

Belastningsjämförelse mellan stål- och betongpålar

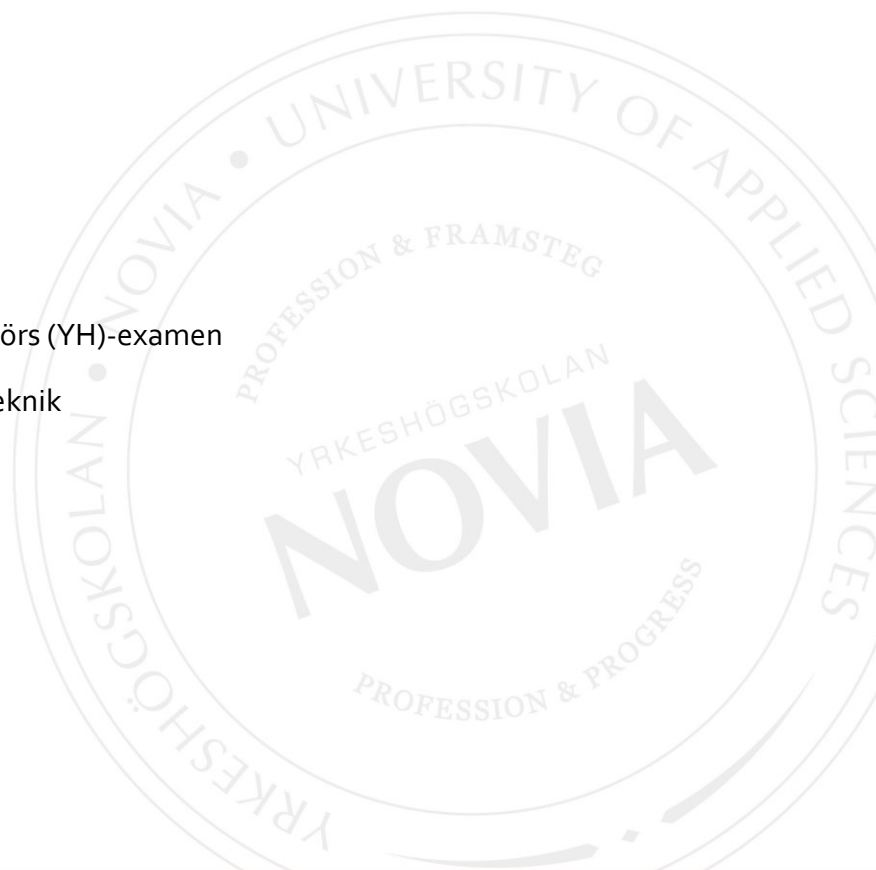
Analys av pålars sidobelastning och moment

Janne Boström

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Byggnads- och samhällsteknik

Vasa 2022



EXAMENSARBETE

Författare: Janne Boström
Utbildning och ort: Byggnads- och samhällsteknik, Vasa
Inriktningsalternativ: Konstruktion
Handledare: Tom Lipkin

Titel: Belastningsjämförelse mellan stål- och betongpålar – Analys av pålars sidobelastning och moment

Datum: 8.4.2022

Sidantal: 39

Bilagor: 1

Abstrakt

Detta examensarbete behandlar pålar som utsätts för en belastning till följd av horisontella krafter eller moment. Detta är i vanliga fall inget större problem, eftersom man vid otillräcklig bärförmåga använder ett flertal pålar för att stabilisera grunden. När marken annars inte har tillräcklig bärförmåga. I detta arbete utreds ifall det skulle vara möjligt att göra en grund för en mastpelare med endast en påle.

Målet med arbetet var att göra en jämförelse mellan användningen av betong- och stål- och när vilken påle lämpar sig bäst. En fördjupad förklaring av PDA-mätningens gång och dess fördelar har även gjorts. Till sist har också en beräkningsanalys på sido- och momentbelastade pålar gjorts.

Utredningen resulterade i en grund för att kunna reda ut ifall man kan göra en grund för en mastpelare med endast en påle. Detta kunde minska kostnaderna rejält på samma gång som grundarbetet skulle gå snabbare.

Språk: svenska

Nyckelord: grundsula, RIL 254-2016 , sidobelastning

Bilagor som hör till examensarbetet är sekretessbelagda.

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Janne Boström
Koulutus ja paikkakunta: Rakennustekniikka, Vaasa
Suuntautumisvaihtoehto: Rakennessuunnittelu
Ohjaaja: Tom Lipkin

Nimike: Teräs- ja betonipaalujen kuormitusvertailu – Paalujen sivukuorman ja vääntömomentin analyysi

Päivämäärä: 8.4.2022 Sivumäärä: 39 Liitteet: 1

Tiivistelmä

Tässä opinnäytetyössä käsitellään paaluja, joihin kohdistuu vaakavoimien aiheuttama kuormitus. Tästä ei yleensä synny ongelmaa koska normaalissa paaluperustuksessa käytetään useita pylväitä, kuin maaperällä ei ole tarpeeksi kantavuutta. Tässä työssä selvitetään, olisiko mastopilarin perustaminen mahdollista tehdä vain yhdellä paalulla.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli vertailla teräs- ja betonipaaluja ja milloin tietty paalu sopii tietyntyypiseen projektiin. PDA-mittauksesta ja sen tuomista eduista on myös tehty syvälinen selitys. Lopuksi on tehty laskenta-analyysi momenttien ja vaakavoimien kuormitusta paaluista.

Laskenta-analyysin tuloksena saatiin perustus, jota voi käyttää myöhempään paalujen laskettaessa. Tämä voisi vähentää kustannuksia merkittävästi samalla kun paalutus sujuisi nopeammin.

Kieli: ruotsi Avainsanat: paaluantura, RIL 254-2016, sivu kuorma

Liitteet tulee vain Kronqvist insinööritoimiston käyttöön eikä sitä julkaista.

BACHELOR'S THESIS

Author: Janne Boström
Degree Programme: Construction Engineering, Vaasa
Specialization: Structural Engineering
Supervisor: Tom Lipkin

Title: Load comparison between steel and concrete piles – Analysis of piles' sideload and torque.

Date: 8.4.2022 Number of pages: 39 Appendices: 1

Abstract

This bachelor thesis analyses the load that piles are exposed to due to horizontal forces and moment. These are usually not a problem because in a normal pile foundation, several poles are used to stabilize the foundation when the ground otherwise would not have enough loadbearing capacity. This thesis studies whether it would be possible to do a foundation for a mast pillar with only one pile.

The thesis is made to get a comparison between steel and concrete piles and when which pile is suited to a certain type of project. An in-depth explanation of the PDA measurement and the benefits it gives has also been made. Finally, a calculation analysis for piles that are loaded with torque and sideload is presented.

The calculation analysis resulted in a foundation to be able to use whilst calculating if a mast pillar with only one pile would be possible. This could reduce costs significantly at the same time as piling would go faster.

Language: Swedish Key words: pile foundation, RIL 254-2016, side load

Appendices that belong to the thesis are confidential.

Innehållsförteckning

1	Allmänt	1
1.1	Uppdragsgivare	1
1.2	Syfte och problemformulering	1
1.3	Forskningsfrågor	2
1.4	Avgränsning	2
2	Pålning	3
2.1	Markförskjutande pålar	4
2.1.1	Grävda pålar	4
2.2	Material	5
2.2.1	Betongpålar	5
2.2.2	Stålpålar	8
3	Utrustning	10
3.1	Borrutrustning	11
3.2	Slagutrusning	13
3.2.1	Fall- och hydraulhejare	13
3.2.2	Trycklufts- och hydraulhammare	13
3.2.3	Vibratorer	14
4	Undersökningar	14
4.1	Geotekniska undersökningar	14
4.1.1	Geoteknisk utredning	15
4.2	PDA-mätning	16
4.3	Jordartens påverkan	17
5	Planering	18
6	Allmän beräkningsgång	20
7	Moment- och vågrättbelastning	23
7.1	Vågrättbelastade pålar	24
7.1.1	Sidobelastningsmotstånd	30
7.1.2	Sambandet mellan sidotryck och förskjutning	33
8	Resultat	34
8.1	Jämförelse mellan betong- och stålpålar	35
8.1.1	Betongpålar	35
8.1.2	Stålpålar	37
9	Sammanfattning	38
10	Källförteckning	39

1 Allmänt

Detta examensarbete på yrkeshögskolenivå har gjorts åt Kronqvists ingenjörbyrå i Jakobstad. Arbetet är skrivet för byggnadsingenjörsexamen med inriktningen konstruktionsplanering vid Yrkeshögskolan Novia i Vasa och innefattar 15 studiepoäng.

Tidigare under hösten och sommaren 2021 har jag gjort min praktik och företagsförlagda utbildning på företaget och ett examensarbete diskuterades. Av de alternativ som vi diskuterade slutade det med att vi fastnade för pålning. Eftersom priset på stål har gått upp mycket under pandemin och på Kronqvists ville man ha en djupare förståelse på hur betong- och stålpålar skiljer sig från varandra vid speciellt moment- och vågrättbelastning.

1.1 Uppdragsgivare

Beställaren för detta arbete är Kronqvists ingenjörbyrå som har sitt huvudkontor i Nykarleby, men som också har kontor i Jakobstad och Vasa. Ingenjörbyrån är uppbyggd av två olika delar: Detecta erbjuder fuktkartläggning och sanering och Planera erbjuder konstruktions-, byggnads- och inredningsplanering. Kronqvists ingenjörbyrå grundades 2006 och tillhör Kronqvist bolagen. Ingenjörbyrån har i nuläget cirka 30 anställda, medan på planeringen sysselsätter 17. Kronqvists ingenjörbyrås marknadsområde är främst Finland med kringliggande länder såsom Sverige och Norge. (Kronqvists, 2021).

1.2 Syfte och problemformulering

Syftet med arbetet var att samla information och göra en jämförelse mellan betong- och stålpålar och att även göra en utredning på beräkningsgången för moment- och vågrättbelastade pålar. Beställaren har i nuläget till största delen använt sig av stålpålar vid dimensionering av pålar och vill därför få en fördjupad förståelse inom de olika alternativen. Beräkningsgången skulle vara tydlig så att den är lätt att följa vid dimensionering av betong- och stålpålar.

1.3 Forskningsfrågor

Inför detta examensarbete har forskningsfrågor gjorts för att enklare hålla sig till ämnet och syftet med arbetet. Forskningsfrågorna är följande:

- Hur skiljer sig betong- och stålplålar vid användning och nerdrivning?
- Vilka fördelar fås genom PDA-mätning?
- Hur dimensioneras plålar mot moment och sidobelastning?

1.4 Avgränsning

För att undvika att tidsramen för arbetet skulle överstigas så gjordes en avgränsning enligt vad som var viktigaste för Kronqvist, vilket är betong- och stålplålar jämförelse och analys av beräkningsgången. I nuläget finns dock inget konkret projekt där arbetet kommer tillämpas men meningen med arbetet är att underlätta vid framtida projekt. Beräkningsgången avgränsas också till det mest centrala samt moment- och vågrätbelastning. Dessutom ville man från Kronqvists sida veta hur stor påverkan närliggande jordart och en utredning över PDA-mätning.

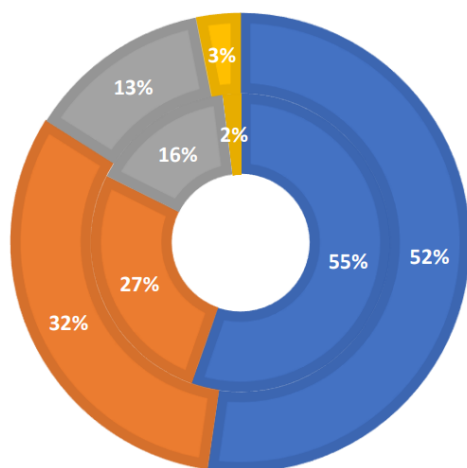
2 Pålning

Enligt EU standard delas pålar upp i två huvudgrupper, markförskjutande pålar (SFS-EN 12699) och pålar som grävs ner (SFS-EN 1536). Dock har också små pålar egen standard (SFS-EN 141999) och till dessa pålar hör de som har en diameter på högst 300 mm. Som man kan se enligt figur 1 så är det till största delen slagna betongpålar och stålplålar som blir använda i dagens läge.

Pålar är lastbärande element som flyttar krafter ner i jorden eller ner till berg, och som rakt eller snett begränsar deformationer. Ifall markens hållfasthet inte räcker till kan dessa förbättras med injicering. (RIL 254-2016, 2016, s. 15).

FÖRDELNING PÅLTYPEN 2020 (YTTRE) VS 2019 (INRE)

■ Slagna betongpålar ■ Slagna stålplålar
■ Borrade stålplålar ■ Övriga pålar



Figur 1. Fördelningen av de använda påltyperna i Sverige 2019 och 2020. (Pålkommissionen, 2021).

När man planerar pålning tar man också i beaktande vad pålningen ska lämpa sig för. Betongpålar är till exempel mycket bra till alla former av djupgrundläggning eftersom deras tvärsnitt ofta är större än en stålplåles, medan stålplålar lämpar sig bra för alla typer av konstruktioner som hus, broar med mera. (Intervju med Peter Alheid, 28.2.2022).

2.1 Markförskjutande pålar

Markförskjutna pålar monteras utan att gräva eller schakta bort jorden, förutom i de fall där det kan begränsa markens höjning eller vibration, eller för att förenkla jordens penetration. Pålarna kan monteras genom slagning, vibrering, skruvning eller en kombination av dessa metoder.

Material som kan användas vid markförskjutande pålning är stål, trä, betong, segjärn eller en kombination av materialen. (RIL 254-2016, 2016, s. 15).

Som figur 1 visade bestod pålningen i Sverige år 2020 till 97 % av markförskjutande pålar och endast 3% av annan typ av pålning. Största delen av de markförskjutande pålarna var slagna pålar av betong och stål, men också en stor del borrade stålpålar användes. (Pålkommisionen, 2021).

2.1.1 Grävda pålar

Grävda pålar monteras genom att gräva eller borra bort jorden och sedan fylls hålet med armerad eller oarmerad betong med eller utan skyddsror. Man kan också sänka ner en stålpåle i hålet.

Materialen som kan användas vid grävd pålning är stålprofiler samt oarmerad eller armerad betong. Till detta hör också betong med special armering så som stålprofiler eller stålfiber. (RIL 254-2016, 2016, s. 16).

Denna metod används nuförtiden mycket sällan eftersom dessa projekt blir oftast avancerade, dyra och stora. Den senaste tiden har en del grävda pålar använts i Sverige för höghus och infrastruktur, men då som sekantpålväggar (SFS-EN1536). Problemet är dock att maskinerna som behövs för dessa arbeten är sällsynta och man blir tvungen att ofta transportera dem långa vägar. (Intervju med Peter Alheid, 28.2.2022).

2.2 Material

Som tidigare nämnt kan pålningen ske med olika material. De här materialen lämpar sig i olika situationer. I detta examensarbete har området begränsats till betong- och stålpålning. Därför kommer endast dessa redogöras för i detta arbete. Kronqvists har i tidigare projekt använt SSAB:s pålar och vill därför att dessa används vid jämförelsen mot betongpålar. Syftet med detta examensarbete är dock inte till för att presentera eller favorisera en viss påltillverkare.

Alla material och produkter som används vid pålning måste vara CE-märkta eller uppfylla kraven som finns i miljöministeriets förordning 555/2013. Dessutom måste produkterna uppfylla kraven som framkommer i RIL 254–2016 för att säkerställa lämpligheten av materialen och produkterna vid pålning. (RIL 254-2016, 2016, s. 31).

2.2.1 Betongpålar

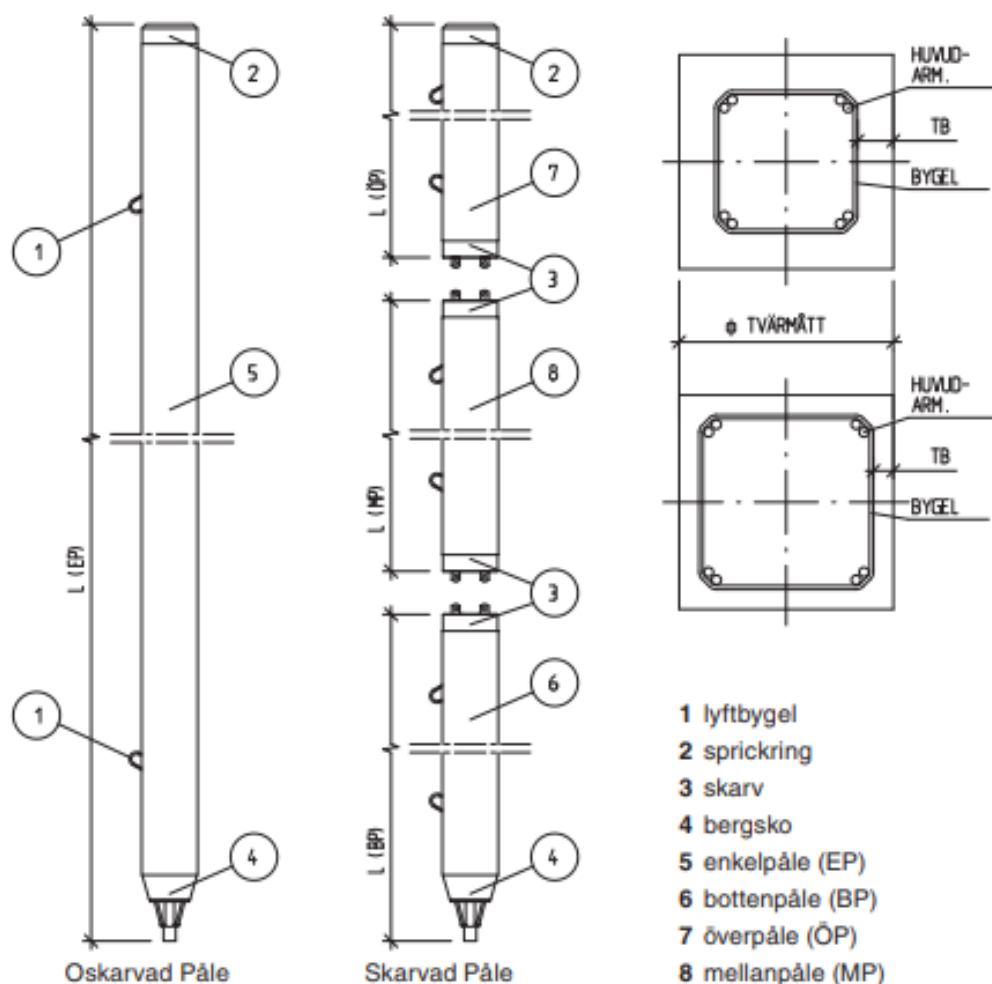
Betongpålar kan göras både som förtillverkade pålar och som platsgjutna pålar. Dock ändras utrustningen och pålningssättet med de olika tillverkningsätten.

Vid förtillverkade betongpålar följs standarder från SFS-EN 12794 och dess referensstandarder som SFS-EN 13369 och SFS-EN 206. Betongen i en förtillverkad betongpåle kräver en hållfasthetsklass på minst C35/45 då pålen monteras. Beredningen av betongen behandlas mer ingående i de nationella bilagorna BY65:2016. För armerade betongpålar är de dimensionerande toleranskraven enligt det som står i SFS-EN 12794 bilaga 2. (RIL 254-2016, 2016, s. 155).

Förtillverkade pålar kan göras som enkelpåle, vilket skulle vara en oskarvad påle, eller så kan de göras som skarvad påle med botten-, mellan- och överpåle. Detta framgår i figur 2. Armeringen i pålarna består av huvudarmering som går längs med pålen och byglar. Byglarna täcks alltid med betongtäcksikt på 25 mm, detta för exponeringsklass XC1-4, XF1. Ifall man behöver uppnå någon viss exponeringsklass så ökar täckskiktet. (Hercules, 2018, ss. 9-16).

För platsgjutna betongpålar följs standarden SFS-EN 206 för bestämning av betongens krav och lämplighet. Platsgjutna betongpålar bör göras på ett sådant sätt att betongen inte separerar och så att täckskiktet runt armeringen blir tillräcklig. Hållfasthetsklassen kan variera mellan C20/25 och C45/55 för platsgjutna pålar. (RIL 254-2016, 2016, ss. 155-156).

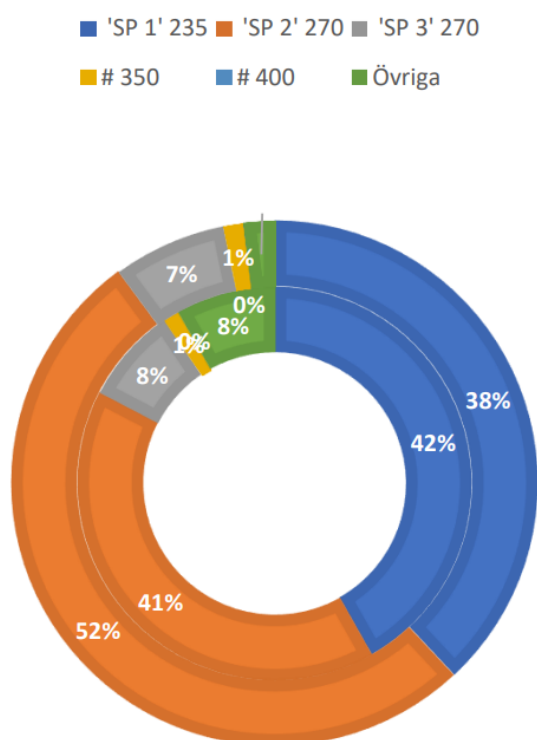
Huvudarmeringsstålen som används för betongpålar bör tillhöra någon av de följande stålklasserna: A700HW, A500HW, B500B eller B500C1. Till byglarna kan de tidigare nämnda användas men också B400. Detta för att få en tillräcklig styrka, seghet och vidhäftning. För slag pålar är det rekommenderat att stålets tvärsnittsarea ska vara 4,5% av pålens totala tvärsnittsarea och att brottgränsen bör överstiga den nominella sträckgränsen med minst 50MPa. (RIL 254-2016, 2016, s. 158).



Figur 2. Betongpålens uppbyggnad. (Hercules, 2018).

Betongpålarna monteras alltid som slagna eller grävda. Det går inte montera betongpål genom borrhning. (Intervju med Peter Alheid, 28.2.2022). Enligt figur 3 kan man se att största delen av betongpålarna som används är SP 1 och SP 2 pålar.

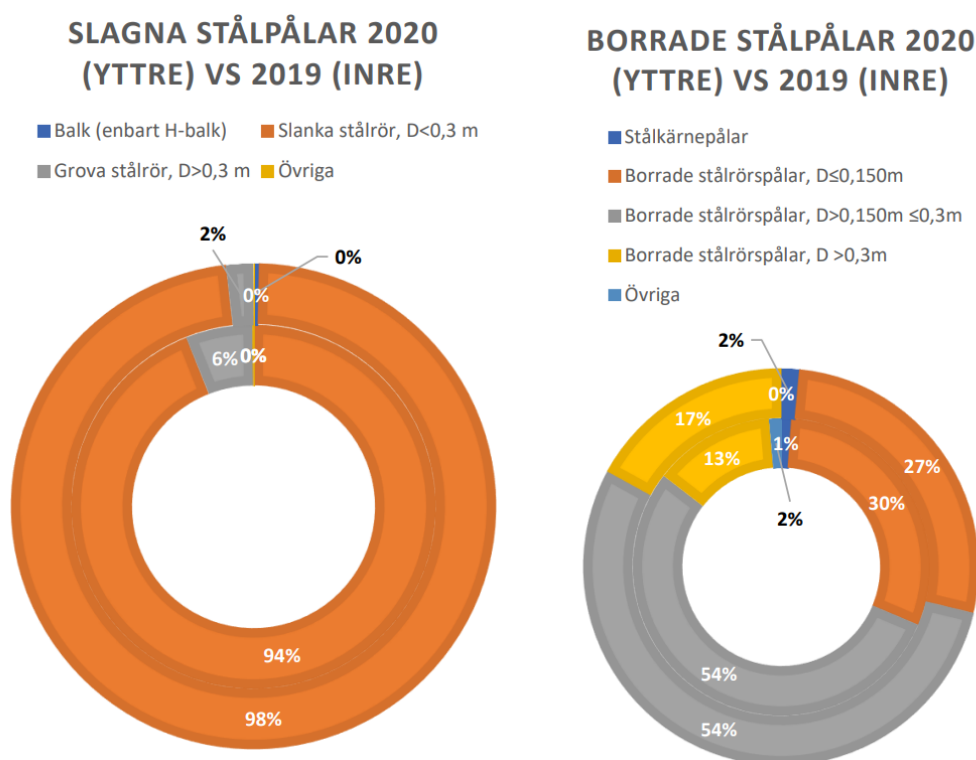
SLAGNA BETONGPÅLAR 2020 (YTTRE) VS 2019 (INRE)



Figur 3. Betongpålarnas dimensions användning. (Pålkommisionen, 2021).

2.2.2 Stålpålar

SSAB:s pålar följer de krav som är angivna i eurokoderna och SFS-EN 10219–1 och SFS-EN 10219–2. Deras RR- och RD-pålar är CE-märkta pålningsystem som omfattas av ETA 12/0526. Skillnaden mellan RR- och RD-pålar är att RD-pålar är gjorda för att borraras ner medan RR-pålar är ämnade för att slås ner. (SSAB, 2020, s. 4). Figur 4 visar vilka stålpålar och pålningsätt som använts under 2019 och 2020. Där ser man att i de flesta projekt räcker mindre pålprofiler och att de grova pålarna behöver användas relativt sällan.

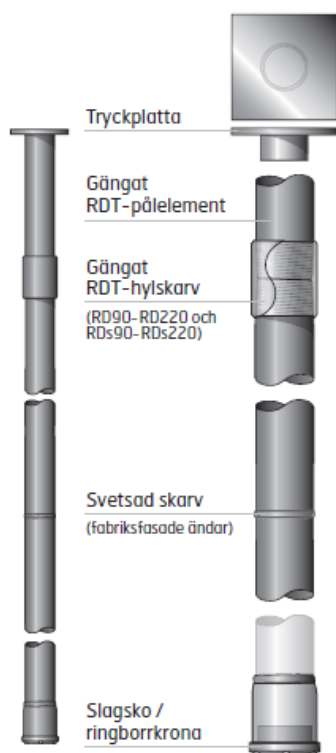


Figur 4. Stålpålarnas användningsfördelning. (Pålkommissionen, 2021).

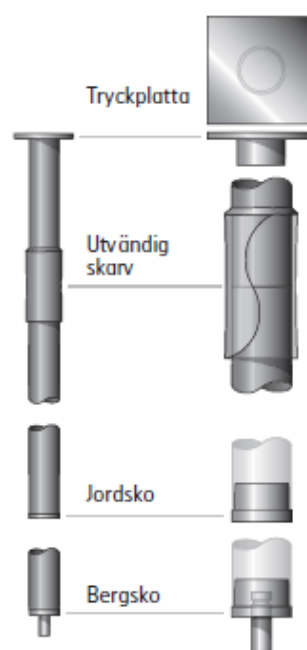
Slanka RR-pålar har mekaniska skarvar och pålskor upp till en pålstorlek till RR245/12,5. Om pålen är större än så bör skarvarna och pålskor svetsas. Pålen är uppbyggd enligt figur 6 och finns som lagervara i de flesta grovlekarna ända upp till 12 meter, men kan på beställning fås i 16 meters längder också. (SSAB, 2020, s. 5).

De stora RR-pålarna är gjorda på spiralsvetsade stålrör och kan tillverkas i längder upp till 39 m. Man kan även kombinera pålen med olika pålskor för att få pålen att fungera bäst för dess ändamålet. De större pålarna blir oftast specialbeställda och kan fås i storlekar mellan RR400-RR1200. Det finns även en del lagerförda dimensioner som görs med en längd på 12 meter, exempelvis dimensionerna RR400-RR800. (SSAB, 2020, s. 6).

RD-pålarnas uppbyggnad presenteras i figur 5. De här pålarna kan levereras som pålrör eller som moduler med gängade ändor. Pålarna RD90-RD320/12,5 kan skarvas med de gängade skarvhylsorna. Skarvens garanterade draghållfasthet är 50% av pålens tryckhållfasthet. Vid större pålar bör man svetsa skarven. (SSAB, 2020, s. 9). Gängskarv med yttre hylsa bör förspännas till minst 1 kNm. Förspänning genom åtdragning strävar till att kraften i pålen ska överföras genom de skarvade pålarnas ändytor. Nackdelen med utvändiga skarvhylsor är att ifall dess diameter är större än borrhörens kan hylsan fastna mot block. (Pålkommissionen, 2010, s. 17).



Figur 5. Uppbyggnad av slanka RD-pålar. (SSAB, 2020, s. 9).



Figur 6. Uppbyggnad av slanka RR-pålar. (SSAB, 2020, s. 5).

Vid val av påle har SSAB gjort en tabell där man kan få ungefärlig förståelse över vilken påle som passar ändamålet bäst, men det påpekas också att det vid de flesta tillfällen behövs en kombination med flera olika påldimensioner för att få en mer optimerad bärförmåga. (SSAB, 2020, s. 14).

Tabell 1 Påldimensioner och vanliga tillämpningsområden

RR75–RR/RD140/8	1 och 2 familjshus och andra byggnader utsatta för relativt små laster
RR/RD140/8–RR/RD270	Flervåningshus med cirka 3 till 8 våningar
RR/RD220–RR/RD500	Tunga flervåningshus (>5 våningar) eller industribyggnad
RR/RD220–RR/RD400	Pålar till bullerskydd med enstaka pålar
RR/RD500–RR/RD1200	Bro- och hamnkonstruktioner samt byggnader som är högre än 10 till 15 våningar

(SSAB, 2020, s. 14).

3 Utrustning

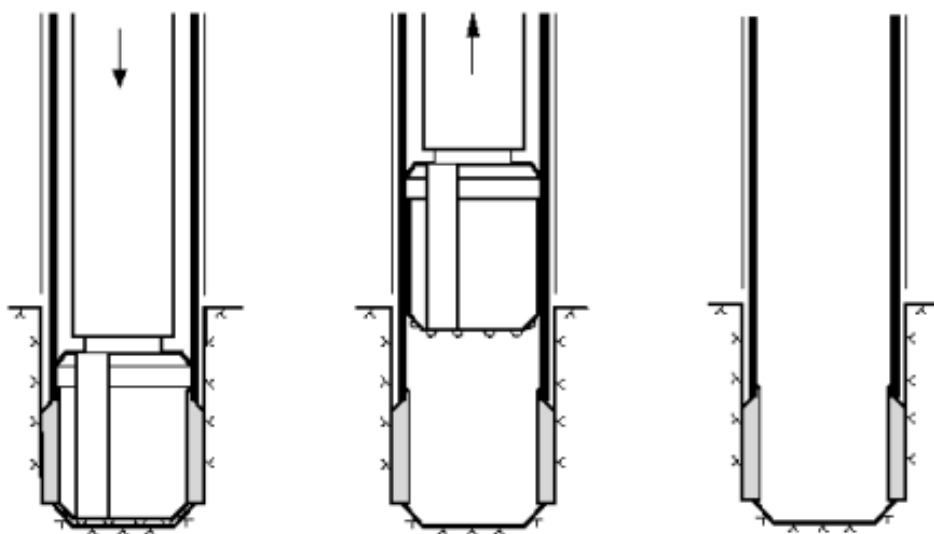
Pålningen kan ske på många olika sätt därför finns det också en stor mängd utrustning som kan behövas. De olika metoderna lämpar sig för olika ändamål. När man planerar pålningen bör man också ta hänsyn till det närliggande området och välja en lämplig metod för pålningen utgående från markförhållandena. (Pålkommissionen, 2010, s. 13).

För kapning av pålar säger geokonstruktör Peter Alheid att de i princip alltid använder specialmaskiner för kapning av all pålar både betong och stål. I Finland ligger man lite efter i utvecklingen gällande detta, men maskinerna har nog också hittat in på den finländska marknaden. I Sverige finns några specialiserade entreprenörer som har kapningsmaskiner, men de stora företagen har oftast egna maskiner inom företaget. (Intervju med Peter Alheid, 28.2.2022). Dessa specialmaskiner kan till exempel vara tilläggsutrustning till en grävmaskin. Pålkapningen ska göras vinkelrätt mot pålaxeln. Ifall en tryckplatta ska monteras på påltoppen ska kapytan bearbetas så att den är tillräckligt jämn. (Pålkommissionen, 2010, s. 33).

3.1 Borrtrustning

Sänkborrhammare och toppborrshammare är två av de varianter som allmänt blir använda vid borring av stålrör. Båda varianterna kan använda sig av centrisk eller excentrisk borrhingsmetod. (Pålkommisionen, 2010, s. 32). Den största skillnaden mellan sänkborrhammaren och toppborrshammaren är att hammaren vid sänkhammarborring angriper pålens nedre ände. Slaget träffar pålskon som på samma gång driver ner pålen. En risk med sänkhammarborring uppkommer dock i och med att hammarens drivluft släpps ut i pålen vid pålspetsen, vilket leder till att det vid pålning av finkorniga jordlager under grundvattenytan spolats en betydligt större volymjord upp än den som motsvarar pålensvolym. Detta kan undvikas ifall man använder vatten i stället för luft som drivmedium. Topphammarborring angriper pålrörets övre ände. Detta medför högre slagljud och en minskad effektivitet vid drivningen. Eftersom effektiviteten minskar linjärt med pålens längd kan denna metod inte användas vid större dimensioner än cirka 170 mm och till ett djup på cirka 30 m. (SSAB, 2020, ss. 30-31).

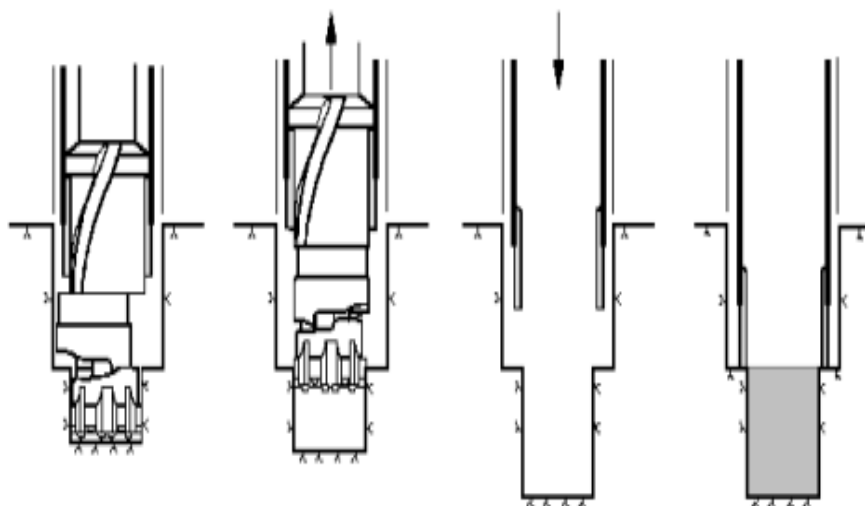
När man använder sig av centrisk borrhingsmetod svetsas borrkronanfast i pålen innan borringen påbörjas och kommer bli kvar i marken när borringen är klar. Det är endast pilotborrskronan som tas upp efter borringen. (Pålkommisionen, 2010, s. 32). I pålens nedre ände monteras en slagsko och en ringborrkrona som kan rotera utan att pålen behöver roteras. Under borringen låses ringborrkronan fast i pilotborrkronan. När borringen är klar tas pilotborrskronan upp och ringborrskronan blir kvar i marken. (SSAB, 2020, s. 30).



Figur 7. Centrisk borrhingsmetod. (Pålkommisionen, 2010, s. 33).

Centriska borrhingsmetoden är lite dyrare att utföra än den excentriska borrhingsmetoden eftersom en del av borren blir kvar under jorden, men slutresultatet blir oftast ett rakare borrhål och bättre penetrationsförmåga. (Pålkommisionen, 2010, s. 32).

När man använder sig av excentriska borrhingsmetoden kommer hela borrkronan att tas upp tillbaka, vilket gör att metoden blir en aning billigare. Borrkronan fästs innan man börjar borra och har som syfte att flytta över stötkraft till röret. Röret får högst ha en godstjocklek på 5–6 mm och borrar alltid ner till berg med denna metod. (Pålkommisionen, 2010, s. 32) En del av jorden som tas bort spolas ut i den omgivande marken, en del spolas upp till marken längs med pålens utsida och en del går in i pålen och kommer ut den vägen. Vid excentrisk borrhining rymmer pilotkronan ett hål som är lite större än pålens diameter. (SSAB, 2020, s. 30). När borrhiningen avslutats och borren har tagits upp ur hålet är det vanligt att man endera fyller hela pålen med betong eller att hålet som blivit av borren fylls med betong. (Pålkommisionen, 2010, s. 32).



Figur 8. Excentrisk borrhingsmetod. (Pålkommisionen, 2010, s. 32).

Vid borrhining av betongpålar kan till exempel Kelly metoden eller jordskruv användas. Med Kelly-metoden kan man skapa ofodrade, delvis fodrade, helt fodrade eller suspensionsstödda grävpålar. Den teleskopiska Kelly-stången med borrhörtyget avlägsnar jorden gradvist från fordonet. Borrhörtyget skruvas oavbrutet ner i jorden som dras ut tills man nått det slutliga djupet. (Bauer, 2021).

När man använder jordskruv eller CFA-metoden, *Continuous Flight Auger*, använder man som namnet påstår en jordskruv som fästs i en pålkran eller grävmaskin som driver upp

jorden på samma gång som den borrar neråt. När det önskade djupet är uppnått lyfts borren upp ur hålet och man fyller det med betong. (Bauer, 2021).

3.2 Slagutrusning

Det finns flera olika alternativ vid slagna pålar. Man kan använda vibratorer, hejare eller hammare. Det finns två varianter av hejare, fallhejare och hydraulhejare, samt två varianter av hammare, hydraulhammare och högtryckshammare. (SSAB, 2020, ss. 24-30).

3.2.1 Fall- och hydraulhejare

Fallhöjden för fallhejaren kan väljas fritt så länge man beaktar utrustningens begränsningar, och tyngden ska väljas så att den lämpar sig pålens storlek och grundförhållanden. I vissa fall kan en lite tyngre hejare vara bra men man måste då också beakta att risken för att böjning ökar. För de större stålplåarna runt RR800 kan en hejarvikt på ca. 9 ton vara lämplig. När pålningen utförs sätts en slagdyna mellan pålen och hejaren. Vid slagning av betongpålar används i allmänhet dynträ mellan slagdynan och pålhuvudet. Vid slagning av stålörspålar används normalt inte något dynträ, dock måste man vara noggrann med att slagen centreras. När man installerar pålar som är skarvade med utvändiga skarvhylsor där hylsan är uppåt rekommenderas ett slagdon som kan leda slagkraften ner i pålen. (SSAB, 2020, ss. 24-25).

I Finland där marken är relativt porös kan grova spetsburna stålörspålar installeras med relativt små hejare. I terränger med mäktiga friktions- och moränjordar måste man se till att tillräcklig slagenergi förs ner i pelaren för att få en effektiv neddrivning. (SSAB, 2020, ss. 25-26).

3.2.2 Trycklufts- och hydraulhammare

Trycklufts- och hydraulhammare är exceptionellt lämplig för neddrivning av slanka RR-pålar eftersom de är snabbslående anordningar och har stor slagkraft. Detta gör att installationen går snabbt och pålarna kan i de flesta fall monteras mycket raka. De fungerar också bra ifall man ska installera större pålar så länge optimering av geoteknisk bärförmåga är ett krav. Slagutrustningen är lätt och kan användas på flera olika maskiner. (SSAB, 2020, s. 26).

3.2.3 Vibratorer

Att använda vibrering är en bra metod ifall man ska installera pålarna till en visst djup, som till exempel bullerskyddsfundament. Vibratorns storlek bör väljas efter pålarnas storlek och markens egenskaper, men en frekvens på minst 25 Hz behövs. I grundförhållanden där stenfria friktionsjordar ovanför berget inte är så täta kan man installera RR-pålar ända ner till bergytan. Vibratorn kan fästas mitt på eller i änden av pålen.

När man installerar pålar med hjälp av vibrering måste man vara medveten om att vibrationerna kan orsaka stora avvikelser i pålens neddrivning. Pålen kan också knäckas eller skadas av utmattningsspänningar. Ifall pålen blir utsatt för stora vertikala laster måste man stoppslå och/eller göra stötvågsmätning. Efterslagning bör också göras vid mekanisk skarvning av RR-pålar detta för att det inte ska förbli glapp i skarvarna. (SSAB, 2020, s. 28).

4 Undersökningar

Behovet av förundersökningar motsvarar kraven som projektet kräver. För dimensioneringen av pålarna krävs dessutom kompletterande uppgifter. Undersökningarna ska främst ge bedömningsunderlag för drivbarhet, omgivningspåverkan och pålarnas bärförmåga. (Pålkommissionen, 2010, s. 14).

Syftet med geotekniska undersökningarna är att fastställa jord-, berg- och grundvattenförhållandena. Informationen ska insamlas och redovisas noggrant. Markförhållanden som påverkar geotekniska klassen ska bestämmas så tidigt som möjligt. (EN1997-2, 2007, s. 19). Genom bestämningen av geotekniska klassen skapar man en överblick som ger insikt i det aktuella projektets omfattning. (SSAB, 2020, s. 15).

För att garantera en borrarad- eller slagenpåles geotekniska bärförmåga är PDA-mätning den vanligaste verifieringsmetoden. (SSAB, 2020, s. 19). Ett alternativ till PDA-mätning är provbelastning men då ökar kostnaderna för verifieringen väsentligt. (Pålkommissionen, 2010, s. 32).

4.1 Geotekniska undersökningar

Geotekniska undersökningar bör planeras och utföras på ett sådant sätt att den geotekniska information och data som fås ut av den är relevant och är tillgängliga under projektets alla olika skeden. Informationen som fås från den geotekniska undersökningen bör innehålla tillräcklig grundliga uppgifter för att kunna identifiera och hantera de förutsägbara

projektriskerna. Under alla byggnadsskeden ska informationen och data vara tillgängliga så att den ska kunna fungera som kontroll över olycksfallsrisker, förseningar och skador. (EN1997-2, 2007, s. 19).

Den information som fås av undersökningarna bör innehålla tillräckligt grundliga uppgifter för att kunna göra en bedömning på följande punkter. Detta enligt EN7-2:

- Redogörelse för byggplatsens lämplighet med avseende på den förslagna konstruktionen och acceptabla risknivån
- Redogörelse för markens deformation orsakad av konstruktion eller arbetet
- Redogörelse över lasten som överförs från konstruktionen ner till marken
- Redogörelse för omgivningspåverkan
- Redogörelse över markföroreningar, samt effektiviteten på de åtgärder som vidtas för att förhindra eller avlägsna föroreningen
- Redogörelse över de förslagna grundläggningsmetoderna
- Redogörelse för gränstillstånd på hävning, glidning av jord- och bergmassor, knäckning av pålar, sjunkning, upplyftning, med mera
- Redogörelse för ytterligare konstruktiva åtgärdskrav
- Redogörelse för grundläggningens arbetsordning (EN1997-2, 2007, s. 19).

4.1.1 Geoteknisk utredning

För planeringen av geokonstruktioner delar man in konstruktionerna i olika svårighetsklasser där B kvalificeras som enkla arbeten, A kvalificeras som krävande arbeten och AA kvalificeras som mycket krävande arbeten. För geokonstruktioner som hör till kvalifikationsklass B och A krävs ingen geoteknisk undersökning utföras om det finns tillräcklig och tillförlitlig information om byggplatsen att tillgå sedan tidigare. Vid enkla projekt med kvalifikationsklass B-konstruktioner kan en utredning av terrängen som gjorts av en expert räcka. Vid mycket krävande AA-konstruktioner utförs alltid en geoteknisk utredning. (Finlands byggbestämmelsesamling, 2003, s. 5).

Den geotekniska undersökningen bör klarlägga topografin, positioner av berggrundens yta, jordlagerföljden, grundvattenförhållanden på byggplatsen och de områden som kommer att påverkas av bygget och berggrundens geotekniska egenskaper. (Finlands byggbestämmelsesamling, 2003, s. 5).

4.2 PDA-mätning

PDA-mätning eller stötvågsmätning, är en mätning som görs för att kunna garantera pålens bärförmåga. Den dynamiska testbelastningen är snabb och ger ett mycket pålitligt värde för bärförmågan för en påle. Dessutom ger mätningen information om effektiviteten i slagen, spänningarna i pålen och pålens integritet åt pålmaskinsföraren i realtid. Dessa mätningar kan göras på trä-, armerad betong- och stålplålar i alla profiler. Pålens beteende under belastning kan bestämmas med ett statistiskt belastningstest, stötvågen som blir uppmätt under testet kan användas i en signalmatchning som kallas CAPWAP-analys, *Case pile wave analysis program*, för att få reda på pålpets- och mantelmotståndet. För friktionsplålar bör dämpningsfaktorn alltid bestämmas enligt CAPWAP-analysen. Med hjälp av provpålning och pålmätningar på krävande platser kan man genast från start få reda på den rätta påltypen för projektet som tål de påfrestningar som uppkommer vid slagning. (Kiwa inspecta Finland, 2021).

Instruktionerna ger plålar har ofta överdimensionerade efterslagningskrav vilket leder till onödigt långa plålar som blir en extra kostnad. I värsta fall kan för stor efterslagning leda till strukturella skador på plåarna. Det kan man undvika ifall man använder PDA-mätning som ger slutslagsvärdena till pålningsmaskinen. Några fördelar med PDA-mätning enligt Kiwa inspecta är:

- Skador på plåarna och andra eventuella brister relaterade till pålningen upptäcks i tid
- Låter oss ta reda på rätt påltyp som tål påfrestningarna från slagningen
- Lägre kostnad eftersom plåarna blir kortare när man kan bestämma att varje påle har uppnått sitt målspecifika slutslagsvärde
- Undvika att plåarna går sönder av att förstora slutslag gjorts
- Genom signalmatchning förbättras pålitligheten i PDA-resultaten och lägre korrelationskoefficient kan användas för pålens geotekniska tryckhållfasthet (Kiwa inspecta Finland, 2021).

Enligt Alheid på Hercules grundläggning AB används PDA-mätning nästan till alla pålningsarbeten i Sverige och även till stor del av pålningen som sker i Finland. Dock så har de andra nordiska länderna inte riktigt i samma mån tagit PDA-mätningen i bruk. Alheid säger också att man även kan använda en schablonmetod vid påvisning av GEO som är den geotekniska bärförmågan. (Intervju med Peter Alheid, 28.2.2022).

4.3 Jordartens påverkan

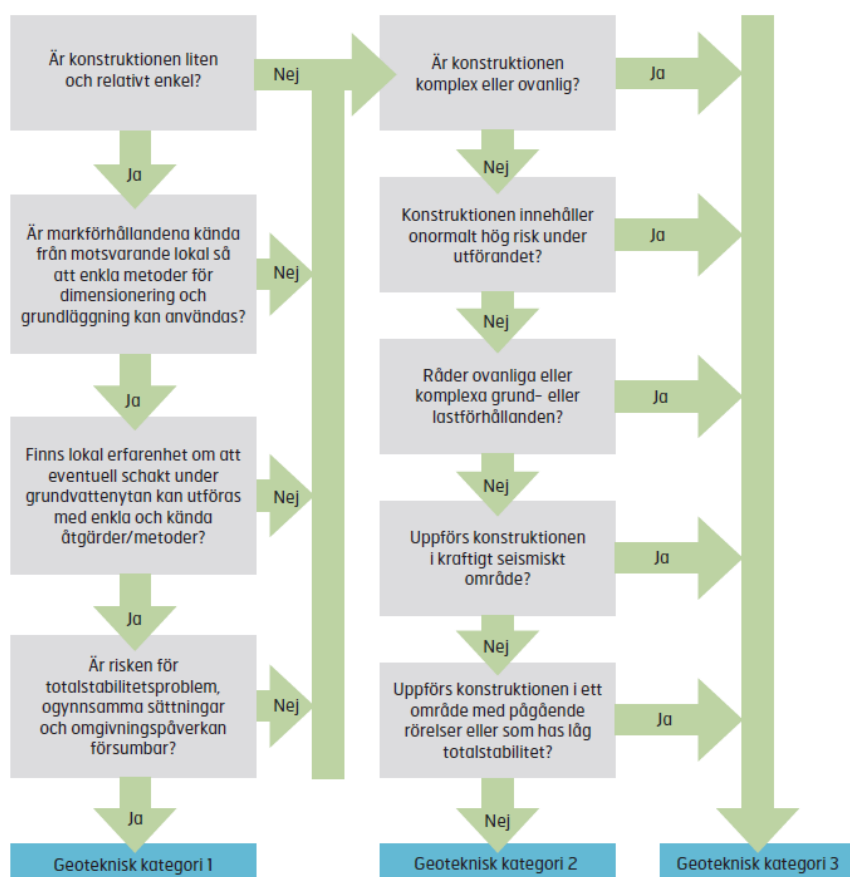
Vid markkonstruktioner för ett bygge bör jordmaterialen som används ha de tekniska egenskaper som lämpar sig för det användningsändamål som det är avsett att användas till. Jordmaterial som hämtas till byggsplatsen får inte innehålla föroreningar i skadlig halt, medan radonhalten bör beaktas vid planeringen. Lokala variationer förekommer alltid i naturliga jordlager. Därför bör kornstorleken alltid mätas på använd jord medan byggarbetet pågår för att säkerställa att de fyller de gällande kraven (Finlands byggbestämmelsesamling, 2003, s. 10).

Vid dimensionering utgår man oftast ifrån jorden i STR som är det konstruktiva gränstillståndet, och som innebär det inre brott eller de stora deformationer som uppkommer i bärverket eller konstruktionen, där konstruktionsmaterialets hållfasthet inverkar på bärförmågan. Eftersom det i Finland och Sverige till största delen finns lösa jordar blir det oftast STR som är dimensionerande. Dimensionering med jorden i GEO, som är det geotekniska gränstillståndet, tillämpas när brott eller stora deformationer i marken där jordens och bergets bärförmåga inverkar på hållfastheten. Detta görs sällan eftersom en oerhört stor andel av pålarna som används i dagens läge är spetsburna pålar, och i Finland och Sverige finns ett hårt berg under så den geotekniska bärförmågan blir sällan ett problem.

Enligt utförandestandarderna kan man i normala fall förvänta sig att måttnoggrannheten i plan kan kasta med ± 100 mm. Oftast lyckas detta, men ifall pålningen sker i förhållanden där jorden är besvärlig, på vatten eller ifall lerproppar ska dras så kan detta göra att toleranserna inte hålls. Nämnvärt är också att med borrade pålar är det oftast betydligt enklare att hållas inom toleransramarna än ifall pålarna slås ner. (Intervju med Peter Alheid, 28.2.2022).

5 Planering

För att fastställa vilka geotekniska konstruktions krav som bör användas delas jordarterna in i tre olika klasser GL1, GL2 och GL3. Man kan med hjälp av figur 9 nedanför bestämma GL klassen för projektet. (RIL 254-2016, 2016, s. 29). Med val av geoteknisk klass får man en överblick och insikt i projektet. Valet av klassen styr bland annat omfattningen av undersökning, dimensionering, kontroller och uppföljning. (SSAB, 2020, s. 15).



Figur 9. Valet av den geotekniska klassen kan göras med hjälp av tabellen. (SSAB, 2020, s. 16).

Till Geoteknisk klass 1 (GK1) hör konstruktioner där kvalitativa geotekniska undersökningar och erfarenhet kan säkerställa uppfyllandet av de väsentliga kraven, och som inte utgör någon betydande risk. Typiska GK1 byggnadsplatser är på stenig- och moränjord eller områden med grovkorniga jordar. (RIL 254-2016, 2016, ss. 29-30). En okulär besiktning eller kvalitetskontroll och en kvalitativ bedömning av hur bärverket uppför sig räcker oftast till för klass 1. (EN1997-1, 2004, ss. 47-48).

Till Geoteknisk klass 2 (GK2) hör konstruktioner som normalt kräver kvantitativ geoteknisk analys för att kunna säkerställa att de grundläggande kraven uppfylls och som inte har mark- eller belastningsförhållanden som är speciellt svåra eller onormala. Pålningsplatsen tillhör

GL2 vid etablering av byggnader som ska används till permanenta bostäder, utrymmen som ska användas som arbetsplatser eller andra mer krävande konstruktioner (RIL 254-2016, 2016, ss. 29-30). klass 2 kräver oftast mätningar av markens egenskaper eller bärverkets beteende. (EN1997-1, 2004, ss. 47-48).

Till Geoteknisk klass 3 (GK3) hör alla konstruktioner som inte tillhör någon av klasserna Gk1 eller GK2. Sådana konstruktioner skulle vara mycket stora och ovanliga konstruktioner, eller konstruktioner som har onormala risker, onormal konstruktion eller konstruktioner som med exceptionellt svåra mark- och belastningsförhållanden. Ifall otillräcklig stabilitet eller kontinuerlig markrörelse kräver undersökning eller särskilda åtgärder hamnar konstruktionen också i Gk3. (RIL 254-2016, 2016, ss. 29-30). Ifall konstruktionen hör till klass 3 bör kompletterande mätningar göras under alla viktiga byggskedena. (EN1997-1, 2004, ss. 47-48). RIL 254–2016 ger exempel på några exceptionellt svåra grundkonstruktioner kan var bland annat följande:

- Konstruktioner som görs på organisk jord.
- Konstruktioner som har utrymmen under grundvattennivån eller under grunden till närliggande byggnader.
- Konstruktioner som utsätts för dynamiska eller andra exceptionella belastningar.
- Konstruktioner där nya material eller planeringsmetoder används, eller ifall okonventionella grundläggningsmetoder används.
- Konstruktioner som kommer på oplanerade utfyllnader som inte har komprimerats i lager.
- Konstruktioner som förstärks eller som ändras.
- Konstruktioner som kommer på mark som innehåller förorenad jord.
- Pålningsområdet innehåller störningsbenägna jordlager.
- Pålningen görs i vattenområde.
- Pålarnas bärlager är en tjock sten morän.
- Pålningsområdet innehåller djupa diken (< 3 m).
- Pålningsområdet utsätts för stora belastningar under byggtiden.
- Pålningsområdets stabilitet är dålig.
- Pålen eller pålgruppen utsätts för stor drag- eller tvärbelastning.
- Pålgrunder med en påle (RIL 254-2016, 2016, ss. 29-30).

6 Allmän beräkningsgång

Tanken med arbetet är att ta fram en beräkningsgång för moment- och vertikalt belastade pålar. Problemet med undersökningen kommer att vara att momentet i pålen kommer bli högt medan normalkraften är relativt liten. I dagsläget görs konstruktionen med 4 pålar för att hålla för belastningarna.

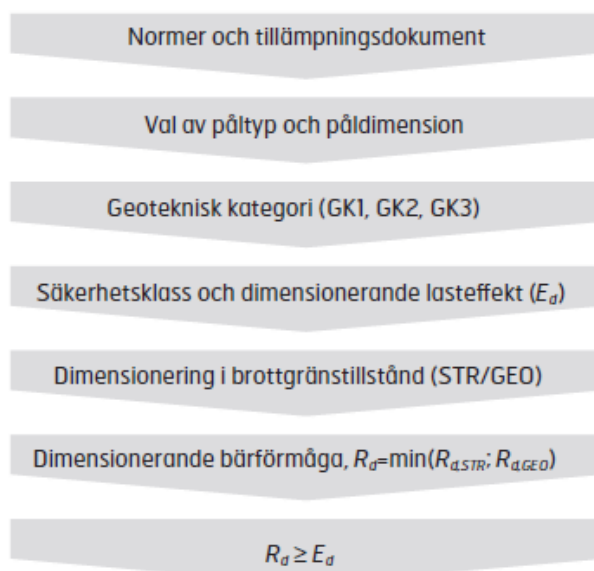
Det finns en hel del saker som allmänt kan krävas att beaktas vid dimensionering av pålar (EN1997-1, 2004, s. 64). För följande saker ska en lämplig förteckning sammanställas:

- Totalstabilitet
- Bärförmåga
- Dragbärförmåga
- Jordbrott
- Materialbrott
- Kombinerat brott i mark och pålgrundläggning
- Kombinerat brott i mark och konstruktion
- Sättning
- Hävning
- Sidorörelse
- Vibration

Som tidigare nämnt har detta arbete avgränsats till moment- och vågrättbelastade pålar och kommer därför bara ta upp moment- och vågrättbelastning beräkningsdelar. Följande standarder bör följas vid dimensionering av pålar (SSAB, 2020, s. 14):

- SS-EN1990 Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk
- SS-EN1991 Laster på bärverk
- SS-EN1992 Dimensionering av betongkonstruktioner
- SS-EN1993 Dimensionering av stålkonstruktioner
- SS-EN1994 Dimensionering av samverkanskonstruktioner i stål och betong
- SS-EN1997 Dimensionering av geokonstruktioner

samt de nationella bilagorna som standarderna hänvisar till beroende på grundläggningens funktionsområde.



Figur 10. Beräkningsgång för projektering och dimensionering av enskild påle. (SSAB, 2020, s. 14).

Vid dimensionering av pålar kan man följa beräkningsgångar som till exempel den ovanliggande som är gjord av SSAB.

Vid val av påltyp och dimension finns det en hel del att ta i beaktande. Speciellt vid användning av stålplålar kan saker som bland annat olika pålskor, stålqualität, skarver, tryckplattor och pålnings sätt spela stor roll. Pålens dimension spelar störst roll och man behöver ha en vetskap om hur stor pålen behöver vara för att få en lämplig utnyttjandegrad. (SSAB, 2020, s. 14). Lagerhållning och leveranstider kan också i vissa fall inverka. (Pålkommissionen, 2010, ss. 16-17).

Vid val av stålpåle bör man komma ihåg att RD-pålarnas dimensionerande bärförmåga normalt sätt är större än RR-pålarnas så länge som berget är oskadat. RD-pålen lämpar sig också mycket bra där marken innehåller stora block eller ifall bergsytan är mycket sned eller ligger nära markytan och saknar stödjande friktionsjord. Ifall projektet har strikta toleranser för horisontella och vertikala defekter samt lutning är RD-pålarna enklare att installera så att de hålls raka och inom kraven. De slagna RR-pålarna är oftast den metod som är mest ekonomisk, och lämpar sig bäst när marken är fri från stora stenar och andra block, ifall det finns stenar och block i marken eller ifall jordens fasthet ökar så ökar också riskerna att RR-pålarna kröks eller inte når fram till bärande jordlager. (SSAB, 2020, ss. 14-15).

När man dimensionerar i brottsgränstillstånd måste man dimensionera både för strukturell bärförmåga (STR), vilket är pålens bärförmåga, och för geoteknisk bärförmåga (GEO), som är markens bärförmåga. Oftast vid pålgrundläggning hör projektet till GK2, vilket innebär att för den strukturella bärförmågan ska dimensioneras enligt dimensioneringsätt 3 (DA3) medan den geotekniska bärförmågan ska dimensioneras enligt dimensioneringsätt 2 (DA2). De olika dimensioneringsätten tas upp i EN7-1: 2.4.7.3.4. dessa bestämmer på vilket sätt man ska implementera ekvationerna (2.6) och (2.7). (SSAB, 2020, ss. 16-17).

Korrosion bör beaktas vid dimensionering av stålplålar. Ifall plåarna fylls med betong bör man inte beakta invändig korrosion, men värdena bör då anges för en samverkans påle mellan stål och betong enligt EN4. I allmänhet dimensioneras plåarna med rostmån i olika tjocklek beroende på beräknad livslängd på pålen och den geotekniska undersökningen som bör inkludera en utvärdering på korrosionsförhållandena. Man kan ta itu med rostmån med hjälp av EN3-5 Dimensionering av stålkonstruktioner: plålar tabell 4.1 och tabell 4.2 (SSAB, 2020, s. 18).

Tabell 2 EN3-5 Dimensionering av stålkonstruktioner: plålar tabell 4.1. Rekommenderade avfrättningsvärde för plålar i jordmaterial, med eller utan grundvatten

Erforderlig livslängd	5 år	25 år	50 år	75 år	100 år
Ostörda naturliga jordar (sand, silt, lera, skiffer,)	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Förorenade naturliga jordar och industriområden	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Aggressiva naturliga jordar (kärr, sumpmark, torv, ...)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Opackade icke-aggressiva fyllningar (lera, skiffer, sand, silt,)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Opackade aggressiva fyllningar (aska, slagg,)	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75
ANM.					
1) Korrosionshastigheten i packade fyllningar är lägre än den i opackade. För packade fyllningar bör värdena i tabellen halveras.					
2) Värden för 5 och 25 år är baserade på mätningar medan övriga värden är extrapolerade.					

För pålstorlekarna RR75-RR245 och RD90-RD220, både med och utan betongfyllning, finns färdigt beräknade lastkapaciteter i SSAB:s dokument. Dessa går att använda vid dimensioneringen i bruksgränstillstånd STR. För dimensioneringen av bruksgränstillstånd GEO är PDA-mätning ett alternativ för att verifiera den geotekniska bärförmågan. Detta är mycket vanligt ifall en stålrörspåle med spets används. Ett annat alternativ som också kan

användas är provdragning. Detta gör att provpålningen blir viktig och att den borde utföras så snabbt som möjligt. (SSAB, 2020, s. 17).

Tabell 3 EN3-5 Dimensionering av stålkonstruktioner: pålar tabell 4.2. Rekommenderade avfrättningsvärden för pålar i sötvatten eller i havsvatten

Erforderlig livslängd	5 år	25 år	50 år	75 år	100 år
Vanligt sötvatten (älv, fartygskanal,) i zon med stort angrepp (vattenlinjen)	0,15	0,55	0,90	1,15	1,40
Kraftigt förorenat sötvatten (avloppsvatten, industriutlopp,) i zon med stort angrepp (vattenlinjen)	0,30	1,30	2,30	3,30	4,30
Havsvatten i tempererat klimat i zon med stort angrepp (lågvattnazon och skvalpzon)	0,55	1,90	3,75	5,60	7,50
Havsvatten i tempererat klimat i zon ständigt under vatten eller i tidvattnazon.	0,25	0,90	1,75	2,60	3,50
ANM.					
1) Korrosionshastigheten i vatten med tidvattenvariationer är normalt störst i skvalpzonen eller i nivån för lågvattenståndet. I de flesta fall uppträder dock de största böjspänningarna i zon ständigt under vatten, se Figur 4-1.					
2) Värden för 5 och 25 år är baserade på mätningar medan övriga värden är extrapolerade.					

Vid installation av pålarna uppkommer laster som gör att pålspetsens hållfasthet bör räknas. Enligt SFS-EN 14199 och SFS-EN 12699 får inte tryckspänningarna överstiga $0.9 \times$ karakteristiska sträckgränsen för stålet hos mikropålar och massaundanträngandepålar. (SSAB, 2020, s. 20).

7 Moment- och vågrätbelastning

För en vanlig grund med flera pålar så blir momentet oftast inte ett stort problem eftersom det delas ut jämt inom pålgruppen. Då utredningen i detta arbete görs utgående från en grund för en mastpelare med endast en påle så blir momentet ett större problem. Momentet kommer bli stort men normalkraften är relativt liten. Ifall det blir möjligt att endast använda en påle så kunde man önska att grunden skulle kunna förminskas från dess nuvarande storlek, vilket också leder till ett ökat moment.

Pålar och pålgrupper är vanligtvis fastgjutna i en styv plint. Innan datorer fanns till förfogande gjordes förenklade beräkningar där man i praktiken alltid antog att pelaren var ledat infäst och man försummade den kringliggande jordens påverkan. I dagsläget kan man med hjälp av program göra mera komplicerade beräkningar. Dock betyder det att bäddmodulen för jorden runt pålen måste bestämmas eller uppskattas och pålarnas böj- och

skjuvspänningar kontroll beräknas. Detta eftersom sidomotstånd med eller utan samtidig inspänning förorsakar moment och tvärkrafter i pålarna. (Pålkommisionen, 1983, s. 1).

Pålar utsätts för sidobelastning när en påles eller en pålgrupps sidokapacitet eller momentkapacitet utnyttjas. Detta betyder att moment uppkommer på grund av ett sidomotstånd med eller utan samtidig inspänning, vilket ger en horisontell last på pålen till följd av det moment som kommer av till exempel vindlast på den konstruktion som ligger på pålfundamentet som i sin tur kommer ge sidomotstånd från jorden. (Rasi-Koskinen, 2015, s. 9).

7.1 Vågrättbelastade pålar

Vågrätbelastning uppkommer på grund av markens rörelse runt en påle. Detta kan orsakas av bland annat olika stor belastning på olika sidor av pålfundamentet, lutande pålar som sätter sig eller olika schaktnivåer på olika sidor av pålfundamentet. När horisontaldeformationer hos lösa jordlager är stora och avståndet mellan pålarna i en pålgrupp är stort, eller ifall det handlar om en ensam påle, beror den resulterande sidolasten huvudsakligen på skjuvhållfastheten i de lösa jordlagren. Ifall det handlar om vanliga jordlager beaktar man samverkan mellan pålen och jordmassan, där pålen behandlas som en styv eller eftergivlig balk. Sidobelastade pålar borde dimensioneras enligt EN7-1: 7.7. (EN1997-1, 2004, ss. 79-80). Denna beräkningsgång kommer till stor del också utvecklas med RIL 254–2016 Paalutusohje som grund. RIL-böckerna grundar sig på Eurokoderna. (RIL 254-2016, 2016).

Bärförmågan för sidobelastning kan baseras på provbelastning eller på geotekniska undersökningsresultat och pålarnas hållfasthet. Vid sidoförskjutning ska följande beaktas enligt (EN1997-1, 2004, s. 80):

- Jordens styvhet.
- Enskilda pålarnas böjstyvhet.
- Inspänningsgraden mellan påle och konstruktion.
- Gruppverkan.
- Inverkan av lastriktnings ändringar eller cyklisk belastning.

Extremvärdena för sidobelastningen och sidomotståndet kan bestämmas enligt markfrakturstillståndet baserat på marktrycksteorin. Extremvärdenas storlek beror på jordens hållfasthetsegenskaper och den effektiva densiteten i friktionsjorden eller kohesionsjorden. I grovkornig jord och morän antas sidomotståndet öka linjärt med djupet och djupet räknas från markytan. Detta kan beräknas med följande ekvation. (RIL 254-2016, 2016, ss. 90-100).

$$p_m = 4 * \gamma' * D * K_p$$

Där p_m är extremvärdet för sidobelastningen eller motståndet [kN/m²],

γ' är jordens effektiva bulkdensitet [kN/m³],

D är djupet från ytskiktet [m] och

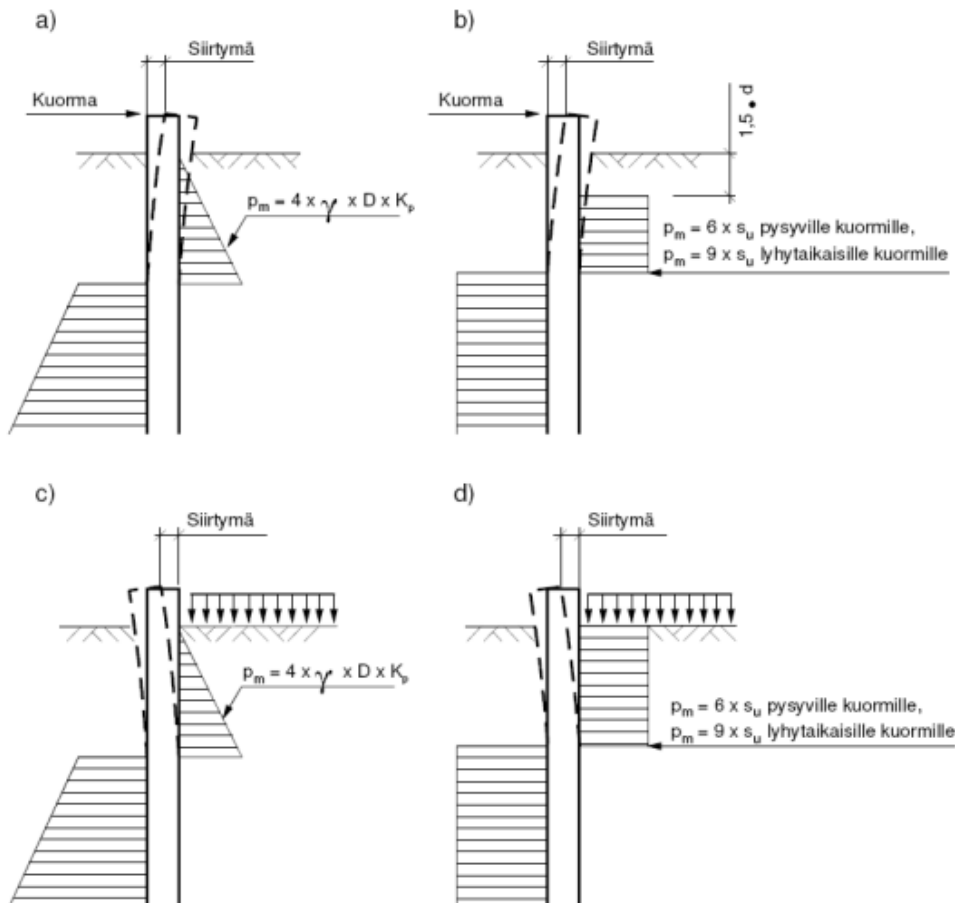
K_p är passiv marktrycksfaktor.

I finkornig jord antas sidomotståndets extremvärde vara konstant oavsett djup och här bör även beaktas att från ytskiktet och till ett djup på 1,5 d räknas bort ifall det handlar om friktionsjord. Ifall det handlar om kohesionsjord så räknas allt med från ytskiktet detta visas i figur 11. Lastens varaktighet bör tas i beaktande när man räknar kohesionsjordens sidomotstånd. Ifall lasten är långvarig multiplicerar man med värdet 6, medan i de fall när lasten är kortvarig används värdet 9 i ekvationen nertill. Sidobelastningens extremvärde fås enligt följande ekvation. (RIL 254-2016, 2016, ss. 90-100).

$$p_m = 6 \dots 9 * c_u$$

Där p_m är extremvärdet för sidobelastningen eller motståndet [kN/m²] och

c_u är den slutna skjuvhållfastheten [kN/m²].



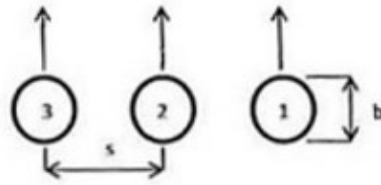
Figur 11. Visar var extremvärdena (karaktistiska) för p_m för styv påle uppkommer a) i grovkornig jord b) i finkornig jord c) i grovkornig jord d) i finkornig jord. (RIL 254-2016, 2016, s. 92).

Pålgruppens sidomotstånd bestäms på ett sådant sätt att pålgruppen kan motstå de belastningar den kommer att utsättas för med en tillräcklig säkerhet och så att sidoförskjutningarna håller sig inom de gränser som konstruktionen tillåter. Sidomotståndet för en enskild påle i en pålgrupp beror på pålarnas relativa läge. Ju längre från varandra pålarna befinner sig desto större motstånd i sidled per påle. Maxvärdet på en enskild påles sidomotstånd kan reduceras med en faktor f_m , som multipliceras med sidomotståndets extrema värde samt bastalet. Reduktionsfaktorn beror på pålplaceringen i pålgruppen och avståndet mellan pålarna (RIL 254-2016, 2016, ss. 90-100).

I figuren under hittas reduktionsfaktorerna i lastens riktning samt tvärs lastens riktning. För pålar som ligger i utkanten av pålgruppen beräknas reduktionsfaktorn f_m genom att multiplicera β_a och β_{b1} . För de pålar som ligger i de inre raderna i pålgruppen beräknas

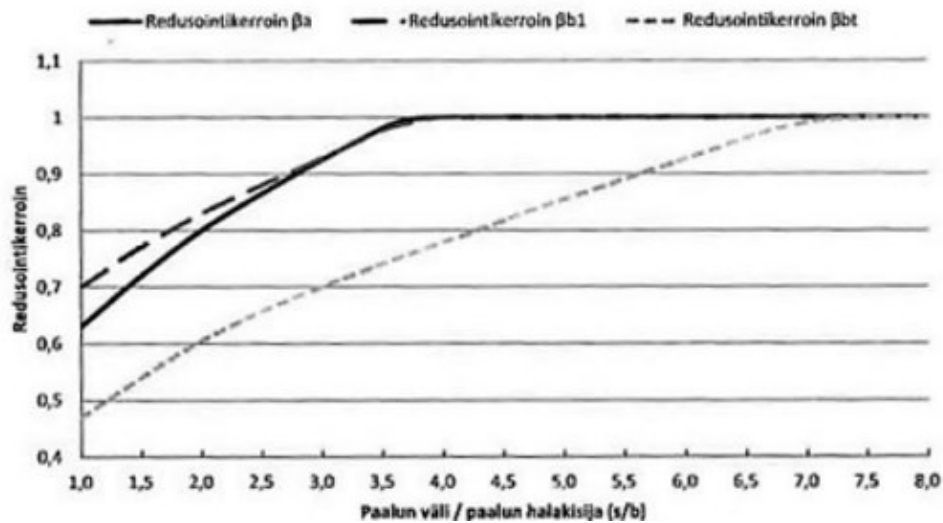
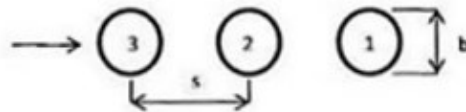
reduktionsfaktorn f_m genom att multiplicera β_a och β_{bt} med varandra. (RIL 254-2016, 2016, ss. 90-100).

Kuormaan nähden poikittainen paalurivi, redusointikerroin β_a



Kuorman suunnassa, ensimmäinen paalu, redusointikerroin β_{b1}

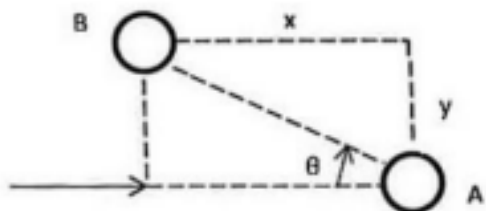
Kuorman suunnassa, toisesta paalusta eteenpäin, redusointikerroin β_{bt}



Figur 12. Reduktionsfaktorn för pÅlar. (RIL 254-2016, 2016, s. 95).

I de fall då pÅlarna inte finns vinkelrätt mot varandra, som visas i figur 12, kan reduktionsfaktorn beräknas med formeln här under. VÄrdet på β_a fås från figur 13 genom att jämföra avståndet mellan de aktuella pÅlarna och β_b (β_{b1} eller β_{bt}) beroende på vilken av pÅlarna som kontrolleras. (RIL 254-2016, 2016, s. 95).

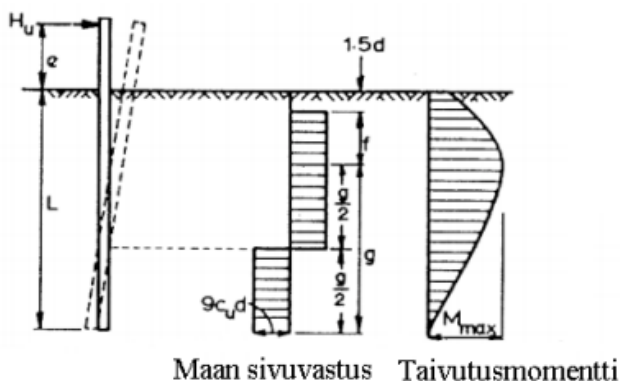
$$B_s = (\beta_b^2 * \cos(\theta)^2 + (\beta_a^2 * \sin(\theta)^2)^{0.5}$$



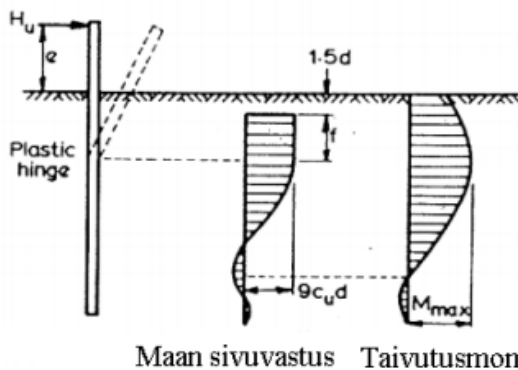
Figur 13. Pålarnas förhållande till varandra. (RIL 254-2016, 2016, s. 95).

Skillnaden mellan en kort, icke-spänd påle och en lång, ej inspänd påle kan ses i den underliggande bilden. Som bilden visar kommer den korta pålens jordmotstånd inte vara tillräckligt vilket gör att hela pålen kommer att vinklas när ett visst sidotryck uppstår. Detta betyder att pålen skulle klara av ett högre sidotryck men marken ger vika. Däremot när man ser på den långa pålen kommer en led att uppstå nere i marken när ett visst sidotryck appliceras. Detta betyder då i stället att pålen ger efter och att marken skulle ha klarat av ett högre sidotryck. (Pålkommissionen, 2021). Ifall pålen är styvt infäst upptill tål pålen cirka 50% mera sidobelastning än om den är fritt kan rotera. Indelningen i styvt infästa och fria pålar är dock problematiskt eftersom det är mycket svårt att få till en helt styv infästning.

a) Vapaa pää, jäykkyyssuhde $L/R \leq 2$



b) Vapaa pää, jäykkyyssuhde $L/R \geq 4$



Figur 14. skillnaden i kohesionsjord mellan korta och långa pålars brott. (Rasi-Koskinen, 2015, s. 29).

Detta kan leda till att infästningen inte är helt styv och pålen fortfarande kan rotera till ett visst mån. (Rasi-Koskinen, 2015, ss. 27-30).

Pålens beteende kan preliminärt bestämmas med hjälp av två olika ekvationer beroende på jorden. Ifall det är frågan om en finkornig jord kan man med hjälp av parametern R bestämma den tvärbelastade pålens beteende. När det är frågan om grovkornig jord bör parametern T bestämmas för bestämningen av pålens beteende. (RIL 254-2016, 2016, ss. 90-100).

$$R = \sqrt[4]{\frac{EI}{E_s}}$$

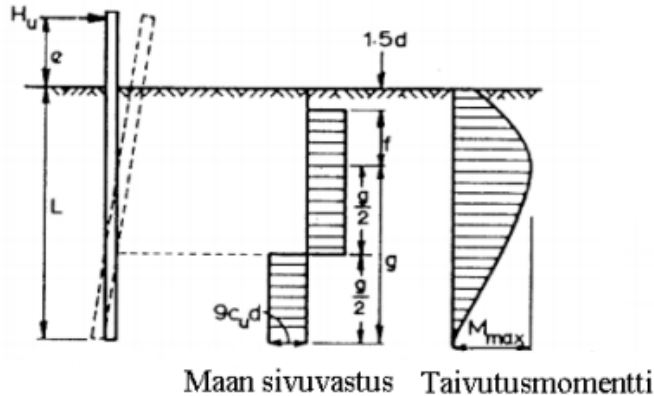
$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}}$$

Där EI är pålens böjstyvhets [Nmm^2],

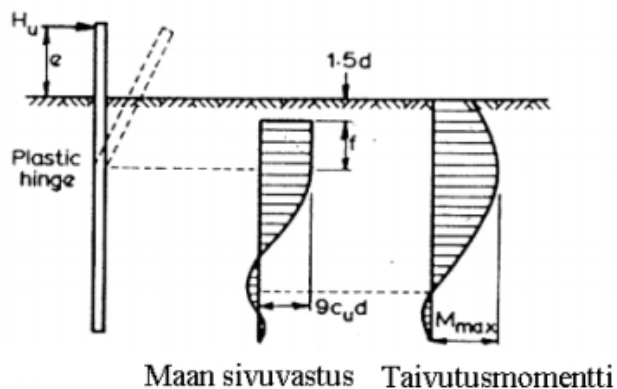
E_s är kohesionsjordens horisontella elasticitetsmodul [Nmm^2] och

n_h är grovkorniga jordens horisontella baskoefficient [Nmm^3]

a) Vapaa pää, jäykkyysuhde $L/R \leq 2$



b) Vapaa pää, jäykkyysuhde $L/R \geq 4$



Figur 15. skillnaden i friktionsjord mellan korta och långa pålars brott. (Rasi-Koskinen, 2015, s. 30).

Ifall pålens styvhetsförhållande $\frac{L}{R}$ eller $\frac{L}{T}$ där L är pålens neddrivningsdjup är mindre än två kommer pålen att vara en kort påle, vilket betyder att själva pålens deformation inte bör beaktas. (RIL 254-2016, 2016, ss. 90-100). En kort påles rotationscentrum i en homogen jord antas vara på 70% av pålens neddrivningsdjup. (Rasi-Koskinen, 2015, ss. 27-30). I de fall då pålens styvhetsförhållande är större än fyra bör pålens deformation beaktas i beräkningarna. (Rasi-Koskinen, 2015, ss. 27-30). I sådana fall har pålens extremvärde nåtts vilket betyder att pålen kommer att ge vika före marken. Det här betyder också att man måste använda en större påle ifall beräkningarna visar att böjmotståndet inte räcker till och att det inte gör någon skillnad att driva ner pålen med tanke på hur stor sidobelastning som pålen kan klara av. (RIL 254-2016, 2016, ss. 90-100).

I figur 14 och 15 visas effekten av styvhetsförhållandet på brottmekanismen när pålens övre ända är fri att röra sig. Skillnaden mellan bilderna är att figur 14 visar pålens brott i kohesionsjord medan figur 15 visar brottet i friktionsjord. (Rasi-Koskinen, 2015, ss. 27-30).

7.1.1 Sidobelastningsmotstånd

Sidobelastningsmotståndet blir ofta beroende på pålens tillåtna förskjutning snarare än brott i pålen eller jorden. Sidobelastningsmotståndet är direkt påverkat av pålens styvhet, jordlagrens styvhet och pålinfästningen. Förskjutningarna kan beräknas med endera bastal- eller modulmetoder. Dessa kan användas för att ta reda på sambandet mellan lasten och förskjutningen. Sidomotståndet och tvärbelastningen får dock under inga omständigheter överstiga de värden som fåtts i samband med brottsprov. (RIL 254-2016, 2016, ss. 90-100).

I friktionsjord med morän eller grovkornig jord blir horisontella bastalet oberoende av tiden eftersom direkt då belastningen påförs börjar förskjutningarna också ske. Friktionsbastalet kan med statisk belastning bestämmas enligt ekvationen under. Det horisontella bastalet k_s antas öka linjärt till ett djup på tio gånger diametern, därefter förblir bastalet konstant. (RIL 254-2016, 2016, ss. 90-100).

$$k_s = n_h * \frac{D}{d}$$

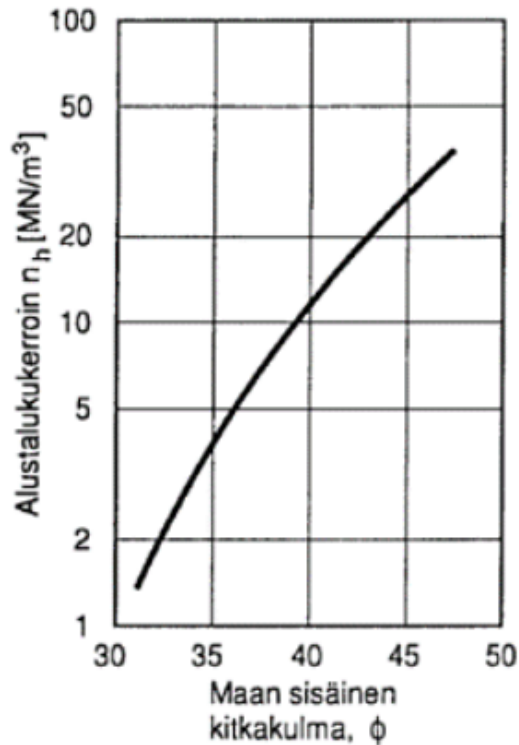
Där k_s är jordens bastal [kN/m^3],

n_h är bastalsfaktor [kN/m^3],

d är pålens diameter [m] och

D är djupet från markytan [m].

Bastalsfaktorn n_h kan enligt bilden under bestämmas baserat på skjuvhållfasthetsvinkeln, under grundvattennivå antas n_h vara 60% av värdena som fås ur grafen.



Figur 16. graf för att få ut värdet på faktor n_h ovanför grundvattennivån. (RIL 254-2016, 2016, s. 98).

När det gäller mycket krävande GL3 och krävande GL2-projekt i friktionsjordar, är det rekommenderat att bastalet k_s bestäms utgående från kompressionsmodulen M_s eller elasticitetsmodulen E_d enligt formeln under. (RIL 254-2016, 2016, ss. 90-100).

$$k_s = \beta * \frac{M_s}{d} = \frac{E_d}{d}$$

Där k_s är jordens bastalet [kN/m³],

β är en materialkonstant,

d är pålens diameter [m],

E_d är elasticitetsmodulen [kN/m²] och

M_s är kompressionsmodulen [kN/m²].

Värdena för modulerna M_s och E_d beror på spänningsnivån samt deformationen så det är viktigt att de bestäms i rätt spännings- och töjningsintervall. Genom ödometriskt eller

triaxiellt test kan man bestämma elasticitetsmodulen. Kompressionsmodulen kan bestämmas utifrån borrhöretståndet. Modultalet m och spänningsexponenten β i ekvationen under kan fås ut ur ett ödometer-test eller så kan det hittas i RIL 254. (RIL 254-2016, 2016, ss. 90-100).

$$M_s = m * 100 * \left(\frac{\sigma'_v}{100}\right)^{1-\beta}$$

Där m är modultal,

β är en spänningsexponent och

σ'_v är den effektiva vertikala spänningen.

Vid mycketkrävande grundförhållanden GK3 som under utsätts för långtidsbelastning rekommenderas att bastalet k_s bestäms i kohesionsjord utifrån ödometer-test enligt ekvationen under. (RIL 254-2016, 2016, ss. 90-100).

$$k_s = \beta * \frac{M_s}{d}$$

Där k_s är jordens bastalet [kN/m^3],

β är en materialkonstant,

d är pålens diameter [m] och

M_s är kompressionsmodulen [kN/m^2].

Ifall grundförhållandena är mycketkrävande GK3 men belastningen är kortvarig borde bastalet k_s bestämmas utifrån elasticitetsmodulen E_d för det stängda utrymmet som kan bestämmas med traxialtest. Då kan k_s beräknas enligt ekvationen under. (RIL 254-2016, 2016, ss. 90-100).

$$k_s = \frac{E_u}{d}$$

Där k_s är jordens bastalet [kN/m^3],

d är pålens diameter [m] och

E_u är elasticitetsmodulen [kN/m^2].

Det horisontella bastalet i kohesionsjord påverkas av belastnings tiden och pålens diameter. Under krävande grundförhållanden GK2 med långvarig last kan bastalet k_s bestämmas enligt följande ekvation. (RIL 254-2016, 2016, ss. 90-100).

$$k_s = 20 \dots 50 * \frac{c_u}{d}$$

Ifall lasten är kortvarig kan k_s beräknas enligt följande ekvation.

$$k_s = 50 \dots 150 * \frac{c_u}{d}$$

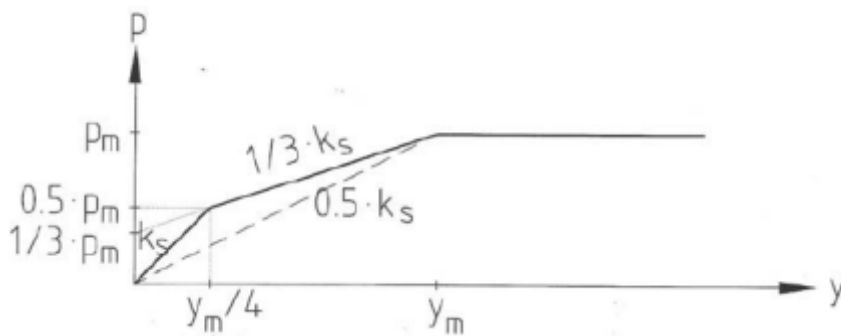
Där k_s är jordens bastal [kN/m^3],

d är pålens diameter [m] och

c_u är markens slutna skjuvhållfasthet [kN/m^2]

7.1.2 Sambandet mellan sidotryck och förskjutning

I Grovkornig jord kan man enligt figuren under bryta ut ett ungefärligt samband mellan sidotrycket och den förskjutning som orsakas i friktionsmarken. Figuren ger p_m som är pålens extrema tryck, y_m som är sidorörelsen och k_s som föreställer bastalet. Dessa beräkningar är invecklade och görs med hjälp av program som är gjorda för pålningsberäkning. (Rasi-Koskinen, 2015, ss. 44-46).

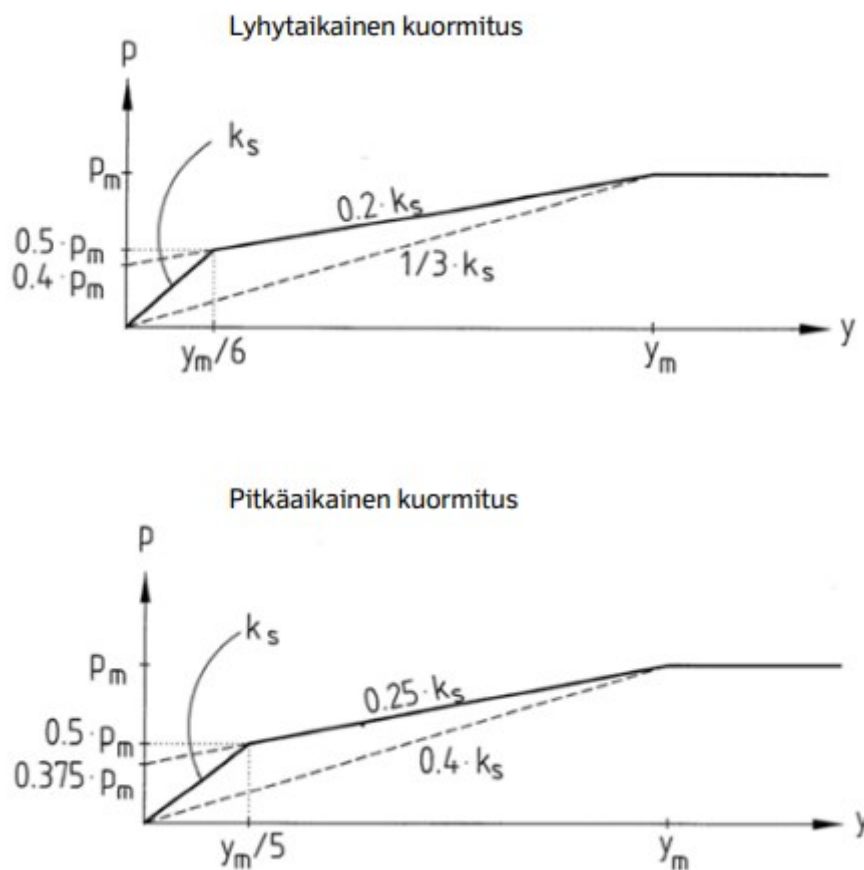


Figur 17. pålens sidotryck och förskjutning i samverkan. (Rasi-Koskinen, 2015, s. 44).

Ifall programmet som används använder en linjärelastisk fjäder som kallas Winkler-basen startas beräkningarna med motsvarande bastal k_s . Ifall fjäderförskjutningens värde blir större än $\frac{y_m}{4}$ måste bastalet reduceras och räknas om. Beräkningen fortsätter tills krafterna från alla fjädrar är på den heldragna linjen i figur 17. Samma sak erhålls vid den andra proceduren, ifall $p > \frac{p_m}{2}$ eller $y = \frac{y_m}{4}$ när den första beräkningsomgången är gjord appliceras en fjäder som orsakar horisontell kraft på pålen som ska motsvara ett sidomotstånd på $\frac{p_m}{3}$ vilket bastalet $\frac{k_s}{3}$, efter detta görs en ny beräkning med de nya talen. Ifall olinjärmodellering av det elastiska området godkänns av programmet bör endast en beräkning göras ifall (Rasi-Koskinen, 2015, ss. 44-46).

Ifall det handlar om kohesionsjord spelar också tiden en roll i ekvationen. Detta leder till att vi för kohesionsjordar har vi två olika grafer, en för långvarigbelastning och en för

kortvarigbelastning. De här två visas undertill. För kohesions jorden är beräkningarna motsvarande till de för friktionsjorden, men värdena ändrar. Även här bör endast en beräkning göras ifall programmet tillåter olinjär modellering av det elastiska området. (Rasi-Koskinen, 2015, ss. 44-46).



Figur 18. pålens sidotryck och förskjutning i samverkan. I kohesionsjord med kort- och långvarig last. (Rasi-Koskinen, 2015, s. 45).

8 Resultat

Arbetets syfte var att jämföra stål- och betongpålar samt de områden där de lämpar sig bäst, en PDA-mätningens förklaring och beräkningsanalys av moment och sidobelastade pålar.

I kapitel 2, 3 och 4 jämfördes pålarna. Där framkom att stålpålar är den mest använda påltypen och av god anledning. Stålpålen är lättare att transportera, den går att montera med noggrannare marginaler på samma gång som den har höga hållfasthetsvärden. Detta gör att stålpålar lämpar sig mycket bra i samband med alla typer av konstruktionsbyggnader.

Betongpålen lämpar sig dock bra i projekt där djupgrundläggning görs eftersom dess tvärsnitt är stort.

I kapitel 5 utreddes PDA-mätning och dess syfte, denna mätning görs nästan alltid i pålningsarbeten inom Sverige och Finland eftersom informationen som fås är mycket viktig. Med den information man får kan man bland annat garantera hållfastheten utan att behöva stoppslå pålarna så hårt att de riskerar att böjas eller gå sönder. Dessutom kan man även minska den ekonomiska kostnaden då man kan använda kortare och färre pålar eftersom man kan garantera bärförmågan i realtid.

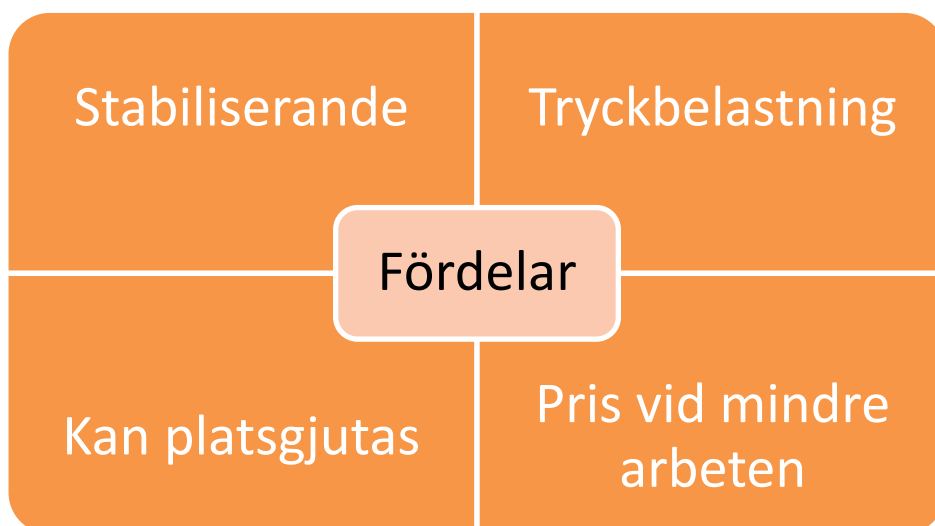
I de sista kapitlen görs en utredning över vad som behöver beräknas och tas i beaktande vid pålningsplanering. Val av geoteknisk klass bör göras i början av planeringen för att få reda på vad som bör beaktas i beräkningarna. I Finland och Sverige blir oftast STR dimensionerande efter som vi har en relativt lös jord med ett hårt berg under. För allmänna beräkningar har ofta påltillverkarna egna beräkningsprogram som ofta är gratis att använda. Ett sådant program har till exempel SSAB för sina RR- och RD-pålar. De största faktorerna vid beräkning av sidobelastade pålar är pålens tvärsnitt, jordkvalitet och pålens längd. Denna sidobelastning kan uppstå av olika skäl men ett av de vanligaste är att den överliggande konstruktionen ger ett moment som uppkommit av excentrisk belastning. Ifall en påles inremoment bör beaktas kan man enligt dess materials Eurokod beräkna pålens böjhållfasthet.

8.1 Jämförelse mellan betong- och stålplålar

Pålarna som används idag är till största delen betong- eller stålplålar. Pålarna lämpar sig till olika saker som tidigare nämnts i kapitel 2. Följande saker kapitel jämför för och nakedlarna med betong- och stålplålar. PDA-mätningen kan utföras på båda materialen kan den geotekniska bärförmågan garanteras för båda påltyperna.

8.1.1 Betongplålar

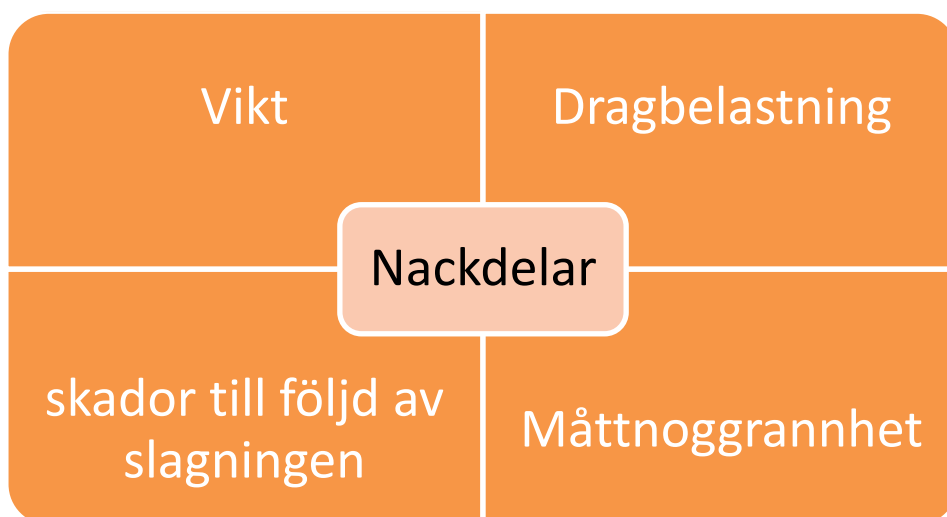
Betongplålar lämpar sig bra för djupgrundläggning eftersom tryckkarean är stort. Betong som material lämpar sig bra mot tryck och ger möjlighet att göra en platsgjuten påle ifall det handlar om svåråtkomliga ställen. Vid mindre arbeten lönar det sig ofta ekonomiskt sett att använda betongplålar i stället för stålplålar.



Figur 19. Fördelar med betongpålar.

Nackdelarna med betongpålar är monteringen av förtillverkade pålar. Betongpålar kan inte borrar ner vilket gör att man måste slå ner dem. Detta kan leda till att pålen skadas under nedrivningen och att man inte kan uppnå samma måttnoggrannhet som med borrade stålpålar.

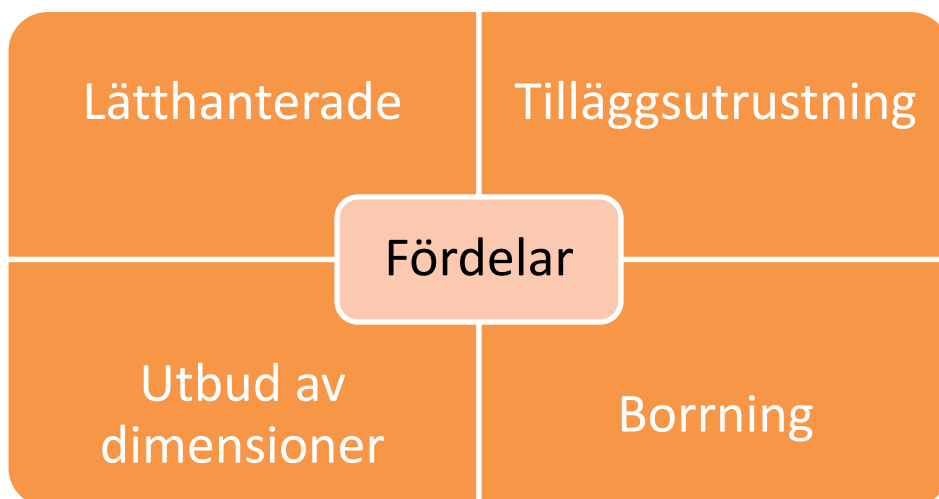
Betong som material är bra mot tryckbelastning men klarar inte av dragbelastning lika bra. Eftersom betongpålarna måste göras kompakta så blir pålarna snabbt tunga vilket gör att de blir svårhanterade.



Figur 20. Nackdelar med betongpålar.

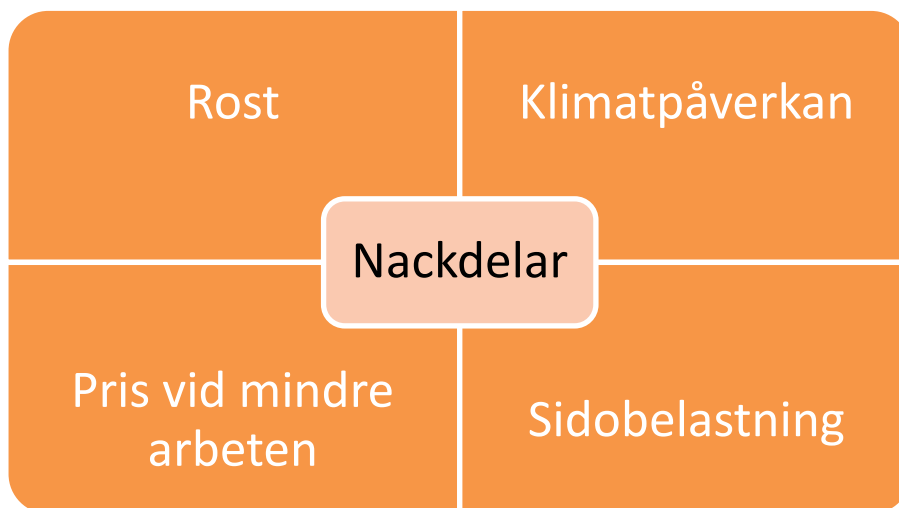
8.1.2 Stålpålar

Fördelarna med stålpålar är att de blir relativt lätta och därför lätta att transportera och hantera. Dessutom finns det ett stort utbud av dimensioner i lager vilket gör att tiden mellan beställning och leverans blir korta. Stålpålar kan också utrustas enligt behov med olika bergskor, tryckplattor och skarvar. Detta gör att man kan optimera bärförmågan. En av de saker som är mest betydande är att det finns möjlighet att borra stålpålar vilket ger rakare pålar.



Figur 21. Fördelarna med stålpålar.

Det finns också en del nackdelar med stålpålar. Ifall det handlar om ett litet projekt med pålar som har liten diameter lönar det sig oftast att använda betongpålar. Stålpålarna är också ganska dåliga mot sidobelastning eftersom tryckarean blir liten. På grund av att stål rostar måste man dimensionera rostmån. I byggnadsbranschen blir det också vanligare att man vill bygga miljövänligt då är stål inte det bästa alternativet.



Figur 22. Nackdelarna med stålplålar.

9 Sammanfattning

Resultatet av detta examensarbete blev en jämförelse av stål- och betongplålar, en utredning av PDA-mätning och en analys av beräkningsgången för moment och sidobelastade plålar.

Jämförelsen mellan stål- och betongplålar blev grundlig och ingående med olika alternativ av de pålningsätt som lämpar sig i olika situationer och vilka plålar samt dimensioner av plålar som används. För de projekt som Kronqvist ingenjörbyrå hittills har haft är nog stålplålar de som passar bäst eftersom pålnings slutförklarhet har varit av stor betydelse.

PDA-mätningens utredning gav ett lättläst och informationsrikt kapitel där fördelarna med mätningen påpekas, denna mätning är att rekommendera i alla pålningsarbeten eftersom den kan garantera hållfastheten på samma gång som den kan minska kostnaden för pålningen.

Beräkningsgången gjordes enligt Eurokoderna och RIL-handböckerna. Beräkningen av sambandet mellan sidotryck och förskjutning kräver datorprogram för att få exakta svar men kan beräknas på ett ungefär med formler, dock har i detta arbete visats hur programmen räknar.

10 Källförteckning

- Bauer. (2021). *Bauer Sverige*. Hämtat från https://bauer-grundlaggning.se/se/methods/bored_piles/ den 2021 12 29
- EN1997-1, (. (2004). *EN1997-1. (u.d). Eurokod 7. Dimensionering av geokonstruktioner – Del 1: Allmänna regler*. Bryssel: European Committee for standardization.
- EN1997-2, (. (2007). *EN1997-2, (u.d). Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner – Del 2: Marktekniska undersökningar*. Bryssel: European Committee for standardization.
- Finlands byggbestämmelsesamling. (2003). *Finlands byggbestämmelsesamling, del B3: Miljöministeriets förordning om geokonstruktioner*. Helsingfors: Miljöministeriet.
- Hercules. (februari 2018). *Hercules grundläggning AB*. Haettu 29. december 2021 osoitteesta https://hercules.se/wp-content/uploads/2174-2004-Brochure_Hercules_Betongp%C3%A5lehandboken_A5_VERS7.pdf
- Kiwa inspecta Finland. (2021). *Kiwa inspecta Finland*. Haettu 29. december 2021 osoitteesta <http://www.kiwa.com/fi/fi/palvelumme/paalumittaukset-pda/pdf>
- Kronqvists. (20. December 2021). *Kronqvists*. Noudettu osoitteesta <https://www.kronqvist.com/>
- Pålkommisionen. (1983). *Pålgrupper med sidomotstånd och inspänning*. Stockholm.
- Pålkommisionen. (2010). *Borrade stålrörspålar*. Linköping: Pålkommisionen.
- Pålkommisionen. (2021). *Pålstistik för Sverige 2020*. Stockholm: Pålkommisionen.
- Rasi-Koskinen, H. (2015). *Vaakasuuntaiset alustaluvut*. Helsingfors: Liikenneviraso.
- RIL 254-2016. (2016). *RIL 254-2016 Paalutusohje*. Suomen Rakennusinsinöorien Liitto ry. & Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry.
- SSAB. (2020). *SSAB:s RR®- och RD®-pålar*. Haettu 28. december 2021 osoitteesta <https://www.ssab.fi/tuotteet/terasluokat/infrastrukturi/tuotteet/steel-piles-large-diameter-piles>