2,5	120

(Vares, 2022, b).

I tabell 7 redovisas genomsnittliga koldioxidekvivalenter för betongpålar. På basen av tabellerna 6 och 7 kan man konstatera att ur växthusgasutsläppens synvinkel är betongpålar ett bättre alternativ en stålpålar.

Tabell 7. Koldioxidekvivalenter för betongpålar (A1-A3).

Produkt	Utsläpp, kgCO_2e./kg	Utsläpp kgCO_2e./m
Betongpåle, RTB-250 (157kg/m)	0,2	31,4
Betongpåle, RTB-300 (227kg/m)	0,19	43,13
Betongpåle, RTB-350 (309kg/m)	0,2	61,8

(Syke, 2022, b).

5 Jämförelse av grundläggningsmetoder ur ett CO_2 perspektiv

Målsättningen med beräkningarna för denna undersökning är att få en uppfattning om skillnaderna i klimatpåverkan, beroende på grundläggningsförhållandena och vilken grundläggningsmetod som används. Idén är att simulera två olika markförhållanden, var samma byggnad eller konstruktion skall byggas. En var markförhållandena är goda och byggnaden kan byggas på en markförlagd grundkonstruktion, och en var markförhållandena är svaga, där byggnaden måste byggas på en pålgrund. I de följande kapitlen (kap.5.1–5.7) förklaras hur beräkningarna har gjorts och vad som bör tas i beaktande vid analysering av slutresultaten.

5.1 Forskningsobjektet

Forskningsobjektet som i denna undersökning är en kontorsbyggnad består av 5 våningar med en källarvåning, och har en stålstomme av WQ-balkar och samverkanspelare. Byggnaden håller på att byggas under skrivandets gång i huvudstadsregionen. Byggnadens grundkonstruktioner är planerad i verkligheten direkt på berg, och i stort sett står byggnaden på pelarfundament som är förankrade i berget, totalt 70 pelarfundament. Forskningsobjektet har till detta examensarbetes syfte förenklats en del, så att befolkningsskyddsutrymmet som i verkligheten planerades fast i kontorsbyggnaden inte inkluderas i beräkningarna, eftersom dessa konstruktioner bör dimensioneras på ett annat sätt en de övriga konstruktionerna.

5.2 Beräkningsmetoder

I denna undersökning utförs beräkningarna skilt för grundkonstruktioner på spetsburna betongpålar, spetsburna stålpålar samt för en markförlagd grundkonstruktion. Undersökningen begränsas till forskningsobjektets bärande grundkonstruktioner, som förändras beroende på grundläggningsmetoden. Det vill säga pelarfundamenten, fortlöpande fundamenten, källarvåningens golvplatta samt fundamenten under schakten. I centrum av byggnaden står två hisschakt samt två schakt för rördragningar, vilka går från byggnadens grund till byggnadens tak.

Den markförlagda grundkonstruktionen simuleras att byggas på en 300 millimeter tjock grusbädd som ligger på berg och har en belastningskapacitet på 500 kN/m^2. Dessutom

antas det i beräkningarna att grundvattennivån inte behöver tas i beaktande. Detta representerar goda grundläggningsförhållanden i denna undersökning.

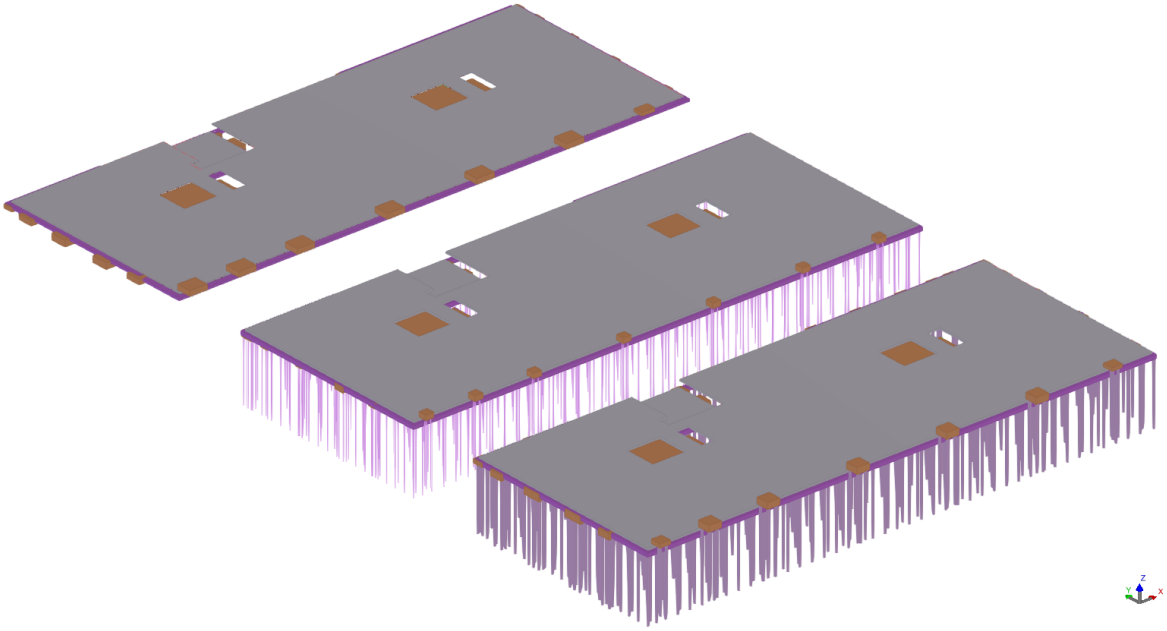
Grundkonstruktionerna på spetsburna pålar, simuleras att byggas på en tomt med svagt bärande mark, med ett medelavstånd från grundläggningsnivån till bärande grund på 15 meter. Detta representerar svaga grundläggningsförhållanden i denna undersökning. Pålarnas profiler bestämdes tillsammans med handledaren på förhand till, betongpåle profilen RTC-300 och stålpåle profilen till RD-170-12,5. Slutresultaten jämförs som att alla pålar är 15 meter långa.

Metoden för växthusgasutsläppsberäkningarna i detta examensarbete, innebär att först dimensionera grundfundamenten för forskningsobjektet, varefter grundfundamenten modelleras i Tekla. Programmet Tekla Structures förklaras i nedanstående stycke. På basen av Tekla modellens material data, beräknas växthusgasutsläppen för produktskede (A1-A3), skilt för de olika grundläggningsmetoderna. Detta betyder att endast utsläppen som förekommer från att man utbryter råmaterialen tills den färdiga produkten står vid fabriksdörren, är med räknat i de totala växthusgasutsläppen, se (kap.2.1). Detta betyder också att till exempel utsläppen som förekommer på grund av transporten av materialen till bygget samt de utsläpp som uppkommer under installationen inte är med räknade. Eftersom beräkningarna dessutom begränsas till de bärande konstruktionerna, innebär detta att endast betongens, armeringens och pålarnas växthusgasutsläpp för de specifika konstruktionsdelarna, tas i beaktande i beräkningarna för växthusgasutsläppen.

Tekla Structures är en 3D BIM-programvara som används för att modellera byggnadsstrukturer. Med Tekla Structures kan man skapa, kombinera, och hantera exakta multimateriella modeller som innehåller mängder av byggnadsinformation. Tekla Structures kan användas som hjälpmedel för planering, detaljering och informationshantering enda från konceptuell planering till byggande på plats. (Construsoft, u.å.).

I denna undersökning modelleras tre modeller av forskningsobjektets bärande grundkonstruktioner, en modell för varje enskild grundläggningsmetod. Modellen görs på liknande sätt som allmänt i projektplanerings skedet, vilket betyder att planeringen inte görs i detalj. Enligt en tidigare undersökning (Holm, 2017) klargör man projektets behov, möjligheter samt alternativa genomföranden i projektplaneringsstadiet. På basen av

projektplaneringens resultat kan bland annat investeringsbeslut göras, men även senare användas som planeringsanvisning för byggnadens tekniska planering, vilket är det följande vanliga skedet i ett byggprojekt.



Figur 6. Modellerna för de tre grundkonstruktionerna, Tekla structures.

I figur 6 ovan redovisas modellerna för de tre grundkonstruktionerna. Enligt dessa modeller beräknades materielmängderna för grundkonstruktionerna, som beräkningarna för växthusgasutsläppen baseras på.

5.2.1 Begränsningar för dimensioneringen

Grundkonstruktionerna och de specifika konstruktionsdelarna dimensioneras med förenklade beräkningar och beräkningsmetoder, vilka förklaras i de följande kapitlen (kap.5.3–5.6). Det viktiga är att fundamenten dimensioneras och materialen till dessa konstruktionsdelar optimeras för varje grundläggningsmetod med samma utgångspunkter, vilket möjliggör att grundläggningsmetodernas växthusgasutsläpp kan jämföras. Dock innebär detta att grundkonstruktionerna inte optimeras vid dimensioneringen exakt som de skulle i verkligheten. Meningen är att beräkningarna för materielmängderna kommer nära de mängder som skulle användas i verkligheten, vilket ger oss en uppfattning om skillnaderna i klimatpåverkan, beroende på grundläggningsförhållandena och vilken grundläggningsmetod som används.

Modeller och ritningar för forskningsobjektet som Ramboll Finland har gjort för det verkliga projektet, har använts som hjälpmedel för att utföra dimensioneringen av grundfundamenten samt beräkningarna för växthusgasutsläppen.

Lasterna på grundfundament har beräknats med hjälp av ett RFEM-program. Konstruktionsanalysprogrammet RFEM ger konstruktörer ett 3D-program som används bland annat för att definiera konstruktioner, material och belastningar för olika strukturella system, som består av till exempel plattor, väggar, och element. Med RFEM-programmet kan bland annat deformationer, inre krafter, spänningar, eller stödkrafter beräknas (Dlubal, u.å.). Ramboll Finland har gjort en modell för forskningsobjektet, med RFEM-programmet. Med hjälp av denna modell har stabilitetsgranskningar gjorts och krafterna som påverkar grundfundamenten beräknats. Beräkningarna och lastkombinationerna följer eurokoderna som råder (SFS-EN1990), och Finlands nationella bilaga för konstruktioners hållfasthet och stabilitet.

5.3 Pelarfundamenten

Optimeringen och dimensioneringen av pelarfundamenten för de tre grundläggningsmetoderna har gjorts med hjälp av ett beräkningsprogram som Ramboll Finland håller på att utveckla vid skrivande stund. I fortsättningen av detta examensarbete kallas detta verktyg för RDE-verktyget. Lasterna på pelarfundamenten som beräknades med hjälp av RFEM-programmet, exporterades till RDE-verktyget, varefter pelarfundamenten dimensionerades och optimerades.

För att kunna jämföra grundkonstruktionernas växthusgasutsläpp, måste fundamenten dimensioneras och materialen till dessa konstruktionsdelar optimeras, för varje grundläggningsmetod med samma utgångspunkter. Därför har pelarfundamentens dimensionering och optimering begränsats enligt följande:

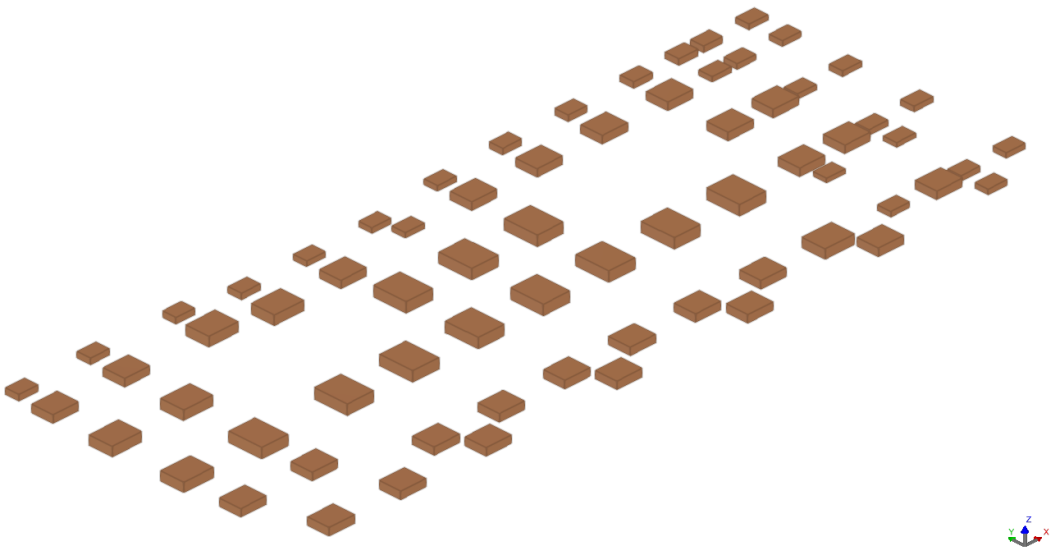
- Pelarfundamenten optimeras med fyra olika pelarfundament för varje grundläggningsmetod (pelarfundamenten på stålpålar optimeras med tre olika pelarfundament) orsak förklaras i (kap.5.3.2)

- Användningsgraden av dimensionerande kapaciteter får inte överstiga 85 procent

- Grundkonstruktionerna på pålar optimeras och dimensioneras med en pålprofil för hela byggnadens grundkonstruktion.

I verkligheten skulle man kunna optimera med flera olika pelarfundament eller en högre användningsgrad, för att minska på betong och armeringsmängden. Dock bör man ta i beaktande att en väldigt exakt optimering kan leda till konsekvenser. Till exempel om alla pelarfundamenten för forskningsobjektet i denna undersökning, skulle dimensioneras enskilt med flera olika armeringsdimensioner, skulle detta leda till många ritningar och beräkningar, vilket kan förorsaka högre kostnader, flera materialbeställningar, och dessutom högre risk för byggnads-fel på bygget.

För pålkonstruktionerna i denna undersökning konstaterades att laster på grund av negativmantelfriktion inte behöver tas i beaktande. Dessutom konstaterades att enskilda pålar inte dimensioneras mot knäckning, vilket bör göras i ett verkligt projekt. Dimensionering av enskilda pålar ansågs inte vara relevant för denna undersökning eftersom dimensionering av enskilda pålar kräver exaktare information om markens egenskaper, viket ändrar från projekt till projekt. Detta bör dock tas i beaktande vid analysering av slutresultaten.



Figur 7. Markförlagda pelarfundamenten.

I figur 7 ovan redovisas konturerna för de markförlagda pelarfundamenten. I de följande kapitlen förklaras mera specifikt hur pelarfundamenten för de enskilda grundläggningsmetoderna har dimensionerats och enligt vilka begränsningar.

5.3.1 Pelarfundamenten på betongpålar

Pålarnas profiler bestämdes på förhand till betongpåle profilen RTC-300, samt att pålarbetsklassen skulle vara PTL3. Optimeringen gjordes med RDE-verktyget var pelarfundamenten begränsades till fyra olika fundamenttyper. Lasterna som påverkar pelarfundamenten beräknades med hjälp av RFEM-programmet. Vid dimensioneringen av pelarfundamenten på betongpålar togs endast laster beräknade i brottgränstillstånd i beaktande. Med hjälp av RDE- verktyget optimerades pelarfundamenten på betongpålar enligt manualen (Betoniteollisuus, 2021). Optimeringen begränsades till att använda de färdigt dimensionerade betongpålefundamenten i denna manual. Detta innebär att i dimensioneringen antogs bland annat att följande villkor uppfylldes:

- Inga yttre belastningar orsakar horisontella krafter på fundamentet
- Pålarna står raka i marken
- Pålfundamentet fungerar som en styv pålplatta vid beräkning av pålkrafter
- Drag i pålarna tillåts inte
- Pelarna samt lasterna är centralt placerade i förhållande till fundamentet och pålgruppen

I tabell 8 nedan redovisas vilka fundamenttyper optimeringen samt dimensioneringen av pelarfundamenten på betongpålar, gav de minsta materialmängderna. Dessa beräknade med ovannämnda begränsningar och dimensioneringsmetoder. Materialmängderna samt växthusgasutsläppen beräknades enligt armeringsritningarna i manualen (Betoniteollisuus, 2021)

Tabell 8. Pelarfundament på betongpålar, fundamenttyper och antal.

Typ av pelarfundament	Antal
VPA-3-RTC-300-PTL3	29
VPA-5-RTC-300-PTL3	25
VPA-6-RTC-300-PTL3	6
VPA-8-RTC-300-PTL3	8

5.3.2 Pelarfundamenten på stålpålar

Pålarnas profiler bestämdes på förhand till stålpåle profilen RD-170-12,5, samt att pålarbetsklassen skulle vara PTL3. Lasterna som påverkar pelarfundamenten beräknades med hjälp av RFEM-programmet, och vid dimensioneringen av pelarfundamenten på stålpålar, togs endast laster beräknade i brottgränstillstånd i beaktande. Med hjälp av RDE-verktyget optimerades pelarfundamenten med tre olika fundament, vilka dimensionerades enligt, SSAB:s manual. (SSAB, 2022). Optimeringen begränsades till att använda de färdigt dimensionerade stålpåle fundamenten i denna manual. Detta innebär att i dimensioneringen antogs bland annat att följande villkor uppfylldes:

- Inga yttre belastningar orsakar horisontella krafter på fundamentet
- Pålarna står raka i marken
- Pålfundamentet fungerar som en styv pålplatta vid beräkning av pålkrafter
- Drag i pålarna tillåts inte
- Pelarna samt lasterna är centralt placerade i förhållande till fundamentet och pålgruppen

Orsaken varför pelarfundamenten på stålpålar optimerades med endast tre olika fundament, är att i SSAB:s manual finns endast tre olika pelarfundament för varje pålprofil. Detta betyder att dimensioneras fundamenten enligt SSAB:s manual och om samma pålprofil skall användas för hela projektet, vilket man alltid strävar till, kan optimeringen göras med endast tre olika pelarfundament.

I tabell 9 nedan redovisas med vilka fundamenttyper optimeringen samt dimensioneringen av pelarfundamenten på stålpålar resulterade med lägsta materialmängder. Dessa beräknade med ovannämnda begränsningar och dimensioneringsmetoder. Materialmängderna samt växthusgasutsläppen beräknades enligt armeringsritningarna i manualen (SSAB, 2022).

Tabell 9. Pelarfundament på stålpålar, fundamenttyper och antal.

Typ av pelarfundament	Antal
FPS-3RD-170/12,5-PTL3	40
FPS-4RD-170/12,5-PTL3	18
FPS-5RD-170/12,5-PTL3	12

5.3.3 Markförlagda pelarfundament

Med hjälp av RDE- verktyget dimensionerades markförlagda pelarfundamenten enligt standarderna SFS- EN 1992-1-1, SFS-EN 1997–1, samt Finland nationella bilagor. Både lastkombinationer i bruksgränstillstånd samt brottgränstillstånd har tagits i beaktande vid dimensioneringen av markförlagda pelarfundamenten. Markförlagda pelarfundamenten dimensionerades enligt de tidigare nämnda markförhållandena, på en grusbädd av 8–32 krossgrus, med en belastningskapacitet på 500 kN/m^2. Grusbädden samt fyllnadsmaterialet runt pelarfundamenten beräknades ha en friktionsvinkel på 36 grader.

Alla markförlagda pelarfundament beräknades som att betongplattan är direkt ovan pelarfundamenten, vilket betyder att laster på grund av fyllnadsmaterial ovan på pelarfundamenten beräknades som noll. Dessutom har samma belastningsytor använts på markförlagda pelarfundamenten, som på pelarfundamenten på betongpålar, med andra ord används pelar-skor med samma dimensioner.

I tabell 10 nedan redovisas med vilka fundamentdimensioner optimeringen samt dimensioneringen gav de minsta materialmängderna, beräknade enlig ovannämnda standarder och begränsningar.

Tabell 10. Markförlagda pelarfundamentens dimensioner.

Fundamenttyp	Antal	Lx (m)	Ly (m)	H (m)
A1	27	2,4	1,7	0,7
A2	26	3,2	2,7	0,9
A3	6	3,7	2,9	1,1
A4	11	3,3	4,1	1,2

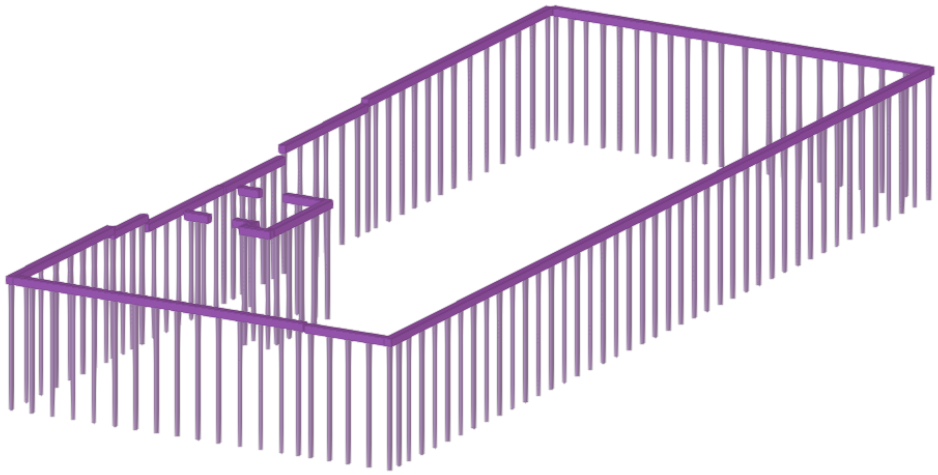
Tabell 11. Markförlagda pelarfundamentens armering.

Fund. typ	Botten (X)	Botten (Y)	Övre yta (X)	Övre yta (Y)	vertikala ytor
A1	16 T12 K100	9 T20 K290	17 T12 K100	9 T20 K290	2 T10 K380
A2	26 T20 K100	26 T16 K125	27 T20 K100	26 T16 K125	3 T10 K280
A3	28 T20 K100	30 T16 K125	29 T20 K100	30 T16 K125	5 T10 K220
A4	40 T16 K100	33 T20 K100	41 T16 K100	33 T20 K100	5 T10 K220

Materialmängderna samt växthusgasutsläppen beräknades för markförlagda pelarfundamenten enligt RDE-verktygets resultat som redovisas i (tabell 10, 11).

5.4 Fortlöpande fundamenten

För att kunna jämföra grundläggningsmetodernas växthusgasutsläpp, optimerades och dimensionerades även de fortlöpande fundamenten enlig samma utgångspunkter för de olika grundläggningsmetoderna. För att i denna undersökning kunna beräkna de fortlöpande fundamenten enligt samma utgångspunkter för de olika grundläggningsmetoderna, bestämdes att fundamenten dimensioneras enligt förenklade laster och lastfall jämfört med Eurokod och REFM-beräkningar. Dessutom konstaterades att fortlöpande fundamenten för forskningsobjektet beräknas som endast en profil, för varje grundläggningsmetod. I verkligheten skulle de fortlöpande fundamenten dimensioneras och optimeras mera exaktare enligt fundamentens placering och omständigheter, vilket skulle leda till flera olika typer av fortlöpande fundament men också en resurseffektivare dimensionering. I de två följande kapitlen (kap.5.4.1–5.4.2) förklaras hur de fortlöpande fundamenten dimensionerades för de olika grundläggning metoderna i denna undersökning. I figur 8 nedan redovisas strukturen på de fortlöpande fundamenten på betongpålar.



Figur 8. Fortlöpande fundamenten på betongpålar.

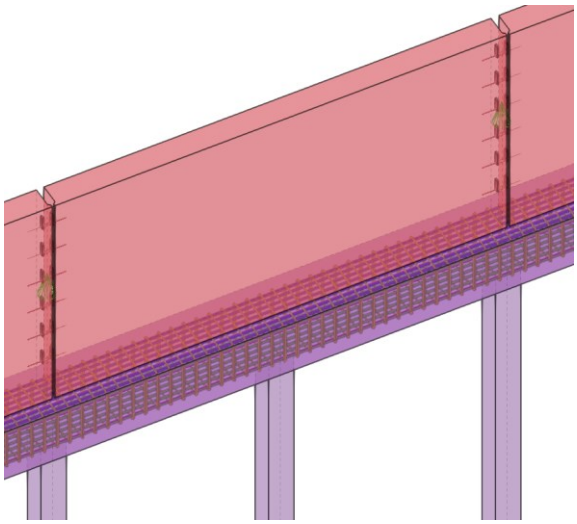
Fortlöpande fundamentens huvudsakliga uppgift för forskningsobjektet i denna undersökning, var att förmedla laster från källarvåningens övre mellanbjälklag och källarvåningens yttre väggelement, ner till den bärande berggrunden.

5.4.1 Fortlöpande fundament på pålar

Fortlöpande fundamenten dimensionerades på exakt samma sätt på både stålpålarna och betongpålarna. I dimensioneringen av fortlöpande fundamenten på pålar togs inte horisontella laster som påverkar fundamenten i beaktande. Som tidigare nämnt dimensioneras fortlöpande fundamenten som endast en profil för varje grundläggningsmetod. Fortlöpande fundamenten på pålar dimensionerades enligt lastfallen som gjordes på basen av följande antaganden och metoder:

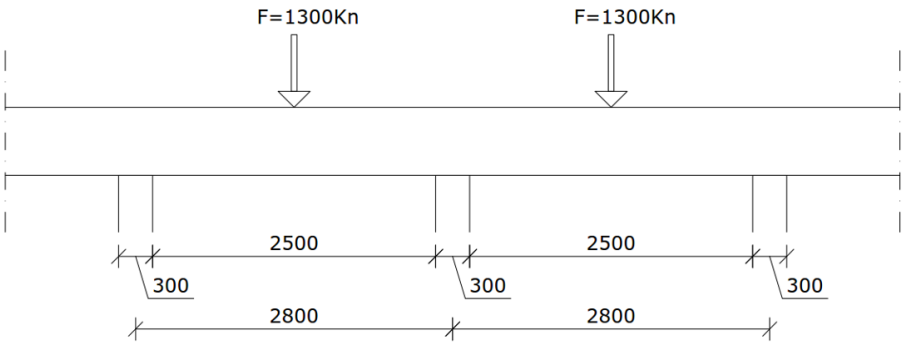
- De fortlöpande fundamenten dimensionerades som fortlöpande balkar
- Pålarna fördelades under fundamenten, så att en påle placeras rakt under varje väggelement samt rakt under varje element fog
- Spännvidden mellan pålarna beräknades enligt den längsta spännvidden då pålarna fördelades enligt metoden förklarad i föregående punkt.
- Laster som påverkar fundamenten beräknades som punktlaster på 1 300 kN, dessa laster placerades i mitten av spännvidderna, och verkade vertikalt neråt på mitten av fundamentet

I figur 9 nedan redovisar hur pålarna fördelades, på platsen var längsta spännvidden blev. I ett verkligt projekt skulle lasterna beräknas och pålarna placeras efter vad lasterna och standarderna kräver.

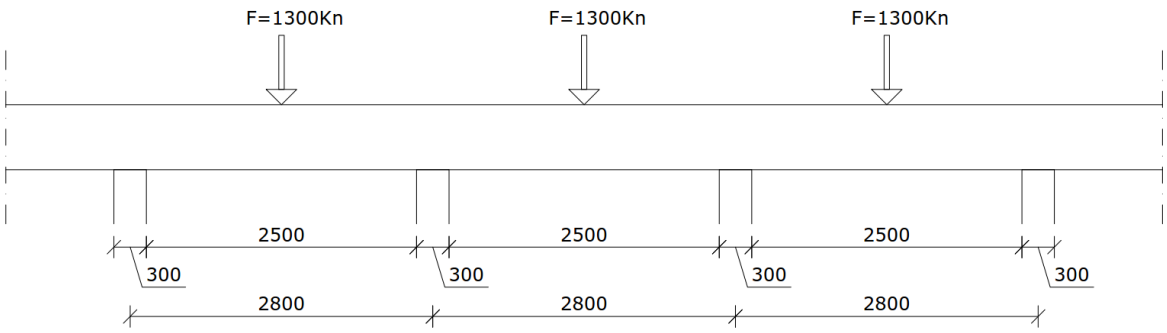


Figur 9. Pålarnas fördelning.

Punktlasternas storlek bestämdes genom att använda betongpålens maximala lastkapacitet. Enligt (Betoniteollisuus, 2021) har en RTC-300-16-PTL3 betongpåle en kapacitet på 1 300 kN. I figurerna 10 och 11 redovisas lastfallen som fortlöpande fundamenten på pålar dimensionerades enligt.

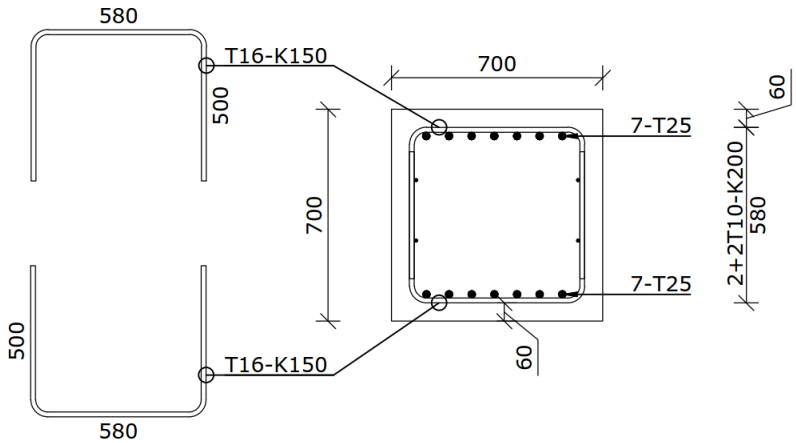


Figur 10. Lastfall 1 för dimensioneringen av fortlöpande fundamenten på pålar.



Figur 11. Lastfall 2 för dimensioneringen av fortlöpande fundamenten på pålar.

Enligt lastfallen ovan (se figur 10 och 11) gjordes en 2D modell i RFEM-programmet. Med hjälp av denna modell beräknades momenten och skjuvkrafterna, som uppstår i fortlöpande fundamentet. I beräkningarna med RFEM-programmet togs endast fundamentets egenvikt samt punktlasterna i beaktande. På basen av de högsta momenten och skjuvkrafterna, beräknades fortlöpande fundamentens dimensioner och armering, med hjälp av ett kalkylblad-beräkningsbotten som Ramboll Finland har gjort. Beräkningarna görs enligt standarden SFS-EN 1992-1-1 samt Finlandsnationella bilagor.

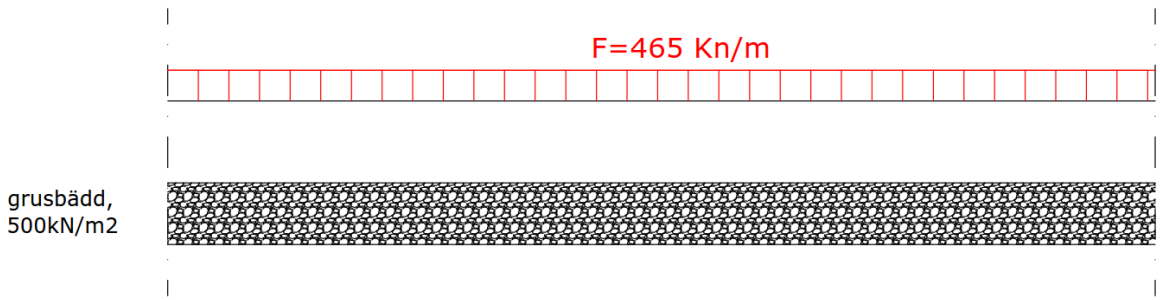


Figur 12. Armeringen och dimensionerna för de fortlöpande fundamenten på pålar.

I figur 12 ovan redovisas armeringsritningen som representerar slutresultaten av beräkningarna för fortlöpande fundamenten på pålar. Enligt figuren modellerades de fortlöpande fundamenten i Tekla modellen.

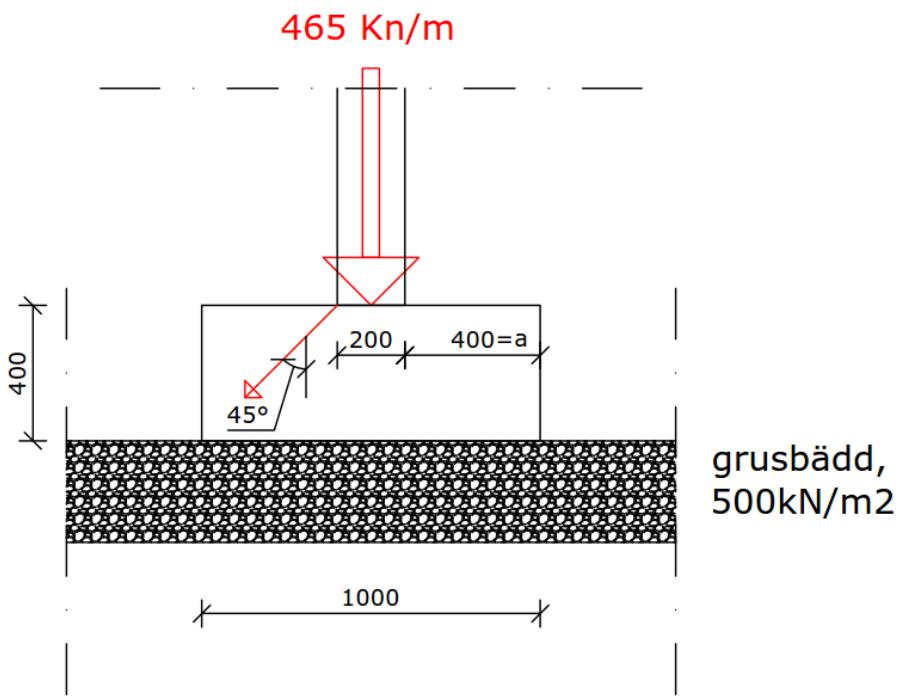
5.4.2 Markförlagda fortlöpande fundament

Markförlagda fortlöpande fundamenten dimensionerades enligt de tidigare nämnda markförhållandena, på en grusbädd av krossgrus 8–32, som i denna simulering har en belastningskapacitet på 500 kN/m^2. För att kunna jämföra grundläggningsmetodernas växthusgasutsläpp, måste de markförlagda fortlöpande fundamenten dimensioneras med samma laster som fortlöpande fundamenten på pålar, och dessutom simuleras som en markförlagd konstruktion. Därför modifierades lastfallet för fortlöpande fundamenten på pålar, (se figur 11 och 10) genom att fördela punktlasten 1 300 kN på spännvidden 2,8 meter, vilket resulterade med en linje-last på 465 kN/m. I figur 13 nedan redovisas lastfallet vilket de markförlagda fortlöpande fundamenten dimensionerades enligt.



Figur 13. Lastfall för markförlagda fortlöpande fundamenten.

Utifrån ovan beskrivna lastfall beräknades att de markförlagda fortlöpande fundamenten blir 1 meter breda. Dessutom antogs att alla väggelement ovan på fortlöpande fundamenten var 200 mm tjocka, och att vägg-lasterna fördelas i fortlöpande fundamenten med en 45 graders vinkel. På basen av dessa antaganden konstaterades att höjden på de fortlöpande fundamenten bör vara minst lika hög som måttet a (se figur 14), de vill säga måttet från väggelementets yttre kant till fortlöpande fundamentets yttre kant. Med ett 1000 millimeter brett fundament och ett väggelement med brädden 200mm i centrum av fundamentet blir a måttet 400millimeter. Om vägg-lasterna beräknas fördela sig med en 45 graders vinkel i fundamentet, bör även höjden på fortlöpande fundamentet vara minst 400millimeter. Detta för att fördela lasterna till marken genom den fulla bredden av fundamentet (se figur 14).



Figur 14. Skärning, markförlagda fundamenten.

Armeringen för markförlagda fundamenten beräknades endast med att ta minimiarmeringskravet i beaktande. Enligt standarden (SFS-EN 1992-1-1, 2004) beräknas den minsta tvärsnittsarea för armeringen i längsgående riktning av en balk enligt följande formel:

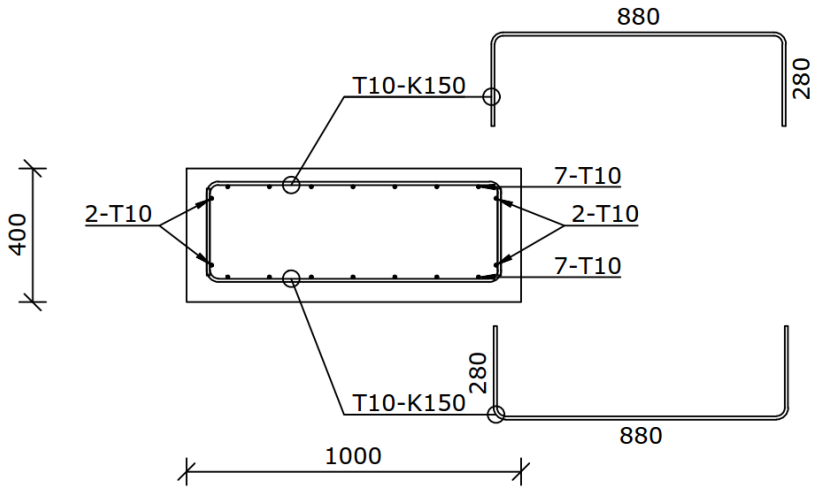
$$A_{s,min} = \max av \begin{cases} 0{,}26 \times \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \times b_t \times d \\ 0{,}0013 \times b_t \times d \end{cases} \qquad (1)$$

Denna formel beräknades enligt måtten på fundamenten som redovisas i figur 14 samt med följande utgångspunkter:

- Ett täckskikt för armeringen på 60 mm mot marken
- Betongklass C30/37
- Armeringens hållfasthetsklass B500B.

Beräkningarna resulterade i att armeringen bör vara minst T10 CC150, för att minimiarmeringskravet skall uppfyllas. De vill säga armeringsstänger med en diameter på

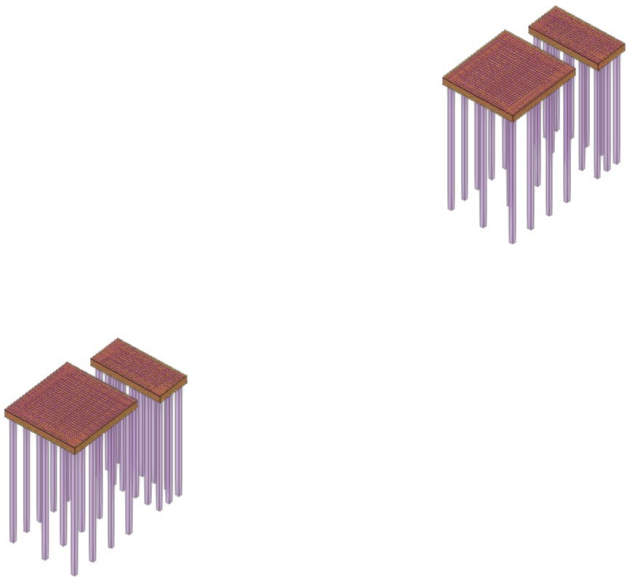
10 millimeter skall placeras med en fördelning på högst 150 millimeter i fundamentets undre kant. Fast denna beräkning endast berör armeringen i längsgående riktning och i nedre kanten av fundamentet, bestämdes att samma armering används i fundamentets alla ytor och i båda riktningar. I figur 15 nedan redovisas armeringen samt slutresultatet för beräkningen av de markförlagda fortlöpande fundamenten. Enlig denna figur modellerades de markförlagda fortlöpande fundamenten i Tekla modellen.



Figur 15. Armeringen och dimensionerna för de markförlagda fortlöpande fundamenten.

5.5 Fundamenten under schakten

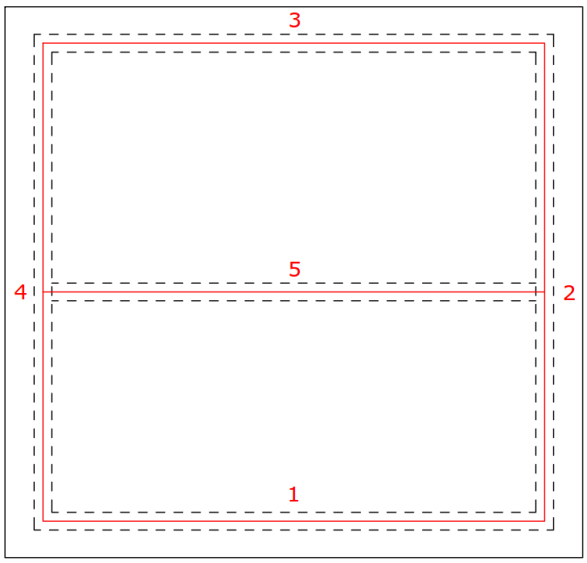
Lasterna som påverkar fundamenten under schakten beräknades med hjälp av RFEM-modellen som Ramboll Finland har gjort. Beräkningarna och lastkombinationerna följer eurokoderna som råder (SFS-EN1990), och Finlands nationella bilagor. Vid dimensioneringen av fundamenten under schakten i denna undersökning, har horisontella och lyftande krafter inte tagits i beaktande. Detta innebär att fundamenten dimensionerades endast med att ta i beaktande vägg-lasterna, som verkar vertikalt ner på fundamenten. I figur 16 nedan redovisas konturerna på fundamenten under schakten som står på betongpålar. Dessa fundaments huvudsakliga uppgift är att leda krafterna kontrollerat från schaktens väggelement till stadig bärande grund.



Figur 16. Fundamenten under schakten som står på betongpålar.

5.5.1 Pålfundamenten under schakten

Vid dimensioneringen av pålfundamenten under schakten i denna undersökning, togs endast lastkombinationer som är beräknade i brottgränstillstånd i beaktande. I figur 17 nedan redovisas ett exempel på hur vägg-linjerna fördelades, med rött, samt hur väggelementen var placerade på ett av dessa fundament med streckade linjer.



Figur 17. Vägg-linjernas fördelning.

Pålfundamentens dimensioner bestämdes genom att lägga till 300 millimeter utåt, från väggelementens yttre ytor. På basen av ritningarna för forskningsobjektet, som Ramboll Finland hade gjort, konstaterades att pålfundamenten under schakten blir 600 millimeter höga. Pålarnas antal och fördelning under fundamenten beräknades enligt vägg-linjens största vertikala last.

Som ett exempel, om den största vertikala lasten för en vägg-linje, beräknad enligt RFEM-modellen var 323kN/m, beräknades pålarnas antal och fördelning genom att multiplicera lasten (323kN/m) med vägg-linjens bredd (5,65 meter), och dividera med pålens maximala lastkapacitet, se ekvation (2). Enligt (Betoniteollisuus, 2021) har en RTC-300-16-PTL3 betongpåle en kapacitet på 1300kN. Nedan visas beräkningsexemplet.

$$\frac{323kN/m \times 5{,}650m}{1300kN} = 1{,}40\ st. \qquad (2)$$

Enligt detta exempel, skulle två RTC-300-16-PTL3 betongpålar placeras under vägg-linjen i fråga. På samma sätt beräknades pålfördelningen för alla vägg-linjer på alla pålfundament under schakten. Pålarna placerades under fundamenten med hänsyn till pålarnas minimiavstånd från varandra. Dessutom beräknades den totala vertikala lasten som påverkar på de enskilda fundamenten, genom att summera alla vägg-linjers högsta vertikala laster. Den totala vertikala lasten på de enskilda fundamenten under schakten, fördelades med pålarnas totala kapacitet under fundamentet, och granskades att 85 procent av pålarnas totala kapacitet inte överskreds.

Pålfundamenten på stålpålarna beräknades enligt exakt samma metod, men med en annan lastkapacitet för stålpålarna. Enligt manualen (SSAB, u.å. B) har en RD170/12,5 stålpåle en dimensionerande tryckhållfasthet på 1265 kN, då dimensioneringen följer följande aspekter:

- Stålpålens inre sida fylls med betong (hållfasthets klass C30/37)
- 2,0 millimeter korrosionsmån
- Marken runt pålen beräknas ha en skjuvhållfasthet på 7 kilopascal

Stålpålarna valdes att dimensioneras som att de fylls med betong, för att minska korrosionen på pålens inre sida. Betongen i stålpålarnas insida tas även i beaktande i beräkningarna för växthusgasutsläppen. I denna undersökning skulle marken under pålkonstruktionerna simuleras med dåliga egenskaper, vilket en mark med en skjuvhållfasthet på 7 kilopascal kan betraktas som.

Med dessa beräkningsmetoder antogs att resultaten kommer tillräckligt nära de verkliga slutresultaten som behövs för denna undersökning. Dock bör man ta i beaktande att till exempel lyftande krafter inte har tagits i beaktande. Om lyftande krafter skulle orsaka drag i pålarna, kan man till exempel använda sig av en kombination av dragankaren, som appliceras fast i berggrunden, och stålpålar. Lyftande krafter orsakar också moment i fundamenten, vilket påverkar dimensioneringen av armeringen. Dessutom har inte horisontella krafter tagits i beaktande, vilka oftast brukar ledas ner till stadig grund genom snedslagna pålar.

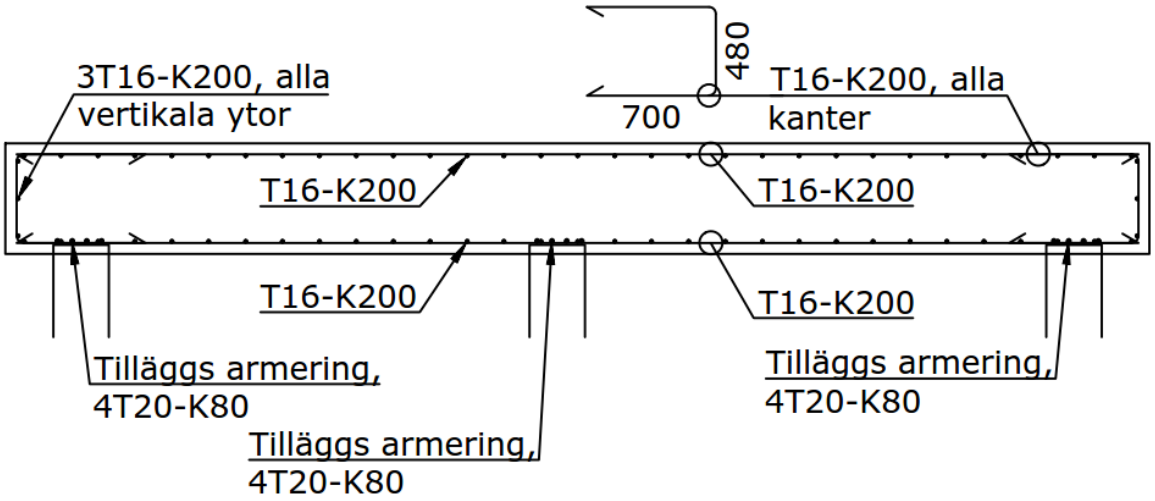
Armeringen för pålfundamenten under schakten dimensionerades enligt minimiarmeringskravet. Enligt standarden SFS- EN 1992-1-1 beräknas den minsta tvärsnittsarea för armeringen enligt formel (1) som redovisas i (kap.5.4.2). Formeln beräknades enligt följande utgångspunkter:

- En bredd på 1000 millimeter
- Höjd på 600 millimeter
- Ett täckskikt för armeringen på 60 mm, mot marken
- Betongklass C40/50
- Armeringens hållfasthetsklass B500B.

Beräkningarna resulterade i att armeringen bör vara minst T16 CC200, för att minimiarmeringskravet skall uppfyllas. De vill säga armeringsstänger med en diameter på 16 millimeter skall placeras med en fördelning på högst 200 millimeter, från centrum till centrum.

Enligt minimiarmeringskravet armerades fundamentets övre och nedre kant i båda riktningar samt byglarna i fundamentens yttre kanter. Dessutom tillades fyra 20 millimeter

tjocka armeringsstänger i alla pål-linjer i fundamentets nedre yta. Detta som tilläggsarmering för att försäkra att lasterna på fundamenten leds till pålarna. I figur 18 nedan redovisas hur armeringen modellerades i Tekla modellen för pålfundamenten under schakten, på både stålpålar och betongpålar.

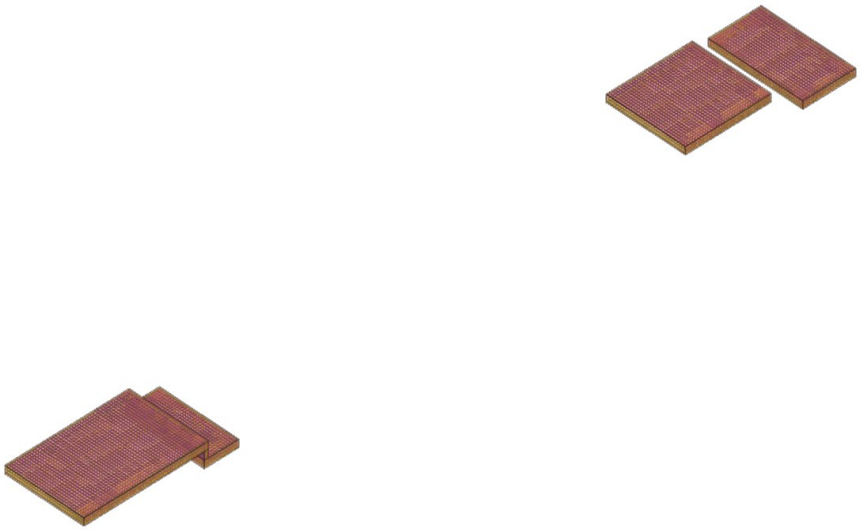


Figur 18. Armering för pålfundamenten under schakten.

5.5.2 Markförlagda fundament under schakten

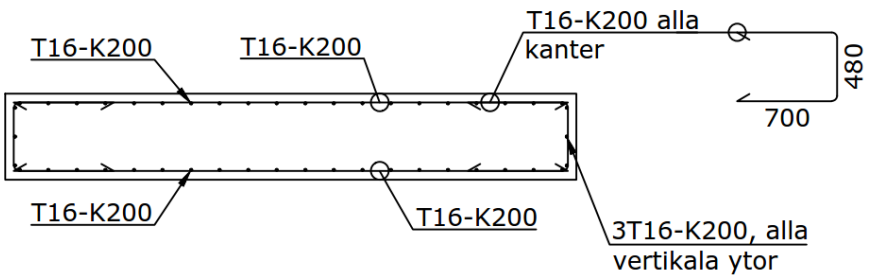
Lasterna som påverkar de markförlagda fundamenten under schakten beräknades på samma sätt som på pålfundamenten under schakten, men lastkombinationer både i brottgränstillstånd och bruksgränstillstånd togs i beaktande. Horisontella eller lyftande krafter togs inte i beaktande.

För att kunna bestämma dimensionerna för de markförlagda fundamenten under schakten beräknades först, den totala vertikala lasten på varje enskilda fundament, genom att summera de största vertikala lasterna för varje enskild vägg-linje på fundamentet. På basen av den totala vertikala lasten som påverkar på fundamentet, beräknades fundamentets area mot marken, så att högst 85 procent av markens maximala lastkapacitet (500kN/m^2) användes. Enlig denna metod blev ett av schaktens area mot marken, så pass stor, att fundamentet sammankopplades med det bredvid liggande fundamentet, för att markenskapacitet skulle vara tillräcklig. I figuren 19 nedan redovisas konturerna för hur de markförlagda fundamenten under schakten modellerades i Tekla-modellen.



Figur 19. Markförlagda fundamenten under schakten.

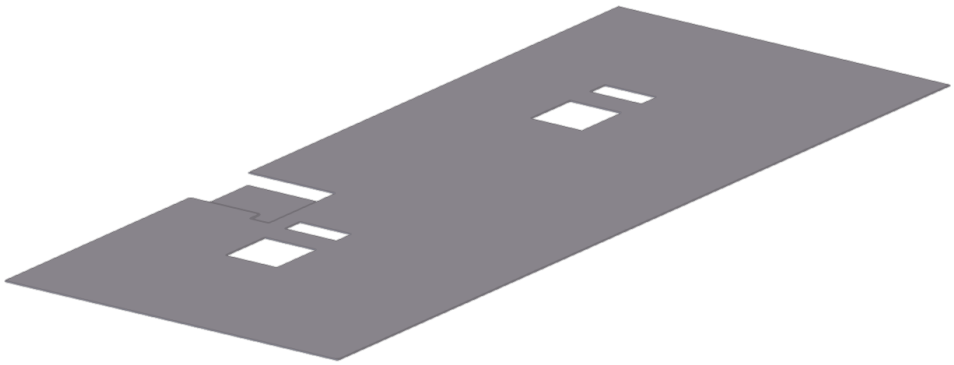
På basen av ritningarna för forskningsobjektet, som Ramboll Finland hade gjort, konstaterades att alla markförlagda fundamenten under schakten blir 600 millimeter höga. Armeringen beräknades enligt minimiarmeringskravet på exakt samma sätt som för pålfundamenten under schakten (kap.5.5.1). Beräkningarna resulterade i att armeringen bör vara minst T16 CC200, för att minimiarmeringskravet skall uppfyllas. Enligt minimiarmeringskravet armerades fundamentets övre och nedre kant i båda riktningar samt byglarna i fundamentens yttre kanter. I figur 20 nedan redovisas hur armeringen för de markförlagda fundamenten modellerades i Tekla modellen.



Figur 20. Armeringen för markförlagda fundamenten under schakten.

5.6 Källarvåningens golvplattor

I denna undersökning beräknades mängden material för golvplattorna utan att ta i beaktande rörelsefogar, plattornas byglar, eller armeringens skarvlängder. I figur 21 nedan redovisas konturerna hur den markförlagda golvkonstruktionen modellerades i Tekla modellen.



Figur 21. Markförlagda golvkonstruktionen.

De markförlagda plattorna modellerades på basen av ritningen för den huvudsakliga konstruktionstypen, för forskningsobjektets golvkonstruktion mot mark, som Ramboll Finland hade gjort. Enligt ritningen skulle plattan konstrueras enligt följande punkter:

- 120 millimeter tjock platta
- Huvudarmering görs med armeringsnät 10–150, B500K i både övre och nedre yta av plattan
- Betongklass C35/45

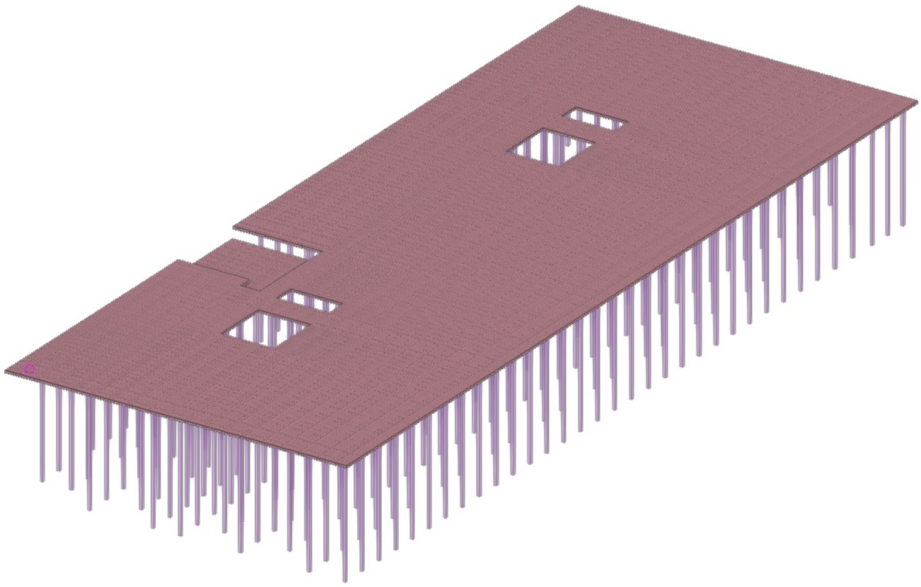
Enligt dessa punkter modellerades markförlagda plattorna i Tekla modellen.

golvplatta på pålar

På basen av ritningar som Ramboll Finland har gjort för tidigare projekt, och med tanke på att i modellen modellerades endast huvudarmeringen, konstaterades att golvplattorna på både stålpålar och betongpålar, konstrueras enligt följande:

- Golvkonstruktionerna konstruerades som 300 millimeter tjocka betongplattor stödda direkt på pålar.
- Pålarna placeras under plattorna med 3 meters fördelning.
- Huvudarmering, armeringsnät 12–150, B500K i både övre och nedre yta av plattorna

Enligt dessa punkter modellerades markförlagda plattorna i Tekla modellen.



Figur 22. Golvplattan på betongpålar.

I figur 22 ovan redovisas konturerna för hur golvkonstruktionen på betongpålar modellerandes i Tekla modellen. I följande kapitel förklaras mera specifikt hur växthusgasutsläpps beräkningarna begränsades i denna undersökning, och vad som bör tas i beaktande vid analyseringen av beräkningsresultaten.

5.7 Växthusgasutsläppsberäkningar

Omfattningen för växthusgasutsläppsberäkningarna i detta examensarbete innebär som sagt, att undersöka de bärande grundkonstruktionerna, som förändras beroende på grundläggningsmetoden. Detta innebär att beräkningarna omfattar endast en del av konstruktionen samt att byggnadens hela livscykeln inte undersöks. För att uppnå samma datakvalitet i de olika grundläggningsmetodernas växthusgasutsläppsberäkningar, har

informationen om materialens växthusgasutsläpp tagits från samma klimatdatabas, Co2data.fi.

Ett annat alternativ till att använda produktspecifika EPD: er för beräkning av växthusgasutsläpp, är att använda generella databaser med klimatdata på olika produkter. I Finland har miljöcentralen låtit uppgöra en nationell klimatdatabas, Co2data.fi, på uppdrag av miljöministeriet. Databasen innehåller opartisk och genomsnittlig klimatdata för de vanligaste byggprodukterna i Finland, samt klimatutsläppsdata för de vanligaste byggnadsprocesserna och- tjänsterna som till exempel transport, byggande och avfallshantering. (Syke, 2021)

Beräkningarna för växthusgasutsläppen i denna undersökning, begränsas enligt följande:

- Endast produktskede (A1-A3) tas i beaktande
- Utsläppsdata, endast från klimatdatabasen Co2data.fi
- Endast materialen för de bärande grundkonstruktionerna, beräknade utan spill
- Alla pålar beräknas som 15 meter långa, både betongpålarna och stålpålarna
- Pålarnas växthusgasutsläpp beräknas endast på basen av koldioxidekvivalenten per löpmeterpåle, vilket betyder att följande delar inte tas med i beräkningarna:
    - Pålhattar
    - Pålskor
    - Pålskarvar

Endast materialen för de bärande grundkonstruktionerna, innebär att endast materialen för konstruktionsdelarna som dimensionerades i tidigare kapitel (kap.5.3–5.6) inkluderas i beräkningarna för växthusgasutsläppen. Med andra ord beräknas endast växthusgasutsläpp på basen av betongmängden, armeringsmängden samt pålarnas växthusgasutsläpp.

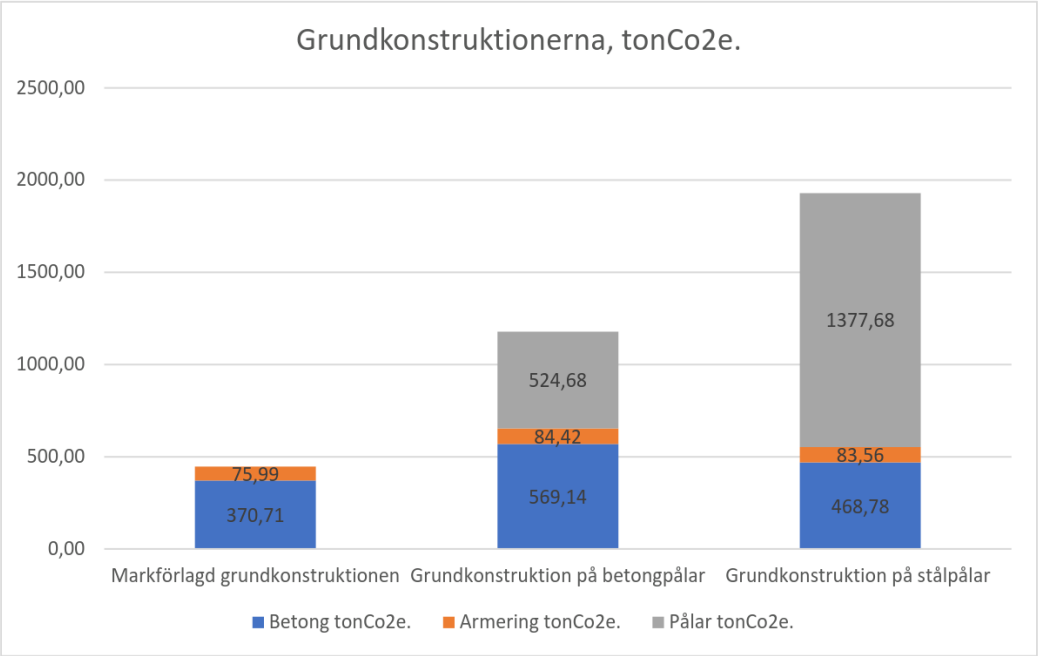
6 Resultat och slutsatser

Syftet med examensarbetet var att jämföra växthusgasutsläppen mellan tre olika grundläggningsmetoder, samt ta reda på vilka är de största faktorerna gällande grundläggningsförhållandena, som påverkar grundkonstruktionernas koldioxidfotavtryck. I detta kapitel jämförs resultaten för växthusgasutsläppen mellan de tre grundkonstruktionerna, varefter faktorerna gällande grundläggningsförhållandena som har största påverkan på grundkonstruktionernas koldioxidfotavtryck presenteras. Den första grundkonstruktionen i tabell 12 nedan, är markförlagda grundkonstruktionen, var betongmängden och armeringsmängdens totala växthusgasutsläpp beräknades bli 446,7 ton CO_2e. Se bilaga nummer 1.

Den andra grundkonstruktionen i tabell 12 nedan är grundkonstruktionen på betongpålar, var betongmängden, armeringsmängden och pålarnas totala växthusgasutsläpp beräknades bli 1178,2 ton CO_2e. Se bilaga nummer 2. Observera att utsläppsdata för en RTC-300 betongpåle, finns ej i klimatdatabasen Co2data.fi. På grund av detta konstaterades att koldioxidekvivalenten för en RTB-300 betongpåle används i beräkningarna för växthusgasutsläppen, fast dimensioneringen av grundkonstruktionen på betongpålar dimensionerades enligt kapaciteter för RTC-300 betongpåletypen. Skillnaden mellan dessa två påltyper är betongklassen, se (tabell 5) i (kap.4.2.2) vilket betyder att beräkningarna för växthusgasutsläppen för betongpålarna är beräknade med en lägre betongklass, en vad som användes i dimensioneringen.

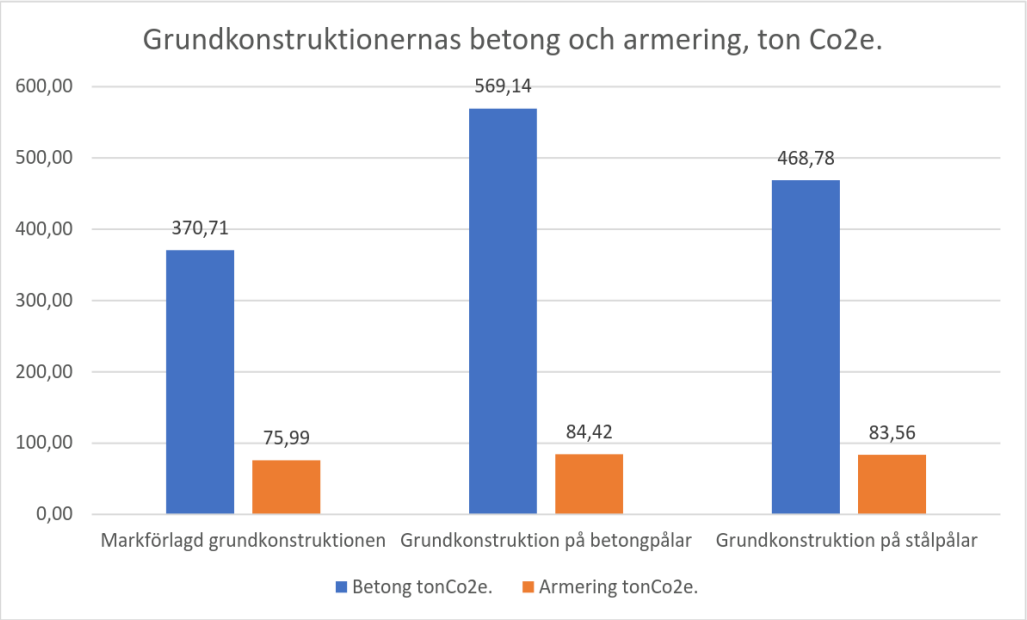
Den tredje grundkonstruktionen i tabell 12 nedan är grundkonstruktionen på stålpålar, var betongmängden, armeringsmängden och pålarnas totala växthusgasutsläpp beräknades bli 1930,0 ton CO_2e. Se bilaga nummer 3. Vid analysering av dessa resultat bör man ta i beaktande, dimensioneringsmetoderna och begränsningarna, som redovisas i (kap.5). I tabell 12 redovisas de totala växthusgasutsläpp som uppstår i produktskede (A1-A3) från betongen, armeringen och pålarna, skilt för de olika grundkonstruktionerna.

Tabell 12. Växthusgasutsläppsberäkningarnas resultat (A1-A3).



På basen av tabell 12 kan man konstatera att stålpålarna orsakar en stor del växthusgasutsläpp, var betongen i stålpålarna står för endast 56,4 ton CO_2e. vilket motsvarar cirka 4 procent av stålpålarnas totala utsläpp. För att bättre kunna jämföra grundkonstruktionernas växthusgasutsläpp, visas resultaten utan pålarnas växthusgasutsläpp i tabell 13. Detta betyder att endast betongen och armeringens växthusgasutsläpp för grundkonstruktionernas pelarfundament, fortlöpande fundament, golvplattor och fundamenten under schakten, visas i tabell 13 nedan.

Tabell 13. Växthusgasutsläppsberäkningarnas resultat utan pålarnas utsläpp (A1-A3).



I tabell 13 ovan redovisas att växthusgasutsläppen för grundkonstruktionerna på spetsburna pålar beräknades bli större än markförlagda grundkonstruktionen, trots att pålarna inte är med beräknade.

Trots förenklade beräkningar, kan vi konstatera att grundläggningsförhållandena påverkar väldigt mycket på dimensioneringen av konstruktionerna samt optimeringen av konstruktionsmaterialen, vilket påverkar växthusgasutsläppen. Små förändringar i grundläggningsförhållandena som konstruktionerna dimensioneras enligt, kan ändra resultaten rejält. Resultaten som redovisas i tabellerna ovan (tabell 12, 13) skulle ändra en hel del om man skulle till exempel beräkna med andra lastkapaciteter på marken under fundamenten. Resultaten ger oss riktgivande information om skillnaderna för växthusgasutsläppen beroende på grundläggningsmetoden som används, men även vilka grundläggningsförhållanden som kunde undvikas.

På basen av litteraturstudien samt beräkningarna i detta examensarbete kan vi konstatera att de största faktorerna gällande grundläggningsförhållandena, som påverkar grundkonstruktionernas koldioxidfotavtryck, är följande:

- Markens lastkapacitet och jordlagren hållfasthet
- Användning av klimatvänliga byggnadsmaterial
- Optimering av byggnadsmaterial
- Faktorer som orsakar grävningsarbete
    - Byggnadens grundläggningsnivå
    - Markenslutning
- Faktorer som orsakar mera transporter
    - Massutbyte
    - Förorenad mark
    - över dimensionering (byggnadsmaterialen optimeras dåligt)

Faktorer gällande grundläggningsförhållanden som påverkar på koldioxidfotavtrycket är fler än ovannämnda faktorer, men enlig denna undersökning har dessa faktorer största påverkan på koldioxidfotavtrycket.

På basen av denna undersökning kan det konstateras att valet av tomt kan ha en stor inverkan på grundkonstruktionernas växthusgasutsläpp. Dessutom kan man konstatera att en tidigt utförd och kvalitativ projektering, kan reducera rejält på växthusgasutsläppen men även kostnaderna för ett byggnadsprojekt. Detta kan åstadkommas med till exempel tidigt gjorda grundundersökningar, livscykelanalyser och markanvändningsplaner, men även genom att använda material med låga utsläpp i produktens hela livscykel eller återvunnet material. Detta kräver materialkunskaper av hela byggsektorn men även mera undersökningar om koldioxidsnålt byggande.

Efter att ha studerat grundläggningsförhållandenas påverkan på koldioxidavtrycket av nya flervåningsbyggnader, kan jag konstatera att denna undersökning täcker en väldigt liten del av ämnet. Pålgrundkonstruktioner kan ur växthusgasutsläpps synvinkel konstateras vara ett dåligt alternativ. Men om tomten är vald med dåliga markförhållanden kan pålning vara en bättre lösning jämfört med till exempel massutbyte, speciellt om man ser på hela byggskedet (A1-A5). Hur grundläggningsförhållandena påverkar hela byggnadens utsläpp skulle även vara ett intressant ämne, dock anser jag att för att göra fullständiga livscykelanalyser av byggnader behövs mycket mera information och klimatdata.

Målet med examensarbetet var dels att öka mina personliga kunskaper om grundkonstruktioner och klimatsnålt byggande. Kort skrivet har jag lärt mig nytt inom geoteknik, koldioxidsnålt byggande, dimensionering och projektering av grundkonstruktioner, men även kunskaper om flera olika dataprogram. Målet var även att sprida information om, grundkonstruktioner och klimatsnålt byggande, vilket jag hoppas att detta examensarbete bidrar till. Ämnet var intressant och lärdomen har varit väldigt bred, och med det sagt anser jag att målet är uppnått.

7 Källor

Betoniteollisuus. (2021) *Vakiopaaluanturat suunnittelijan ohje.* [manual] Hämtad 15.3.2023 från

https://betoni.com/suunnittelu/perustussuunnittelu/suunnittelun-apuvalineita/vakiopaaluanturaohje/

Boverket. (2019. a) *Mer om miljövarudeklaration för byggprodukter (EPD).* Hämtat 24.7.2022 från

https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/miljodata-och-lca-verktyg/miljovarudeklaration-for-byggprodukter-epd/

Boverket. (2019. b) *Introduktion till livscykelanalys (LCA).* Hämtat 15.8.2022 från

https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/introduktion-till-livscykelanalys-lca/

Boverket. (2019. c) *Vad visar en LCA?.* Hämtat 15.8.2022 från

https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/livscykelanalys/vad-visar-en-lca/

Construsoft. (u.å). *From concept to production with Tekla structures.* Hämtat 20.12.2022 från

https://www.construsoft.com/bim-software/tekla-structures

Dlubal. (u.å.) *RFEM 5, FEA structural analysis software.* Hämtat 20.12.2022 från

https://www.dlubal.com/en/products/rfem-5/what-is-rfem

Hercules Grundläggning. (2018) *Betongpåleboken.* [broschyr]Hämtat 30.8.2022 från

https://hercules.se/wp-content/uploads/2174-2004-Brochure_Hercules_Betongp%C3%A5lehandboken_A5_VERS7.pdf

Holm, V. (2017). *Grundläggande ansats för byggnadsentreprenader*. Ingenjörsexamen (YH). Institutionen för teknik och sjöfart. Vasa: Yrkeshögskolan Novia. Hämtad från

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/125958/Holm_Viktor.pdf;jsessionid=4E58FD5A03C2DD118EBCFF2A37F8E636?sequence=1

Hämäläinen, I. (2022). *Kuljetukset* (version 24.10.2022). Syke.

https://co2data.fi/infra/reports/INFRA%20kuljetukset%20R01.00.pdf

Jääskeläinen, R. (2014). *Geotekniikan perusteet*. Tammerfors: Tammertekniikka.

Jääskeläinen, R. (2010). *Maarakennuksen ja louhinnan perusteet*. Tammerfors: Tammertekniikka.

Jääskeläinen, R. (2016). *Pohjarakennuksen perusteet*. Tammerfors: Tammertekniikka.

Kiilsgaard, R. (2019). *Förutsättningar att bedöma klimatpåverkan från grundläggning och grundkonstruktioner*. Statens geotekniska institut.

https://www.sgi.se/contentassets/9feca5bb630e43ac9593b2f0ea78315c/rapport-klimatpaverkan-grundlaggning-2019.pdf

Liikennevirasto. (2017) *Eurokoodin soveltamisohje- Geotekninen suunnittelu-NCCI7.* [manual] Hämtad 1.12.2022 från

https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/134574/lo_2017-13_ncci7_web.pdf?sequence=2

Lindqvist, E. (2022). *EPD-ympäristöselosteet rakennusalan ympäristövaikutusten ohjaamisessa*. Högre ingenjörsexamen (högre YH). Hållbart byggande. Villmanstrand: LAB-amattikorkeakoulu. Hämtad från

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/782015/Lindqvist_Elisa.pdf?sequence=2

Linjama, J. (2022). *Työkoneet* (version 7.11.2022). Syke.

https://co2data.fi/infra/reports/INFRA%20ty%C3%B6koneet%20R01.00.pdf

Matthew, B. (2012) *Greenhouse gases, co2, co2e, and carbon: What do all these terms mean?* Hämtat 11.9.2022 från

https://ecometrica.com/assets/GHGs-CO2-CO2e-and-Carbon-What-Do-These-Mean-v2.1.pdf

Miljöministeriet. (u.å.a) *koldioxidsnålt byggande.* Hämtat 16.8.2022 från

https://ym.fi/sv/koldioxidsnalt-byggande

Miljöministeriet. (u.å.b) *Färdplan för koldioxidsnålt byggande.* Hämtat 16.8.2022 från

https://ym.fi/sv/fardplanen-for-koldioxidsnalt-byggande

Miljöministeriet. (2023) *Riksdagen antog lagar som minskar utsläppen från byggande och främjar digitalisering.* Hämtat 22.3.2023 från

https://ym.fi/sv/-/riksdagen-antog-lagar-som-minskar-utslappen-fran-byggande-och-framjar-digitalisering

Naturvårdsverket. (u.å.) *Andra växthusgaser.* Hämtat 12.9.2022 från

https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatforandringar/darfor-blir-det-varmare/andra-vaxthusgaser

Nordtec. (u.å.) *Kortfattad fakta om koldioxid (CO_2).* Hämtat 28.10.2022 från

https://www.nordtec.se/fakta-matteknik/koldioxid

Närings-, trafik- och miljöcentralen. (2023) *Förorenad mark eller förorenat grundvatten.* Hämtat 23.1.2023 från

https://www.ely-keskus.fi/sv/pilaantunut-maapera-tai-pohjavesi

Olsson,C, &Holm,G. (1993). Påltyper. *Pålgrundläggning* (s.53-66)

https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/ovrigt/handbok-palgrundlaggning/kapitel3-paltyper.pdf

Rakennusteollisuus. (2018) *PO-2016 mukaiseen paalutuksen suunnitteluun ja paalutustyöhön RT betonipaaluilla.* [produktblad]Hämtat 30.8.2022 från

https://betoni.com/wp-content/uploads/2018/09/RT-Betonipaalut-Tuotelehti-PO-2016.pdf

Rakennusteollisuus. (2020, a) *Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035-Osa 4. Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyyden tiekartta 2020 - 2035 – 2050*.

https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys_uudet/rt_4.-raportti_vahahiilisyyden-tiekartta_lopullinen-versio_clean.pdf

Rakennusteollisuus. (2020, b) *Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035-Osa 2. Vähähiilisyyden mahdollisuuksien tarkastelu*.

https://www.rt.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiili_seminaaries/raportit_lopulliset/rt-raportti-2_vahahiilisyyden-mahdollisuudet_final.pdf

Rakli. (2015). *Selvitys kaavamääräysten kustannusvaikutuksista*. Hämtat 6.12.2022 från

https://www.rakli.fi/wp-content/uploads/2019/06/kaavamaaraysten_kustannusvaikutukset_raportti_nettires.pdf

Ramboll. (u.å. a). *Yritys.* Hämtat 11.12.2022 från

https://fi.ramboll.com/ramboll_finland_oy

Ramboll. (u.å. b). *Rambollin arvot ja historia.* Hämtat 11.12.2022 från

https://fi.ramboll.com/ramboll_finland_oy/arvot-ja-historia

RIL 121-2004 (2004). *RIL 121-2004 Pohjarakennusohjeet*. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry

RIL 132-2000 (2000). *RIL 132-2000 Talonrakennuksen maarakenteet -yleinen rakennusselostus ja laatuvaatimukset.* Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry

RIL 254-2016 (2016). *RIL 254-2016 Paalutusohje*. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry & Suomen Geoteknillinen Yhdistys SGY ry.

Rudus. (u.å.). *Mitä mursketta tai soraa rakennuksen perustuksissa käytetään.* Hämtat 23.1.2023 från

https://www.rudus.fi/kotipolku/maanrakennus/tolkkua-tuotevalintaan/neuvoja-tontin-kiviainesten-valintaan

Saint-Gobain. (2020) *EPD, vad är det?.* Hämtat 28.10.2022 från

https://www.saint-gobain.se/news/epd-vad-ar-det

SFS-EN-15978:2011. (2011). *Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method.* Hämtat 25.10.2022 från

https://online.sfs.fi/

SFS-EN 1992-1-1. (2004). *Eurocode 2: Betonirakenteiden suunittelu. osa 1-1:yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.* Hämtat 27.10.2022 från

https://online.sfs.fi/

SSAB. (u.å. a) *SSAB:s stålrörspålar.* [broschyr]Hämtat 17.9.2022 från

https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/se/infra/ssab_stalrorspalar.pdf?m=20160127101012

SSAB. (u.å. b) *RR- och RD -pålar.* [manual] Hämtad 17.9.2022 från

https://www.ssab.com/en/brands-and-products/steel-categories/steel-piles-and-pressure-pipes/product-offer/micropiles

SSAB. (2022) *Perustukset, teräsbetoniset vakiopaaluanturat RR- ja RD-paaluille (FPS).* [manual] Hämtad 15.3.2023 från

https://www.ssab.com/fi-fi/uutiset/2023/02/updated-standard-pile-caps

Statsrådet. (u.å.) *ett klimatneutralt Finland som tryggar den biologiska mångfalden.* Hämtat 22.10.2022 från

https://valtioneuvosto.fi/sv/marin/regeringen/regeringsprogrammet/klimatneutralt-finland-som-tryggar-den-biologiska-mangfalden

Syke. (2022, a) *LCA- Life cykle assessment supports sustainability transformations.* Hämtat 11.9.2022 från

https://www.syke.fi/en-US/LCA

Syke. (2022, b) *Rakentamisen päästötietokanta.* Hämtat 9.3.2023 från

https://co2data.fi/rakentaminen/

Syke. (2022, c) Infra*rakentamisen päästötietokanta.* Hämtat 9.3.2023 från

https://co2data.fi/infra/

Syke. (2021) *Klimatdatabasen för byggande co2data.fi.* Hämtat 16.12.2022 från

https://www.hiilineutraalisuomi.fi/sv-FI/Verktyg_och_tjanster/Klimatdatabasen_for_byggande

Taloon. (u.å.) Routa. Hämtat 11.3.2023 från

https://www.taloon.com/rakentajan-tietopankki/perustukset/routa

The international EPD system. (u.å.) *The EPD world at your feet.* Hämtat 25.7.2022 från

https://www.environdec.com/about-us/global-house-of-epd

Trafikverket. (2005) *Massutskiftning.* [teknisk beskrivning] Hämtat 23.1.2023 från

https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10276/RelatedFiles/2005_004_massutskiftning.pdf

Vares, s. (2022, A). *Luonnonkivi- ja luonnonkivituotteet* (version 11.08.2022). Syke.

https://co2data.fi/infra/reports/INFRA%20luonnonkivituotteet%20R01.01.pdf

Vares, s. (2022, B). *Terästuotteet* (version 26.07.2022). Syke.

https://co2data.fi/infra/reports/INFRA%20ter%C3%A4stuotteet%20R01.00.pdf

Bilaga 1

Markförlagd grundkonstruktion

Koldioxidekvivalenter		Enhet	Källa/datum
betong , C30/37, (A1-A3)	0,13	$kgco_2e/kg$	co2data.fi/ 06.12.22
betong , C35/45, (A1-A3)	0,14	$kgco_2e/kg$	co2data.fi/ 06.12.22
betong , C40/50, (A1-A3)	0,15	$kgco_2e/kg$	co2data.fi/ 30.03.22
armering (A1-A3)	0,67	$kgco_2e/kg$	co2data.fi/ 30.03.22

Grund data		
betongens densitet	2446,5	Kg/m^3
stål, densitet	7850	Kg/m^3

Fortlöpande fundamenten	Mängd	Enhet	Koldioxidutsläpp	Enhet
betong (30/37)	277,64	t	36093,2	$kgco_2e$
	277640	kg		
armering	6,166	t	4131,22	$kgco_2e$
	6166	kg		
Fundamenten under schakten	Mängd	Enhet	Koldioxidutsläpp	Enhet
betoni (40/50)	219,24	t	32886	$kgco_2e$
	219240	kg		
armering	6,778	t	4541,26	$kgco_2e$
	6778	kg		
Pelarfundamenten			200474	$kgco_2e$
betong			168117	$kgco_2e$
armering			32357,4	$kgco_2e$
Källarvåningens golvplattor	Mängd	Enhet	Koldioxidutsläpp	Enhet
betong(C35/45)	954,395	t	133615,3	$kgco_2e$
	954395	kg		
armering	52,1859	t	34964,553	$kgco_2e$
	52185,9	kg		
Markförlagd grundkonstruktion			tot. 446705,933	$kgco_2e$
betongens andel			370711,5	$kgco_2e$
armeringens andel			75994,433	kgco2e

Bilaga 2

Grundkonstruktion på betongpålar

Koldioxidekvivalenter		Enhet	Källa/datum
betong , C35/45, (A1-A3)	0,14	$kgco_2e/kg$	co2data.fi/ 06.12.22
betong , C40/50, (A1-A3)	0,15	$kgco_2e/kg$	co2data.fi/ 30.03.22
armering (A1-A3)	0,67	$kgco_2e/kg$	co2data.fi/ 30.03.22
betongpåle, RTB-300 (A1-A3)	0,19	$kgco_2e/kg$	co2data.fi/ 20.10.22

Grund data		
betongens densitet	2446,5	Kg/m^3
stål, densitet	7850	Kg/m^3
betongpålens vikt per meter	227	kg/m
betong pålarnas längd	15	m

Fortlöpande fundamenten	Mängd	Enhet	Koldioxidutsläpp	Enhet
betong (40/50)	341,67	t	51250,5	$kgco_2e$
	341670	kg		
armering	24,58	t	16468,6	$kgco_2e$
	24580	kg		
betongpåle, RTB-300	137	st.	88632,15	$kgco_2e$
	2055	m		
	466485	Kg		
Fundamenten under schakten	Mängd	Enhet	Koldioxidutsläpp	Enhet
betong (40/50)	172,14	t	25821	$kgco_2e$
	172140	kg		
armering	6,353	t	4256,51	$kgco_2e$
	6353	kg		
betongpåle, RTB-300	51	kpl	32994,45	$kgco_2e$
	765	m		
	173655	Kg		
Pelarfundamenten			171404,87	$kgco_2e$
betong (C40/50)	1053536	kg	158030,44	$kgco_2e$
armering	19965,78	kg	13377,07	$kgco_2e$
betongpåle, RTB-300	330	st.	213493,5	$kgco_2e$
	4950	m		
	1123650	Kg		
Källarvåningens golvplattor	Mängd	Enhet	Koldioxidutsläpp	Enhet
betong (C35/45)	2385,987	t	334038,18	$kgco_2e$
	2385987	kg		
armering	75,094	t	50312,98	$kgco_2e$
	75094	kg		
betongpåle, RTB-300	293	st.	189556,35	$kgco_2e$
	4395	m		
	997665	kg		
Grundkonstruktion på betongpålar			tot. 1178231,737	$kgco_2e$

betongens andel	569140,1	$kgco_2e$
armeringens andel	84415,16	$kgco_2e$
pålarnas andel	524676,5	$kgco_2e$

Bilaga 3

Grundkonstruktion på stålpålar

Koldioxidekvivalenter			Källa/datum
betong , C30/37, (A1-A3)	0,13	$kgco_2e/kg$	co2data.fi/ 06.12.22
betong , C35/45, (A1-A3)	0,14	$kgco_2e/kg$	co2data.fi/ 06.12.22
betong , C40/50, (A1-A3)	0,15	$kgco_2e/kg$	co2data.fi/ 30.03.22
armering (A1-A3)	0,67	$kgco_2e/kg$	co2data.fi/ 30.03.22
Stålpåle, RD170/12,5 (A1-A3)	120	$kgco_2e/m$	co2data.fi/ 12.12.22

Grund data		
betongens densitet	2446,5	Kg/m^3
stål, densitet	7850	Kg/m^3
pålens vikt (RD170/12,5)	48	kg/m
stålpålarnas längd	15	m
pålens diameter	168,3	mm
pålens vägg tjocklek	12,5	mm
pålens inre diameter	71,65	mm
betongen i pålen (C30/37)	39,457311	Kg/m

Grundkonstruktion på stålpålar

Fortlöpande fundamenten	Mängd	Enhet	Koldioxidutsläpp	Enhet
betong (40/50)	343,723	t	51558,45	$kgco_2e$
	343723	kg		
armering	24,681	t	16536,27	$kgco_2e$
	24681	kg		
stålpåle, RD170/12,5	137	st.	246600	$kgco_2e$
	2055	m		
	98640	Kg		
betongen i pålarna (C30/37)	81084,7741	kg	10541,02	kgco2e
Fundamenten under schakten	Mängd	Enhet	Koldioxidutsläpp	Enhet
betong (40/50)	172,14	t	25821	$kgco_2e$
	172140	kg		
armering	6,353	t	4256,51	$kgco_2e$
	6353	kg		
stålpåle, RD170/12,5	52	st.	93600	$kgco_2e$
	780	m		
	37440	Kg		
betongen i pålarna (C30/37)	30776,7026	Kg	4000,97	kgco2e
Pelarfundamenten			69811,3	$kgco_2e$
betong	57357,5	kgco2e		
armering	12453,8	kgco2e		
stålpåle, RD170/12,5	252	st.	453600	$kgco_2e$
	3780	m		
	181440	Kg		
betongen i pålarna (C30/37)	149148,636	Kg	19389,32	$kgco_2e$
Källarvåningens golvplattor	Mängd	Enhet	Koldioxidutsläpp	Enhet
betong (C35/45)	2385,987	t	334038,18	$kgco_2e$
	2385987	kg		
armering	75,094	t	50312,98	$kgco_2e$
	75094	kg		
stålpåle, RD170/12,5	293	st.	527400	$kgco_2e$
	4395	m		
	210960	kg		
betongen i pålarna (C30/37)	173414,882	Kg	22543,93	$kgco_2e$
Grundkonstruktion på pålar			tot. 1930009,939	$kgco_2e$

betongens andel	468775,13	$kgco_2e$
armeringens andel	83559,56	$kgco_2e$
pålarnas andel	1377675,25	$kgco_2e$