



PAALUTUSOHJE 2011:N MUKAI- NEN KOHDEKOHTAINEN PAALU- TUSTYÖ

Henri Unkila

Opinnäytetyö
Toukokuu 2013
Rakennustekniikka
Infrarakentaminen

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka
Infrarakentamisen suuntautumisvaihtoehto

UNKILA, HENRI:

Paalutusohje 2011:n mukainen kohdekohtainen paalutustyö

Opinnäytetyö 61 sivua, joista liitteitä 7 sivua
Toukokuu 2013

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia paalun rakenteellisen kestävyys ja paalutustyön välisiä riippuvuuksia uuden 1.7.2013 käyttöönotettavan Paalutusohje 2011:n mukaisesti. Tarkoituksena oli tutkia paalun lyönninaikaisten jännitysten ja lopullisen kantavuuden, eli geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvon, välisiä yhteyksiä.

Paalujen asennuksessa suurin riski on ollut paalujen rikkoutuminen liian kovan lyöntirasituksen takia. Työssä pyrittiin tutkimaan työtapaa, jossa käytettävä kalusto, käytettävä paalu sekä kohteen maaperä- ja ympäristöolosuhteet sovitetaan yhteen tietokonesovelluksen avulla. Lisäksi tutkittiin työtavan vaikutuksia paalun geoteknisen kestävyyskehittämiseen. Työssä käytettiin taustatietona uutta paalutusohjetta, muuta kirjallista materiaalia sekä henkilöhaastatteluja.

Esimerkkityömaalle Lahden uuden paloaseman paalutustyömaalle tehtiin koepaalutusta varten iskuaaltoyhtälöanalyysiin pohjautuva asennusohje, jota verrattiin mitattuihin dynaamisiin koekuormituksiin. Työmaalla suoritettua dynaamisen koekuormituksen kantavuuksia verrattiin simuloituihin kantavuuksiin. Työssä käytiin läpi myös laadunvarmistusmittausten ja simulointitulosten laskeminen eurokoodien mukaisilla korrelaatio- ja varmuuskertoimilla. Työn yhteydessä tehtiin myös PO-2011:n mukainen paalutuspöytäkirjamalli.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Structural Engineering
Civil Engineering

UNKILA, HENRI:

Site optimized pile driving in agreement with Paalutusohje 2011

Bachelor's thesis 61 pages, appendices 7 pages
May 2013

The purpose of this thesis was to research the dependencies between the structural resistance of the concrete pile and the pile driving. The research was made by the terms of new eurocode based pile driving manual, Paalutusohje 2011, which will be introduced in 1.7.2013. The purpose was also to research the connections between pile driving and the final capacity of pile.

The biggest risk in pile driving has been the breakage of the piles because of the strike stressing has been too hard. The aim of this work was to research the method where the used piling equipment, used pile type and the soil and environment of the site are been optimized with computer technology. The purpose was also to find out if it is possible to increase the capacity of pile by using this work method. The main source of information was Paalutusohje 2011. Other sources used were books and interviews.

The result of this work was a work method. Work method was tested in the site of the new fire station in Lahti. The method was based on wave equation analysis which was compared to the results of pile driving analysis. The calculation of the results of pile driving analysis and the wave equation analysis has been done by the standards of eurocodes. In this work was also made piling record in norms of Paalutusohje 2011.

Key words: pile driving, hammer pile driving, concrete pile, wave equation analysis, PO-2011

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Taustat.....	6
1.2	Työn tavoitteet	6
1.3	Työn rajaukset.....	7
2	PAALUTUKSEN TEORIAA	8
2.1	Yleistä	8
2.2	Paalutuskalusto	8
2.2.1	Pudotus- ja hydraulijärkäleet.....	9
2.2.2	Iskutyyny ja iskusuoja.....	10
2.2.3	Muut osat ja varusteet	11
2.3	Paalutyypit	12
3	TERÄSBETONIPAALUN RAKENNE	13
3.1	Paalun rakenne ja varusteet.....	13
3.1.1	Yleistä	13
3.1.2	Betoni	13
3.1.3	Betoniteräket.....	14
3.1.4	Kärjet ja jatkokset sekä muut varusteet.....	15
3.2	Teräsbetonipaalun mitoitus.....	18
3.2.1	Yleistä	18
3.2.2	Rakenteellisen kestävyden määrittäminen	19
3.2.3	Paalun geoteknisen kestävyden määrittäminen yleisesti.....	21
3.2.4	Paalun geoteknisen kestävyden määrittäminen staattisen koekuormituksen avulla.....	22
3.2.5	Paalun geoteknisen kestävyden määrittäminen pohjatutkimustulosten avulla.....	22
3.2.6	Paalun geoteknisen kestävyden määrittäminen paalutuskaavojen avulla	22
3.2.7	Paalun geoteknisen kestävyden määrittäminen PDA-mittauksen avulla	23
3.2.8	Paalun geoteknisen kestävyden määrittäminen iskuaaltoanalyysin avulla	24
4	PAALUTUSOHJE 2011 MUKAINEN PAALUTUSTYÖ JA KOHDEKOHTAINEN PAALUTUSTYÖ	27
4.1	Yleistä	27
4.2	Geotekninen luokka	27
4.2.1	Yleistä	27
4.2.2	Geotekninen luokka 1 (GL1)	27

4.2.3	Geotekninen luokka 2 (GL2)	28
4.2.4	Geotekninen luokka 3 (GL3)	28
4.3	Paalutustyöluokka	29
4.4	Paalutustyön työvaiheet	30
4.5	Paalutustyönjohtaja ja muu työmaahenkilöstö	31
4.6	Paalutustyön dokumentointi ja laadunvarmistus PO-2011 mukaan	32
4.6.1	Yleistä	32
4.6.2	Paalutuspöytäkirja	33
4.6.3	Paalutustyön toteutumapiirustus	34
4.7	Ympäristön huomioiminen	35
4.7.1	Yleistä	35
4.7.2	Muutokset maapohjassa ja huokosvedenpaineen nousu	35
4.7.3	Tärinä ja melu	36
4.8	Kohdekohtainen paalutustyö.....	38
5	ESIMERKKITYÖMAALTA SAADUT TULOKSET	40
5.1	Yleistä	40
5.2	Käytettävä paalutyyppi sekä käytettävä kalusto	42
5.3	Iskuaaltoyhtälöanalyysi	43
5.3.1	Yleistä	43
5.3.2	Maamallin luonti	44
5.3.3	Paalutyyppin ja paalutuskaluston mallinnus	45
5.3.4	Iskuaaltoyhtälöanalyysin tulokset	46
5.4	Ympäristön huomioiminen kohteessa.....	47
5.5	Koepaalutustyö	47
5.6	Koekuormituksen tulokset	48
5.7	Yhteenvedo ja jatkotoimenpiteet	49
6	POHDINTA.....	52
	LÄHTEET.....	54
	LIITTEET	55
	Liite 1. GRLWEAP iskuaaltoyhtälöanalyysi työnaikainen tilanne.....	55
	Liite 2. GRLWEAP iskuaaltoyhtälöanalyysi, lopullinen tilanne	56
	Liite 3: 1 (3) Paavolan paloaseman kohdekohtainen paalutusohje	57
	Liite 3: 2 (3). Paavolan paloaseman kohdekohtainen paalutusohje	58
	Liite 3: 3 (3). Paavolan paloaseman kohdekohtainen paalutusohje	59
	Liite 4. Paalutuspöytäkirja, yleinen osa.....	60
	Liite 4. Paalutuspöytäkirja, paalukohtainen osa.....	61

1 JOHDANTO

1.1 Taustat

Skanska Infra Oy on suomen suurimpia infrarakentajia. Yhtiön vuoden 2011 liikevaihto oli 115 milj. euroa. Yhtiö työllistää noin 300 henkilöä neljässä yksikössä; väylä- ja silta-rakentaminen, vesihuolto-, teollisuus- ja kalliorakentaminen, alueellinen infrarakentaminen ja pohjarakentaminen.

Skanska Infran Oy:n pohjarakentamisen yksikössä on pitkät perinteet paaluttamisesta. Vuonna 2011 tapahtuneen Soraset Yhtiöt Oy:n oston myötä yritys laajensi kapasiteetti-ään myös paalutustöiden osalta. Tällä hetkellä yhtiöllä on 6 lyöntipaalutuskonetta. Vuonna 2012 yhtiö asensi yli 300 km teräsbetonisia lyöntipaaluja.

1.2 Työn tavoitteet

Paalutustyön keskeisimmät ohjeet ja normit on koottu Suomen Rakennusinsinöörien Liiton, RIL ry:n, toimittamiin julkaisuihin. Aikaisemmin käytössä on ollut Lyöntipaalu-tusohje 2005, Pienpaalutusohje 2006 sekä Suurpaalutusohje 2001. Nämä teokset on koottu yhteen ja päivitetty vuonna 2011 julkaistuun kirjaan Paalutusohje 2011.

Työn tavoitteena on selvittää Rakennusinsinööriunionin uusimman paalutusohjeen suo-missa puitteissa teräsbetonisen paalun (300x300 mm²) rakenteellisen kestävyuden ja paalun asennuksen välisiä riippuvuuksia. Tavoitteena on saada aikaan paalutustyöme-nettely, jolla voidaan kohdekohtaisesti optimoida paalun kantavuus. Apuna käytetään asennustekniikoita ja kohdekohtaista suunnittelua. Tarkoitus on siis saada käyttöön mahdollisimman paljon järkäleen lyöntienergiaa, kuitenkin särkemättä paalua.

1.3 Työn rajaukset

Työssä käsitellään vain lyömällä asennettavia teräsbetonisia tuki- ja kitkapaaluja. Mitoituksen osalta työ rajataan koskemaan vain pystysuuntaisia kuormia, koska useimmissa tapauksissa ne määräävät paaluperustuksen lopullisen kantavuuden. Työstä on rajattu pois paalun poikittaiskuormitukset sekä paalun nurjahtaminen, jonka riski on pieni teräsbetonipaalulla. Työssä ei myöskään käsitellä poikkileikkauksen momenttikestävyyden rakenteellisen arvon määrittystä.

2 PAALUTUKSEN TEORIAA

2.1 Yleistä

Paaluperustusten käyttö rakentamisessa on yleistynyt jatkuvasti. Paalujen käyttö on tarpeellista, kun kantava pohja on niin syvällä että perustaminen muutoin tiivisrakenteisten pohjakerrosten varaan olisi liian kallista. (Rantamäki & Tammirinne, 2000, 43.)

Yhtenä syynä voidaan pitää suurten kaupunkien leviämistä heikkopohjaisillekin alueille, joita on vältelty rakennuskustannusten vuoksi, mutta jotka ovat sijainniltaan otollisia. Henkilötyökustannusten nousu, paaluteollisuuden ja paalutuskaluston kehitys sekä paalutustyön nopeus esimerkiksi massanvaihtoon verrattuna ovat tuoneet paalutuksen vaihtoehdoksi myös siellä, missä sitä ei välttämättä tarvitse toteuttaa. (Jääskeläinen, 2009, 52)

2.2 Paalutuskalusto

Lyöntipaalutuskoneen (Kuva1.) tulee olla nopeasti lyöntivalmiuteen saatettavissa ja sen tulee olla vakaa pehmeilläkin alustoilla turvallisesti. Sen tulee täyttää suunnitelmissa paalutuskalustolle ja paaluelementeille esitetyt vaatimukset. Paalutuskoneen maston kaltevuus tulee olla säädettävissä siten että vinopaalut voidaan asentaa suunniteltuun kaltevuuteen. Lyöntilaitteen tulee olla sellainen että paalu voidaan lyödä suunniteltuun syvyyteen ja että paalu säilyy ehjänä. Laitteiden tulee olla standardien SFS-EN 791 ja SFS-EN 996 mukaisia. (Paalutusohje 2011, 2011, 195, 253)

Paalutuskoneen lyöntilaitteena käytetään yleisimmin pudotus- tai hydraulijärkälettä. Teräksisten pienpaalujen yleistyessä on markkinoille tullut myös paineilma- ja hydraulitoimisia vasaroita, jotka ovat alun perin tarkoitettu kivien rikkomiseen. Vasaroiden ero järkäleisiin nähden on siinä että niiden iskutiheys on huomattavasti suurempi. (Jääskeläinen, 2009, 79)

Koska tässä työssä käsitellään vain teräsbetonipaalun asennusta, ei tässä yhteydessä käsitellä vasaroita tai täryttimiä lyöntilaitteina. Vasaroita ja täryttimiä käytetään useimmiten teräspaalujen asennukseen. (Paalutusohje 2011, 2011, 195)



KUVA1. Skanska Infran Junttan PM23 -lyöntipaalutuskone. (Henri Unkila)

2.2.1 Pudotus- ja hydraulijärkäleet

Pudotusjärkäleet ovat vaijeriripusteisia. Järkäle nostetaan vaijerilla haluttuun pudotuskorkeuteen ja pudotetaan sen jälkeen paalun päällä olevaan iskutyynyyn. Teoreettisesti siis paaluun kohdistuva jännitys on järkäleen paino kertaa maan putoamiskiihtyvyys. Käytäntö on kuitenkin jotain aivan muuta. (Paalutusohje 2011, 2011, 196)

Hydraulijärkäleet (Kuva2.) ovat joko yksi- tai kaksitoimisia. Yksitoiminen järkäle nostetaan ylös hydraulisesti ja pudotetaan sitten vapaasti paalun päällä olevaan iskutyynyyn. Kaksitoiminen järkäle tarkoittaa sitä että järkälettä kiihdytetään hydraulisesti pudotuksen aikana. (Paalutusohje 2011, 2011, 196)

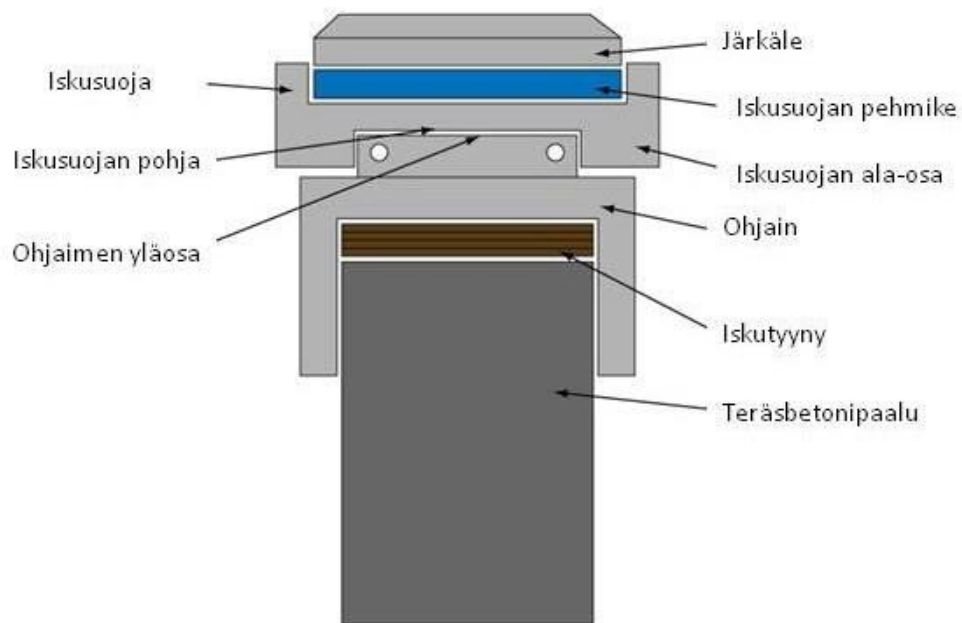


KUVA2. Junttan HHK-sarjan hydraulijärkele. (Henri Unkila)

2.2.2 Iskutyyny ja iskusuoja

Iskutyynyn tehtävä on kohdistaa järkäleen iskut tasaisesti lyötävään paaluun. Iskutyynyssä on metalliset tukiosat sekä lyöntejä pehmittävät iskusuojat, jotka ovat yleensä

puuta tai muovia. Iskusuojan tehtävä on leikata järkäleen iskusta aiheutuvan jännityksen terävin huippu pois ja täten suojata paalua särkymiseltä. Metallisen osan yläpuolella on järkäleen iskua pehmittävä muovinen tai puinen tukiosa, yläpuu. Tämän alapuolella on paalua ja iskua ohjaava metallinen osa sekä alapuu, joka on tärkeä nimenomaan teräsbetonipaaluja lyötäessä. Alapuu on yleisimmin 100 mm paksu koivuvaneri. Paksuus on viitteellinen sillä lyötäessä puun syyt painuvat kokoon ja iskusuojan paksuus pienenee. Iskusuojan tulee olla ohjeiden mukainen, sillä sen käyttäytymisen perusteella on laadittu loppulyöntiohjeet. (Jääskeläinen, 2009, 61, 81)



KUVA 3. Iskutyynyn osat. (Apevibro)

2.2.3 Muut osat ja varusteet

Paalun pää sovitetaan iskutyynyn sisään siten että isku välittyy paaluun keskeisesti. Tarvittaessa voidaan käyttää sovitinta, jos iskutyynyn ”pesä” on selvästi paalua suurempi.

Jos paalun katkaisutaso on maan- tai vedenpinnan alapuolella, voidaan lyöntilaitteen kehysten ja paalun pään väliin sijoittaa apupaalu. Apupaalun materiaali on terästä ja sen poikkileikkauksen varren kohdalla tulee olla $\frac{1}{4}$ käytettävän teräsbetonipaalun poikkileikkauksesta. (Paalutusohje 2011, 2011, 245)

Paalutettaessa esimerkiksi routaiseen maahan, tai tiiviin pintakerroksen läpi voi olla tarve tehdä paalulle esireikä. Esireikä voidaan tehdä lyömällä, räjäyttämällä tai vesihuuhtelulla. Toimenpiteet tulee valita siten, että ne eivät häiritse aikaisemmin asennettujen paalujen toimintaa, ympäröivän maan stabiiliteettia tai viereisten rakennusten stabiiliteettia. (Paalutusohje 2011, 2011, 180)

2.3 Paalutyypit

Uudessa paalutusohjeessa paalut on jaettu maata syrjäyttäviin ja syrjäyttämättömiin paaluihin. Maata syrjäyttäviin paaluihin kuuluvat lyötävät ja puristettavat paalut. Maata syrjäyttämättömiin paaluihin luetaan kaivinpaalut, porattavat paalut sekä CFA-paalut. (Paalutusohje 2011, 2011, 135)

Maata syrjäyttävät paalut on jaettu niiden materiaalien mukaisesti rakenneteräs, pallograffitirauta, jänneteräs, puu ja betonipaaluihin. Teräsbetonipaalu kuuluu maata syrjäyttäviin esivalmistettuihin betonipaaluihin. (Paalutusohje 2011, 2011, 149-155)

Lyöntipaalutusohje 2005:n paalut on jaoteltu niiden toimintatavan mukaisesti tukipaaluihin, kitkapaaluihin ja koheesiopaaluihin. Uusi paalutusohje tuntee määrittelyn, mutta ei siihen syvenny sen tarkemmin. Vanha jaottelu nousee esille lähinnä paalun geoteknisen kantokyvyn määrittämisessä. Tukipaaluilla tarkoitetaan paaluja, jotka tukeutuvat pohjastaan kallioon tai kovaan maakerrokseen. Kitkapaaluilla taas tarkoitetaan paaluja, jotka tukeutuvat ympäröivään löyhään kitkamaakerrokseen vaippapinnan kitkalla. (Lyöntipaalutusohje 2005, 2006, 25-27)

3 TERÄSBETONIPAALUN RAKENNE

3.1 Paalun rakenne ja varusteet

3.1.1 Yleistä

Paalun rakenne voidaan jakaa kolmeen osaan: paalu, kärki ja jatkos. Paaluosan materiaali määräytyy käytettävän paalutyypin mukaan, esimerkiksi teräsbetonipaalu tai teräspaalu. Kärkiosa määräytyy tavoiteltavan maakerroksen materiaalin mukaan. Jatkososan rakenne ja tyyppi määräytyvät käytettävän paalumateriaalin mukaan: teräspaaluissa voidaan käyttää hitsijatkoksia ja teräsbetonipaaluissa käytetään paaluihin valettuja jäykkä-jatkoksia. (Jääskeläinen, 2009, 56-59)

3.1.2 Betoni

Esivalmistetuilla teräsbetonipaaluilla betonin valmistuksessa sovelletaan standardia SFS-EN 12794 ja sen viitestandardeja. Betonin nimellislajuuden tulee olla vähintään C35/45 (K45). Mikäli käytetään kalliokärkiä, tai asennuksen aikaiset jännitykset ovat muutoin suuria, tulee käyttää betonin nimellislajuutta C40/50 (K50). (Paalutusohje 2011, 2011, 151)

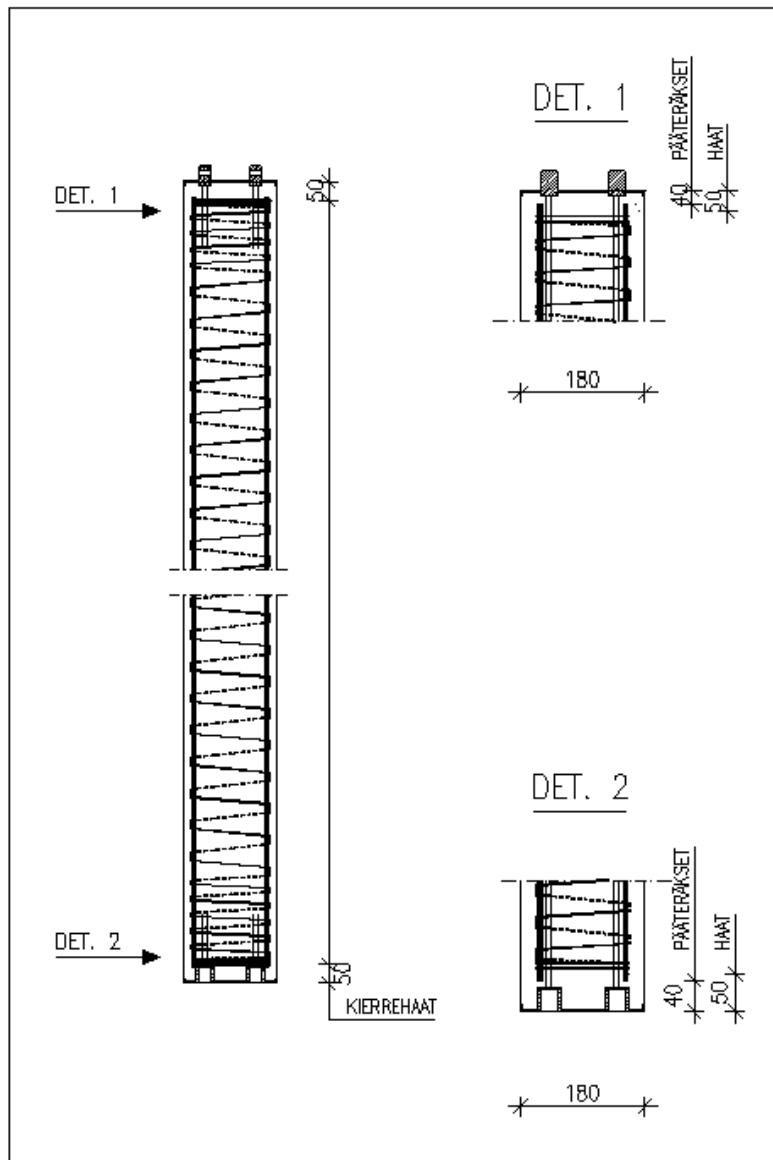
Huomion arvoista on että Lyöntipaalutusohje 2005:n mukaan tulee betonin noudattaa Suomen rakentamismääräyskokoelman osaa B4, betonirakenteet, sekä standardia SFS-EN 206-1. Betonin lujuus tulee olla paalutusluokissa II ja III C35/45 (K45) ja luokassa I tai muiden syiden, kuten suurten jännitysten tai kalliokärkien vuoksi, C45/50 (K50). (Lyöntipaalutusohje 2005, 2006, 29-30)

Molempien ohjeiden mukaan betonin lujuusvaatimus asennushetkellä on nimellislajuusvaatimus. Betonin kelpoisuus osoitetaan puristuslujuuden osalta joko rakenne- tai olosuhdekoekappaleiden avulla.

3.1.3 Betoniteräksset

Paalujen raudoiteteräksiä määrittelee standardi SFS-EN 10080. Muidenkin betoniterästen käyttö on mahdollista, mikäli ne täyttävät standardin SFS-EN-1992-1-1 kohtien 3.2.2 - 3.2.6 ja liitteen C vaatimukset. Paalunraudoitteissa käytetään tyypillisesti standardien SFS-EN-1215(A500W) tai SFS-EN-1216(A700W) mukaisia hitsattavia harjateräksiä. Teräsbetonipaaluissa on tavallisesti 4 pääterästankoa. Lisäksi paaluihin tulee hakateräksiä (Kuva 4). Hakojen tiheys on suurin paalun ylä- ja alapäässä, jonne kohdistuu suurimmat rasitukset asennustilanteessa.

(Paalutusohje 2011, 2011, 153; RT-2011, 2011, 4)



KUVA 4. Lujapienpaalun (180x180 mm) raudituspiirustus. (Lujabetoni)

3.1.4 Kärjet ja jatkokset sekä muut varusteet

Lyötävien paalujen päät suojataan yleensä maa- tai kalliokärjellä, mutta paalun tukeutuessa hienorakeisiin tai kivettömiin, löyhiin karkearakeisiin maakerroksiin voidaan ne suunnitella ilman maakenkää. Maakenkää suositellaan käytettäväksi silloin kun maapohjassa ei ole yli 200 mm:n suuruisia kiviä tai lohkaraita, tai kun paalu ei tukeudu kalliioon. Vastaavasti kun paalua lyödään maahan, jossa on yli 200 mm:n suuruisia lohkaraita, paalu lyödään kalliioon tai vinoon kalliopintaan tulisi käyttää kalliokärkiä (Kuva 5). Kalliokärkien käyttämisestä päättää kohteen vastaava pohjarakennesuunnittelija ja sen valmistus on oltava kolmannen osapuolen valvonnassa. Molemmat kärkivaihtoehdot

valetaan paaluun valmistusvaiheessa. (Jääskeläinen, 2009, 57-58; Paalutusohje 2011, 2011, 161-163)



KUVA 5. TB-paalun kalliokärki. (Emeca)

Kalliokärki mitoitetaan siten, että kärkikappale ja tappi kestävät niihin kohdistuvat puristusrasitukset. Lisäksi sen on kestävä lyönninaikaiset vetorasitukset, niin ettei se pääse irtoamaan paalun päästä. Taivutusrasitukset tulee huomioida silloin kun paalu tukeutuu vinoon kalliopintaan tai se lyödään lohkareisen maakerroksen läpi. Mitoitukseen ei tässä kohtaa ole syytä sen paremmin perehtyä, koska käytännössä paalutoimittaja tilaa osat kolmannelta osapuolelta (Emeca, Leimet) joka vastaa tuotteiden mitoituksesta ja laatuksien täyttymisestä. (Paalutusohje 2011, 2011, 163)

Jos paalun tavoiteltua tukeutumistaso on syvemmillä kuin tehdasvalmisteisen paalun pituus riittää (3-15 m), joudutaan käyttämään paalujatkoksia (Kuva 6). Paalujatkosten tulee pystyä pitämään paalut halutussa linjassa ja paikoillaan asennuksen aikana, sekä kestää riittävällä varmuudella käsittelyn, asentamisen sekä rakentamisen jälkeiset jännitykset. Teräsbetonipaalujen jatkosten tulee olla standardin SFS-EN 12794 mukaisia. Jatkosten ja niiden osien laadusta vastaa aina paalun valmistaja, esimerkiksi osana paalun CE-merkintää. Lyöntipaalun geoteknisen kestävyysarvo rajataan jatkoksen ominaisuuksien perusteella. Jatkoksen lyönninaikainen vetokestävyysarvo riippuu jatkoksen aukeamisen seuraamuksista. Jos jatkos aukeaa, mutta paaluelementit voidaan silti lyödä luotettavasti yhdensuuntaisesti, tulee jatkoksen vetokestävyysarvo olla 15 %

paalun varren nimellisestä puristuskestävyydestä. Jos jatkoksen aukeamisesta saattaa seurata elementtien välinen suunnanmuutos tulee jatkoksen vetokestävyyden olla vähintään 25 % paalun puristuskestävyydestä ja 100 % paalun vetokestävyydestä. (Paalutusohje 2011, 2011, 104, 156-157; RT-2011, 2011, 6)



KUVA 6. Paalujatkos. (Emeca)

Jatkettuja paaluja käytettäessä on jatkos-osa suojattava upotuksen ajaksi käyttäen lyöntilevyä (Kuva 7). Lisäksi paalussa tulee olla nostolenkit kuormauksen, siirtelyn ja pysyvään noston helpottamiseksi.



KUVA 7. Lyöntilevy (Emeca)

3.2 Teräsbetonipaalun mitoitus

3.2.1 Yleistä

Paalun kantavuuden määrää joko rakenteellinen tai geotekninen kantavuus. Näistä pienempi arvo on määrävä. Paalun rakenteellinen kantavuus esitetään keskeisenä puristusjännityksenä. Paaluperustuksen suunnittelu tapahtuu eurokoodien mukaisesti murtorajatilassa. Murtorajatila tarkoittaa pistettä rakenteen kestävyudessa, jonka ylitys aiheuttaa rakenteeseen palautumattomia muodonmuutoksia. Toisinaan se aiheuttaa rakenteen romahtamisen tai sortumisen. Paalun rakenteellisen kestävyuden määrittelyssä tulee huomioida seuraavat rajatilat: rakenteen murtuminen puristuksesta, vedosta, taivutuksesta tai leikkauksesta. Paalun geoteknisen kestävyuden murtorajatila puristusta ja vetoa vastaan määräytyvät maaperäolosuhteiden mukaan. Lisäksi tulee ottaa huomioon kohteesta riippuen seuraavat rajatilat: alueellinen kokonaisvakavuus, paalujen nousu, paalujen poikittaiskuormitus, paalujen nurjahdus, paalujen ja maapohjan yhdistetty murtuminen sekä erilaiset painumat asennetuille paaluille kolmessa suunnassa. (Rantamäki & Tammirinne, 2000, 49; Paalutusohje 2011, 2011, 47)

3.2.2 Rakenteellisen kestävyden määrittäminen

Jotta voidaan osoittaa, että paaluperustus kantaa mitoituskuorman riittävällä varmuudella puristumurtuman suhteen, on seuraavan epäyhtälön toteuduttava:

$$F_{c;d} \leq R_{c;d}, \quad (1)$$

jossa $R_{c;d}$ on Paalun geotekninen puristuskestävyys murtorajatilassa ja $F_{c;d}$ on Paaluun aksiaalisesti kohdistustuvan puristuskuorman mitoitusarvo. (Paalutusohje 2011, 2011, 59)

Paalun tulee myös kestää asennuksen aikaiset puristus- ja vetorasitukset. Asennettaessa puristusjäännityksiä syntyy, kun paalun alapuolella oleva maa on tiivistä, eikä paalu uppoa. Vastaavasti asennusaikaiset vetojäännitykset syntyvät kun alapuolinen maapohja on pehmeää ja paalu uppoaa nopeasti. (Jääskeläinen, 2009, 68)

Jotta voidaan osoittaa, että paaluperustus kantaa riittävällä varmuudella vetomurtuman suhteen, on seuraavan epäyhtälön toteuduttava:

$$F_{t;d} \leq R_{t;d}, \quad (2)$$

jossa $R_{t;d}$ on Paalun vetokestävyuden mitoitusarvo ja $F_{t;d}$ on Paaluun aksiaalisesti kohdistustuvan vetokuorman mitoitusarvo. (Paalutusohje 2011, 2011, 79)

Paalun kärkeen välittyvä puristusjäännitys määrää paalun geoteknisen kestävyuden ominaisarvon maksimin (Taulukko 1.). Paalun valmistaja nimeää paalun geoteknisen kestävyuden, sekä takaa sille tietyn lyönninkestävyyden ($F_{c;lyönti}$ ja $F_{c;lyönti}$) ja ilmoittaa ylimmän paalutustyöluokan, jossa paalua voidaan käyttää. Valmistajan tai maahan-tuojan määrittämän geoteknisen kestävyuden ominaisarvo, $R_{k;geo}$, voi olla pienempi kuin geoteknisen kestävyuden maksimi, $R_{k;geo;max}$. (Paalutusohje 2011, 2011, 101-102)

TAULUKKO 1. Geoteknisen kestävyuden yläraja ja suurin lyönnin aiheuttama puristus ja vetorasitus teräsbetonipaalulla.

Suurin sallittu puristus-lyöntivoima asennettaessa, $F_{c;lyönti}$ (PTL1-3)	Suurin kestävyuden ominaisarvo, $R_{k;geo;max}$	Suurin sallittu vetorasitus asennettaessa (jatkamaton paalu), $F_{t;lyönti}$ (PTL1-3)
$\leq 0,8 \times f_{ck} \times A_c$	PTL3: $R_{k;geo;max} \leq F_{c;lyönti}$ PTL2: $R_{k;geo;max} \leq 0,8 \times F_{c;lyönti}$ PTL1: $R_{k;geo;max} \leq 0,6 \times F_{c;lyönti}$	$\leq 0,9 \times f_{yk} \times A_s$

f_{ck} = Betonin nimellislujuus

A_c = Betonin pinta-ala paalussa

f_{yk} = Teräksen nimellislujuus

A_s = Teräksen pinta-ala paalussa

Paalun kestävyuden ominaisarvosta saadaan johdettua paalun kestävyuden mitoitusarvo seuraavasti:

$$R_{c;d} = R_{c;k} / \gamma_t, \quad (3)$$

jossa γ_t on kestävyuden osavarmuusluku puristukselle. Teräsbetoni-paalulle arvo on 1,20. (Paalutusohje 2011, 2011, 63)

Vastaava mitoitus pätee paalun vetorasitukselle, vain symbolit ja kaavat ovat hieman erilaisia:

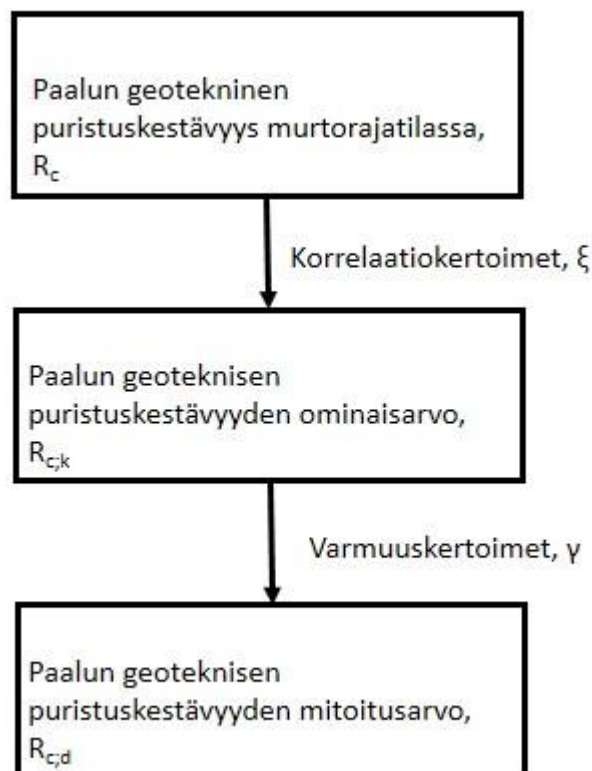
$$R_{t;d} = R_{t;k} / \gamma_{s;t}, \quad (4)$$

jossa $\gamma_{s;t}$ on kestävyuden osavarmuusluku vetojännitykselle. Teräsbetoni-paalulle arvo on 1,35 lyhytaikaisessa kuormituksessa ja 1,50 pitkäaikaisessa kuormituksessa. (Paalutusohje 2011, 2011, 82)

Paalun käyttötilan kestävyyttä määritettäessä tulee myös huomioida paalun nurjahdusriski sekä mahdollinen alkukäyryys. Nurjahdusriski tulee huomioida kun paalut ovat osittain tai kokonaan ilmassa, vedessä tai maakerroksessa jonka suljettu leikkauslujuus on pienempi kuin 20 kN/m². (Paalutusohje 2011, 2011, 103, 106)

3.2.3 Paalun geoteknisen kestävyuden määrittäminen yleisesti

Paalun geoteknisen kestävyuden määrittäminen tapahtuu korrelaatiokertoimien ja varmuuskertoimien avulla (Kuva 8.). Mitoitus aloitetaan määrittämällä paalun geotekninen puristuskestävyys murtorajatilassa jollakin alempana esitytetyistä tavoista. Geoteknistä murtokestävyydestä saadaan paalun puristuskestävyyden ominaisarvo korrelaatiokertoimien avulla. Korrelaatiokertoimien tarkoitus on saada mittaukset ja tutkimukset vastaamaan mahdollisimman hyvin alueella yleisesti vallitsevaa tilaa. Korrelaatiokertoimet määräytyvät testattujen paalujen lukumääränä tai suhteena kaikkiin kohteessa sijaitseviin vastaavanlaisiin paaluihin, vastaavissa olosuhteissa. Korrelaatiokertoimet ovat sitä pienempiä, mitä enemmän koeistettuja paaluja kohteessa on. Korrelaatiokertoimet vaihtelevat hieman riippuen käytetystä mitoitusavasta. Paalun geoteknisen puristuskestävyyden ominaisarvosta saadaan lopulta johdettua paalun mitoituskestävyys varmuuskertoimien avulla. (Paalutusohje 2011, 2011, 57-61)



KUVA8. Paalun geoteknisen mitoituksen kulku (Henri Unkila)

3.2.4 Paalun geoteknisen kestävyiden määrittäminen staattisen koekuormituksen avulla

Paalun geoteknisen puristuskestävyyttä määritettäessä staattisen koekuormituksen avulla asennetaan koepaalut, jotka asennetaan samalla tavalla kuin tulevat perustuspaalut ja samaan maakerrokseen asti. Laskentamenetelmä on hyvin pitkälti samankaltainen kuin dynaamisen koekuormituksen avulla tehtävässä geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvon määrittelyssä. (Paalutusohje 2011, 2011, 61-63)

3.2.5 Paalun geoteknisen kestävyiden määrittäminen pohjatutkimustulosten avulla

Pohjatutkimusten avulla määriteltävä paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo voidaan laskea kahdella eri menetelmällä. Molemmissa menetelmissä käytetään kohteen maaperätutkimusten tuloksista määriteltävillä vaippakitkan ja kärkikestävyiden arvoilla. Molemmat arvot määritellään maaperän kitkakulmaa avuksi käyttäen. Menetelmän käyttö soveltuu lähinnä kitkapaaluille, mutta ei niinkään tukipaaluille. (Paalutusohje 2011, 2011, 63-68)

3.2.6 Paalun geoteknisen kestävyiden määrittäminen paalutuskäävojen avulla

Paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvoa määritettäessä paalutuskäävojen avulla tulee maakerrosrajojen oltava hyvin selvillä sekä paalujen tunkeutumistaso tiedossa kohtuullisella tasolla. Paalutuskäävoja käytettäessä yksittäisten perustuspaalujen geoteknisen kestävyiden mitoitusarvon määrittämiseen tulee käävojen paikkansa pitävyys perustua aikaisempiin dynaamisella koekuormituksella osoitettuihin hyväksytyihin tuloksiin vastaavanlaisessa kohteessa. Paalutusohje 2011 esittelemän paalutuskäävojen käyttöön tarvitaan tiedot järkäletyypistä, järkäleen liikkuvan osan painosta, iskutyynystä, maaperästä, järkäleen pudotuskorkeudesta, paalun painumasta sekä paalun joustosta.

Järkäleen tiedot saadaan helppoiten käyttämällä paalukoneessa energianmittauslaitteistoa. Jouston määrittäminen tapahtuu helppoiten mittaamalla. (Paalutusohje 2011, 2011, 76-77)

3.2.7 Paalun geoteknisen kestävyuden määrittäminen PDA-mittauksen avulla

Paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitussarvo voidaan todentaa iskuaaltoteoriaa hyödyntävällä PDA-mittauksella (Pile Driving Analysis), eli dynaamisella koekuormituksella. Paalun yläpäähän kytketään anturit, jotka ovat kytköksissä mittaussyksikköön. Paalua lyöessä saadaan paalun yläpäässä vaikuttava voima ja partikkelinopeus mitattua. PDA-mittauksesta saadaan laskettua paalun alapäässä vaikuttava murtovoima ja lisäksi paalun mahdollinen rikkoutuneisuus. (Jääskeläinen, 2009, 69)

Paalun geoteknistä puristuskestävyyttä PDA-analyysin avulla arvioitaessa saadaan puristuksen ominaisarvo, $R_{c;k}$, laskettua seuraavasta kaavasta:

$$R_{c;k} = \text{Min}\{((R_{c;m})_{\text{mean}}/\xi_5); ((R_{c;m})_{\text{min}}/\xi_6)\}, \quad (5)$$

jossa $(R_{c;m})_{\text{mean}}$ on dynaamisen koekuormituksen tulosten keskiarvo, $(R_{c;m})_{\text{min}}$ on Dynaamisen koekuormituksen minimitulokset paalun murtokestävydestä. ξ_5 ja ξ_6 ovat korrelaatiokertoimia (Taulukko 2.).

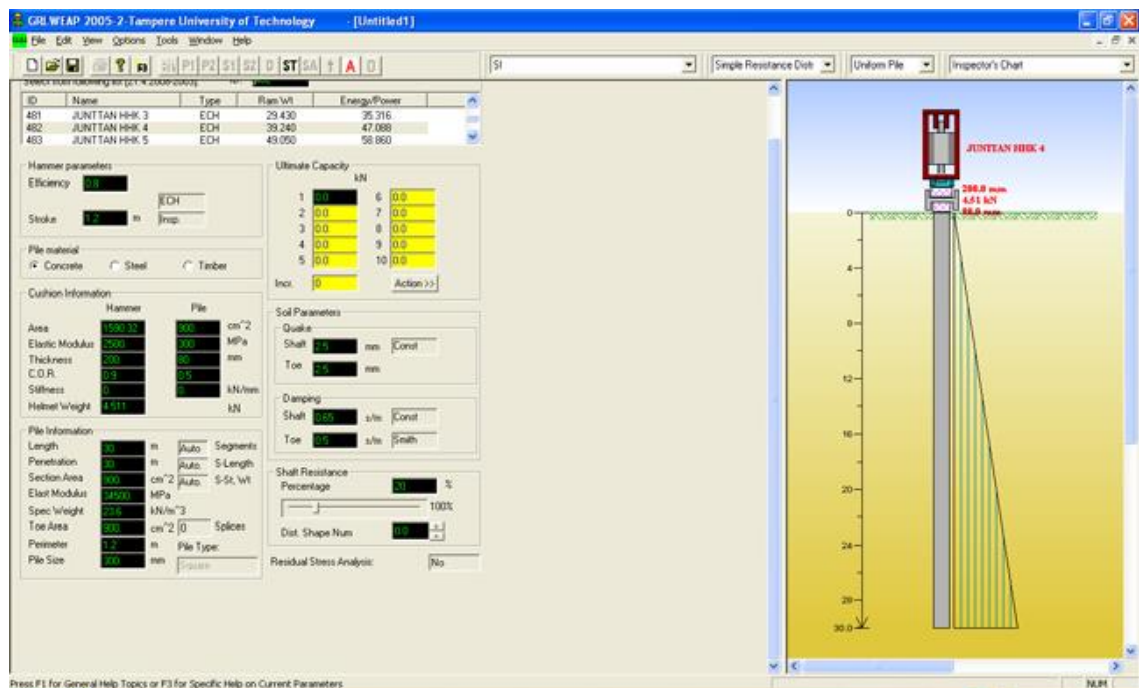
TAULUKKO 2. Korrelaatiokertoimet ξ ominaisarvojen johtamiseksi dynaamisen koekuormituksen otannan perusteella (n on koekuormitettujen paalujen lukumäärä)

n	2-4 tai 1-4%	5-9 tai 5-39 %	10-14 tai 40-64 %	15-19 tai 65-89 %	≥ 20 tai 90-100 %
ξ_5	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
ξ_6	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25

Käytettäessä signaalinsovitusluvut voidaan kertoa 0,9. Jos koalueen paalupituudet vaihtelevat suuresti, tulee luvut kertoa 1,05. (Paalutusohje 2011, 2011, 73-75)

3.2.8 Paalun geoteknisen kestävyuden määrittäminen iskuaaltoanalyysin avulla

Paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo voidaan varmistaa myös iskuaaltoanalyysillä (Kuva 9). Iskuaaltoanalyysissä simuloidaan paalujärkäleeseen, iskutyynyn, paalun ja maapohjan vuorovaikutusta. Käytettäessä tukipaaluja voidaan simuloinnin avulla määrittää lyönnin aikaiset rasitukset sekä loppulyöntiehdot. Paalun geoteknisen kestävyuden mitoitusarvon määrittäminen tapahtuu samalla tavoin kuin kohdassa 3.2.6, mutta taulukon 3. korrelaatiokerroimet kerrotaan 1,05. (Paalutusohje 2011, 2011, 78)



KUVA 9. Lyöntipaalutuksen simulointi GRLWEAP-ohjelmistolla. (Riihimäki)

Iskuaaltoanalyysin käytössä teräsbetonipaalu mallinnetaan kimmomoduulin, tilavuuspainon ja paalun pituuden sekä poikkileikkausmittojen avulla. Teräsbetonipaalun kimmomoduuli E määritetään betonin puristuslujuuden, f_{cm} , avulla. Standardin SFS-EN 1992-1-1 mukaisesti betonin lieriölujuuden keskiarvo on $f_{cm} = f_{ck} + 8$ MPa, f_{ck} on käytettävän betonin puristuslujuus. Tiheytenä mallinnuksessa käytetään arvoa $\rho = 2500$ kg/m³ (Paalutusohje 2011, 2011, 78, 121)

$$E = 23000 * (f_{cm}/10)^{0,3} \quad (6)$$

Lyöntilaitteen, eli järkäleen mallinnus voidaan tehdä syöttämällä ohjelmaan järkäleen osien dimensiot, massat ja nopeudet, mutta käytännössä ohjelmistot sisältävät valmiit

järkälekirjastot. Esimerkiksi PDI:n GRLWEAP ohjelmistossa on valittavissa noin 800 erilaista lyöntilaitetta, mukaan luettuna kaikki Junttan Oy:n valmistamat laitteet, joita esimerkiksi Skanska Infra käyttää. (Paalutusohje 2011, 2011, 122;Uusi paalutusohje 2011, 2011, 6-7)

Iskusuoja mallinnetaan sen dimensioiden, iskusuojan materiaalin kimmomoduulin sekä sysäyskerroimen C.o.R. avulla. Paalutusohje 2011 antaa suosituksen käyttää C.o.R. arvoa 0,8. Iskutyynyn mallinnukseen tarvitaan iskutyynyn massa ja dimensiot, joustososan kimmomoduuli, sekä sysäyskerroin C.o.R. Iskusuojaa mallinnettaessa tulee huomioida että puusta valmistettu iskusuoja on aluksi pehmeä, mutta käytettäessä suoja kovettuu huomattavasti (Taulukko 3.). (Paalutusohje 2011, 2011, 122-123;Uusi paalutusohje 2011, 2011, 7-9)

TAULUKKO 3. Iskusuojan E-moduuli ja paksuus käytön myötä.

Iskusuojan käyttöikä	E-moduuli [MPa]	Paksuus [mm]
Uusi suoja	180	100
Lyöty suoja	500	70
Lähes loppuun kulunut tyyny	1200	50

Maamallin luominen WEAP-ohjelmistoon voidaan tehdä yleisellä tasolla arvioiden kuinka paljon paalu ottaa kuormia kärjellä tai vaipalla prosentuaalisesti. Maamalli voidaan luoda myös pohjatutkimustuloksista. Tällöin voidaan käyttää esimerkiksi heijari-, paino- tai puristinkairaustuloksia muutettuna kärki ja vaippavastukseksi (Taulukko 4.). Lisäksi kussakin maakerroksessa tulee huomioida paalun kärjen alapuolisen ja paalun vaippaa ympäröivän maan kimmainen kokoonpuristuminen ennen murtumista, eli ns. quake, sekä Smith-vaimennuskerroin paalun kärjen ja vaipan osalta. (Paalutusohje 2011, 2011, 66-67, 123-125; Tarkkio, 2012)

TAULUKKO 4. Heijarikairaus tulokset kärki- ja vaippakestävyutenä. (Paalutusohje 2011, 2011, 70)

Heijarikairaus, [L/0,2]	Kärkikestävyys, [MPa]	Vaippakestävyys, [kPA]
alle 5	alle 1,0	alle 15
5-10	1,0-2,0	15-30
10-15	2,0-3,0	30-45
15-20	3,0-4,0	45-60
20-40	4,0-8,0	60-90

4 PAALUTUSOHJE 2011 MUKAINEN PAALUTUSTYÖ JA KOHDEKOH- TAINEN PAALUTUSTYÖ

4.1 Yleistä

Yksi suurimmista paalutusohje 2011 muutoksista on paalutustyöluokkien muuttuminen. Paalutusluokka tai vastaavasti geotekninen luokka, paalutusohje 2011 mukaan, määrittää kohteen pohjarakennesuunnittelijalta vaaditun pätevyyden, pohjatutkimuksen tarkkuuden, paalutustyönjohtajan pätevyyden, vaaditun paalutuskaluston, suurimmat sallitut jännitykset sekä vaadittavat laadunvarmistustoimenpiteet. (Jääskeläinen, 2009, 54-56)

4.2 Geotekninen luokka

4.2.1 Yleistä

Lyöntipaalutusohjeen 2005 paalutusluokat on jaettu I-III roomalaisin numeroin. Vanhassa ohjeessa paalutusluokka I on vaativin ja III kevyin. (Lyöntipaalutusohje 2005, 2006, 43-44)

Paalutusohje 2011 mallissa paalutustyöluokka määräytyy geoteknisen luokan ja seuraamusluokan perusteella. Geotekniset luokat on jaettu 1-3 siten, että 1 on kevyin ja 3 vaativin luokitus. Kulloinkin käytettävän geoteknisen luokan määrittää vastaava pohjarakennesuunnittelija

4.2.2 Geotekninen luokka 1 (GL1)

Geotekninen luokka 1 on kyseessä silloin kun:

- rakenteen perustusvaatimusten täyttäminen voidaan varmistaa kokemuksen ja kvalitatiivisten geoteknisten tutkimusten avulla.
- rakenteesta ei aiheudu merkittävää riskiä.

Geoteknisen luokan 1 valinta edellyttää että riski kokonaisvakavuuden tai maapohjan liikkeiden suhteen on merkityksettömiä. Lisäksi kaivu ei saa ulottua vedenpinnan alapuolelle, tai ulottuessaan on hyvin yksinkertainen toteuttaa. Käytännössä se tarkoittaa sitä että pohjatutkimukseksi riittää asiantuntijan suorittama maastokatselmus ja että pohjamateriaalia on kallio, moreeni tai karkearakeinen sora. Geotekninen luokka 1 ei yleensä vaadi paaluttamista. (Paalutusohje 2011, 2011, 28, 36)

4.2.3 Geotekninen luokka 2 (GL2)

Geotekninen luokka 2 on kyseessä silloin kun:

- kohteessa vaaditaan kvantitatiivisia geoteknisiä lähtötietoja ja analyysyjä, jotta voidaan varmistua suunnittelun perusvaatimusten täyttymisestä.
- rakenteeseen ei liity tavanomaisesta poikkeavia riskejä tai epätavallisia tai erikoisen vaikeita pohja- tai kuormitusolosuhteita.

Geotekninen luokka 2 edellyttää laajoja ja yksityiskohtaisia tutkimuksia, jotta pohjarakennesuunnittelu ja pohjarakentaminen voidaan toteuttaa luotettavasti ja turvallisesti. Tutkimukset on suoritettava niin laajasti että niillä voidaan kattaa koko paalutettava alue tasossa, sekä määrittää kaikki maapohjan rakenteeseen, paalutuksen ja geotekniseen kestävyysvaikutteet kerrostumat. Käytännössä tämä tarkoittaa vähintään kahta eri kairausmenetelmää, maan kokoonpuristuvuusominaisuuksien määrittämistä sekä pohjaveden korkeuden ja virtaussuunnan määrittämistä. (Paalutusohje 2011, 2011, 28, 30)

Tyypillinen GL2-luokan rakenne on paalujen varaan perustettu rakennus, jossa on pysyvään asumiseen tai työskentelyyn tarkoitettuja tiloja. (Paalutusohje 2011, 2011, 28)

4.2.4 Geotekninen luokka 3 (GL3)

Geotekninen luokka 3 tulee kyseeseen kun:

- rakenne on erittäin suuri tai muuten epätavallinen.
- rakenteeseen liittyy normaalista poikkeavia riskejä tai siihen liittyy epätavallisen tai poikkeuksellisen vaikeita pohja- tai kuormitusolosuhteita.
- rakenne sijaitsee alueella, missä todennäköisesti riittämätön vakavuus tai jatkuva maapohjan liikkuminen edellyttävät erillisiä tutkimuksia tai erityistoimenpiteitä.

Geoteknisessä luokassa 3 noudatetaan vähintään GL2 asetettuja pohjatutkimusvaatimuksia. Tutkimuspiste on sijoitettava jokaisen perustuksen kohdalle sekä suurten perustusten paaluanturoiden jokaiselle nurkalle. Jos alueella sijaitseva pohjavesi on paineellista, on sen painetaso määritettävä. Lisäksi maalajit ja niiden kerrosrajat määritellään ottamalla riittävä määrä maanäytteitä. (Paalutusohje 2011, 2011, 28, 30)

Geotekniseen luokkaan 3 voidaan lukea kuuluvaksi kaikki luokan GL2 haastavammat kohteet. Luokan GL3 kohde voi sijaita esimerkiksi eloperäisen maan alueella tai paalutus voi tapahtua vesialueella. (Paalutusohje 2011, 2011, 28)

4.3 Paalutustyöluokka

Paalun rakenne, asennusohjeet ja paalutus työnsuorittajaa kohtaan asetetut vaatimukset määräytyvät paalutustyöluokan mukaan. Paalutustyöluokka huomioi tavanomaiset kuormitus- ja rasiustilat. Paalutustyöluokat jaetaan 1-3, siten että PTL3 on vaativin luokka ja PTL1 vastaavasti heikoin. Esivalmistettujen paalujen ja paaluvarusteiden valmistajat osoittavat paalun rakenteen täyttävän käytetyn paalutustyöluokan vaatimukset. Käytettävä paalutustyöluokka määräytyy kohteen geoteknisen luokan ja seuraamusluokan perusteella (Taulukko 5.). (Paalutusohje 2011, 2011, 99-100)

TAULUKKO 5. Paalutustyöluokat geoteknisen luokan ja kohteen seuraamusluokan mukaan. (Paalutusohje 2011, 2011, 100)

Geotekninen luokka	Seuraamusluokka		
	CC1	CC2	CC3
GL1	PTL1..(PTL3)	PTL2..(PTL3)	PTL2..(PTL3)
GL2	PTL1..(PTL3)	PTL2..(PTL3)	PTL3..(PTL3)
GL3	PTL2..(PTL3)	PTL2..(PTL3)	PTL3

Seuraamusluokalla tarkoitetaan rakenteen sortumisesta aiheutuvien tuhojen määrää. Seuraamusluokka CC1 ei rakenteen sortumisesta aiheudu ihmishenkien menetyksiä, toisin sanoen luokka käsittää rakennukset, joissa ei asu tai työskentele päivittäin ihmisiä. Luokassa CC2 on tuhojen määrä keskinkertainen. Tämä tarkoittaa käytännössä siis asuin- tai toimistorakennusta, jonka kerrosluku on alle 20. Pahin seuraamusluokka CC3

käsittää suuret aineelliset vahingot ja ihmishenkien menetykset. Tällä tarkoitetaan käytännössä siis yli 20 kerroksista rakennusta. (SFS-EN 1990, 2007, 6-7)

4.4 Paalutustyön työvaiheet

Ennen paalutustyön aloittamista on paalutusurakoitsijan laadittava paalutuksen toteutus-suunnitelma. Toteutussuunnitelman tulee olla kirjallinen aina. Suunnitelmassa esitetään paalutustyöluokan edellyttämät työtavat ja koneet, joilla on mahdollista saavuttaa pohjarakennesuunnitelmissa esitetyt vaatimukset, siinä pitää myös huomioida toteutushetkellä vallitsevat olosuhteet. Paalutustyöluokassa 2 ja 3 tulee urakoitsijan liittää toteutussuunnitelmaansa myös kirjallinen laatusuunnitelma. (Paalutusohje 2011, 2011, 191)

Paalutustyö alkaa kun paalutuskalusto sekä paalut on toimitettu työmaalle, tarkastettu ja varastoitu toteutussuunnitelman mukaisesti. Tämän jälkeen mittamies merkkää paalujen sijainnit maastoon. Toteutussuunnitelmassa ilmoitetaan paikalleen mittauksen tarkkuus sekä käytettävät kiintopisteet ja koordinaattijärjestelmät. Seuraava työvaihe on paalutuksen aloitus ennalta suunnitellussa asennusjärjestyksessä. Asennusjärjestys tulee olla tarkkaan mietitty, jotta kone pystyy liikkumaan ja asentamaan kaikki paalut kerralla. Yhden paalun asentamisen työvaiheisiin kuuluu paalukoneen asemointi, paalun pystyyn nosto, paalun kärjen asemointi merkattuun kohteen ja paalun lyöminen. (Paalutusohje 2011, 2011, 191; Jääskeläinen, 2009, 83)

Paalun maahan lyömisen aikana on tärkeää tarkkailla järkäleen pudotuskorkeutta, paalun painumaa sekä lyönnin epäkeskisyyttä. Paalun toimittaja ilmoittaa rakenteellisen kestävyuden kannalta sopivat pudotuskorkeudet. Upotuslyöntien aikana sopiva pudotuskorkeus on välillä 0,1 m – 0,2 m, riippuen lyötävästä paalusta, paalutettavasta maaperästä sekä iskutyynyn kunnosta. Pudotuskorkeutta tulisi säädellä niin että paalun painuma on asennuksen aikana rajoissa 100 mm – 150 mm. Lyöntien epäkeskisyydestä seuraavat reunajännitykset eivät saa ylittää keskimääräistä lyöntijännitystä PTL3:ssa 15 %, PTL2:ssa 25 % ja PTL3:ssa 35 % enempää. (Paalutusohje 2011, 2011, 102, 204; RT-2011, 2011, 16)

Kun paalu alkaa lähestyä määriteltyä tavoitetasoa ja paalun painuma pienenee, alkavat paalu ja lisäksi myös järkäle yleensä pomppia. Tällöin iskunpituus säädetään määriteltyjen loppulyöntiohjeiden mukaiseksi. Paalun valmistaja antaa vaadittavat loppulyönti-

korkeudet, järkäletyypistä riippuen. Loppulyönnit lyödään kymmenen lyönnin sarjoina. Loppulyöntisarjojen lukumäärä määritellään kohdekohtaisesti olosuhteiden mukaan. Jos paalun painuminen pienenee hitaasti, lyödään useampi sarja ja vastaavasti painuman pienentyessä nopeasti, lyödään sarjoja vähemmän. Jos paalun painuma kymmenen lyönnin sarjalla alittaa 10 mm, on lyöminen lopetettava paalun rikkoutumisriskin vuoksi. Jos paalu on tässä vaiheessa lähellä vaadittua tasoa, eikä mikään muu erityiseseikka vaadi upotuksen jatkamista, voidaan paalun todeta olevan paikallaan. Vaativimmissa kohteissa ja etenkin PTL:ssa 3 vastaava pohjarakennesuunnittelija hyväksyy, tai määrittää itse vaaditut loppulyöntiohjeet. (Paalutusohje 2011, 2011, 204-205;RT-2011, 2011, 17)

4.5 Paalutustyönjohtaja ja muu työmaahenkilöstö

Paalutustyötä johtaa tehtävään nimetty vastuullinen paalutustyönjohtaja, jolla on yleensä useamman vuoden kokemus sekä riittävät teoreettiset tiedot ts. teknillisessä tai ammattikorkeakoulussa suoritettu rakennusalan tutkinto. Lisäksi paalutustyöluokassa 3 on paalutustyönjohtajan oltava yksityiskohtaisesti perehtynyt käytettävään työmenetelmään. Paalutustyönjohtaja laatii toteutus- ja laatusuunnitelmat, sekä ylläpitää paalutuspöytäkirjaa. Paalutustyönjohtajan tulee lisäksi huomioida mm. seuraavat asiat: henkilöstö on pätevää ja koneet soveltuvat työn suorittamiseen, materiaalit ovat suunnitelmien mukaisia, paalut asennetaan suunnitelluille paikoille suunniteltuun kaltevuuteen, asennettaessa käytetty lyöntienergia on oikea, jatkokset kiristyvät asianmukaisesti, loppulyönnit ja niiden todentaminen tehdään asianmukaisesti sekä poikkeavista olosuhteista raportointi tilaajalle sekä valvojalle viivyttämättä. (Paalutusohje 2011, 2011, 193, 234-235)

Uutena asiana esitetään vaatimuksia myös paalutuskoneen käyttäjälle. Paalutuskoneen käyttäjän tulee olla ammatillisesti pätevä tai riittävän kokenut ja perehtynyt käytettävään paalutuskoneeseen ja työmenetelmään siten, että työ voidaan suorittaa turvallisesti ja työ- ja laatusuunnitelmien mukaisesti. Paalutuskoneen kuljettajan on tunnettava paalutusprosessi:

- paalutuksen syy rakennuskohteessa
- perusteet valitun paalutustyömenetelmän käytöstä

- koneen kuljettajan on oltava tietoinen työnsä laadun vaikutuksista seuraaviin työvaiheisiin ja lopputuotteeseen

Paalutustyöluokassa 3 on koneen kuljettajan osoitettava pätevyytensä näyttökokeella tai koulutuksesta saadulla todistuksella. Lisäksi työkokemusta tulee olla vähintään 5 vuotta. Paalutustyöluokassa 2 koneen kuljettajan pätevyys osoitetaan kuten PTL 3 tai vastaavan paalutustyönjohtajan pätevyyden omaavan henkilön antamalla todistuksella. Lisäksi työkokemusta tulee olla vähintään 1 vuosi. Paalutustyöluokassa 1 tulee koneen käyttäjän tuntea riittävät perusteet koneesta ja sen käytöstä sekä työmenetelmästä. PTL:ssa 1 ei vaadita erillisiä todistuksia. (Paalutusohje 2011, 2011, 193)

4.6 Paalutustyön dokumentointi ja laadunvarmistus PO-2011 mukaan

4.6.1 Yleistä

Paalujen saapuessa työmaalle tarkistetaan paalujen kunto silmämääräisesti. Jos halkeamia, käyristymiä tai vinoutumia havaitaan, suoritetaan tarkempia mittauksia. Mikäli paaluissa havaitaan seuraavia vikoja, tulee paalut hylätä tai korjata juotoslaastilla ennen asennusta.

- Paalussa on poikittainen halkeama, joka on yli puolet paalun poikkileikkaus piii-rissä ja jonka leveys suurimmasta kohdasta on yli 0,2 mm (TB 300 x 300: 600 mm).
- Paalussa on pituussuuntainen halkeama, joka on yli 200 mm pitkä ja jonka leveys suurimmasta kohdasta on yli 0,2 mm.
- Paalussa on halkeama, joka on lyhempi kuin edellä mainitut, mutta jonka leveys suurimmasta kohdasta on yli 0,5 mm.

Mikäli paalu on lohjennut niin että sen teräkset paljastuvat, tulee se hylätä välittömästi. Työmaan valvoja merkitsee hylätyt paalut sovitulla tavalla ja ne tulee poistaa työmaalta. (Paalutusohje 2011, 2011, 234)

Paalutustyön laadunvarmistus hoidetaan siten, että työn lopputulos ja sen kelpoisuus voidaan luotettavasti todeta vertaamalla suorituspöytäkirjoja ja raportteja suunnitelmasiikirjoihin. Esivalmistettuja teräsbetonipaaluja asennettaessa tulee tilaajalle toimittaa ennen työn aloitusta toteutus- ja laatusuunnitelma. Paalutustyön valmistuttua toimitte-

taan paalun valmistajalta saadut materiaalitodistukset, suorituksen ajalta tehdyt työmaapäiväkirjat, paalutuspöytäkirja, paalutuksen toteumapiirustus, suoritettujen koekuormitusten ja kokeiden tulokset, käyttöturvallisuustiedotteet rakennuksen käyttöiän aikaisia muutostöitä varten sekä mahdolliset ympäristön tarkkailumittaukset esim. tärinämittareiden tarkastuspöytäkirjat työn tilaajalle. (Paalutusohje 2011, 233-237)

4.6.2 Paalutuspöytäkirja

Laadunvarmistustyön rungon muodostaa paalutuspöytäkirja. Paalutuspöytäkirja tehdään paalukohtaisesti. Paalutusohje 2011 esittelemä malli on jaettu kahteen osaan: yleinen osa ja paalutustyötavasta riippuva osa. Yleinen osa on sama paalutyypistä ja paalutusmenetelmästä riippumatta.

Suoritettaessa lyöntipaalutusta, yleisen osan tulisi sisältää ainakin seuraava tiedot:

- Paalutustyömaan nimi ja sijainti
- Urakan tunnustiedot, esim. sisäinen numerointi
- Rakenne
- Paalutusurakoitsija
- Työmaan vertailutaso, korkeusasema
- Työskentelytaso, korkeusasema
- Pohjaveden taso
- Paalutyypin sekä muut paalun tiedot
- Paalun kärkityyppi
- Paalutusmenetelmä
- Paalutuskaluston tiedot
- Tarvittaessa paalun valmistajan tiedot

Pöytäkirjan toisessa, paalukohtaisessa, osassa tulisi lyöntipaalutustyötä suoritettaessa esittää seuraavat tiedot:

- Paalun numero
- Paalun nimellimitat
- Paaluelementin pituus

- Asentamis- ja jälkilyöntipäivä ja kellonaika, mahdolliset keskeytykset asentamisessa
- Paalun kärjen taso, maanpinnasta mitattuna
- Paalun kärjen taso, z- korkeusasema
- Paalun yläosan taso asennuksen jälkeen
- Paalun katkaisutaso
- Järkäleen tiedot: tyyppi, paino, pudotus sekä kunto
- Käytettyjen jousto-osien ja iskusuojien tiedot
- Loppulyöntien painumat
- Betonin koostumus sekä lujuusluokka

(Paalutusohje 2011, 2011, 248-251)

4.6.3 Paalutustyön toteutumapiirustus

Paalutustyön toteutumapiirustuksen laadinta on rakennuttajan vastuulla. Rakennuttaja voi sisällyttää sen joko urakoitsijan tai suunnittelijan urakkaan. Piirustus laaditaan paalutuskartalle. Tarvittaessa piirustusta voidaan täydentää taulukoin tai maaperäleikkauksin. Toteutumapiirustuksesta tulisi selvittää seuraavat tiedot:

- Paalujen tunnuksot, numero
- Paalun yläpään ja kärjen korkeusasema sekä toteutunut paalupituus
- Paalujen toteutunut sijainti x,y-koordinaatistossa
 - Sijainti- ja kaltevuustoleransseissa pysyneet paalut esitetään paalukartalle niiden suunnitelluilla paikoilla, niiden sijaintia tai kaltevuutta ei tällöin tarvitse toteutumapiirustuksessa esittää
 - Toleranssit ylittäneet paalut esitetään toteutuneessa sijainnissa ja kaltevuudessa
- Maan sisään jätetyt vaurioituneet paalut, jotka eivät toimi rakenteessa
- Korvaavat ja lisäpaalut tunnuksineen
- Anturoihin ja laattoihin tehdyt levennykset ja sidontapalkit

(Paalutusohje 2011, 2011, 252)

4.7 Ympäristön huomioiminen

4.7.1 Yleistä

Paalutustyön yhteydessä on huomioitava paalutuksen vaikutukset kohteessa mahdollisesti oleviin rakenteisiin ja paaluihin. Lisäksi tulee huomioida paalutuksen vaikutukset maan siirtymiselle, häiriintymiselle, tiivistymiselle tai löyhtymiselle sekä huokosvedenpaineen nousuun. Lyöntipaalutus aiheuttaa aina myös jonkin verran tärinää sekä melua. (Paalutusohje 2011, 2011, 183-189)

4.7.2 Muutokset maapohjassa ja huokosvedenpaineen nousu

Teräsbetonipaalu syrjäyttää hienorakeisissa maakerroksissa aina oman tilavuutensa verran maata. Karkearakeisissa maissa syrjäytymistä tapahtuu tiiviissä ja keskittiiviissä maassa. Jos paalutuksen aiheuttamat maan siirtymät oletetaan haitallisiksi, niitä seurataan työn aikana ja ryhdytään toimenpiteisiin mahdollisten havaintojen ilmettyä. Siirtymiä tapahtuu yleensä vaakasuuntaan paalutettaessa luiskien ja jo paalutettujen alueiden läheisyydessä. Pystysuuntaisia siirtymiä esiintyy yleensä savimailla, mutta ne pyritään ottamaan huomioon jo suunnittelussa. Maan siirtymiä voidaan pienentää kaivamalla paalun kohdalta maata pois etukäteen. (Paalutusohje 2011, 2011, 183-184)

Maan häiriintyminen ja huokosvedenpaineen nousu ovat tyypillisiä hienorakeisissa ja eloperäisissä maalajeissa, joissa pohjavesi on ylempänä kuin paalujen tunkeutumistaso. Maan häiriintyminen ja huokosvedenpaineen nousu heikentävät maan lujuutta, mistä voi seurata vaurioita lähirakenteisiin. Huokosvedenpaineen nousua voidaan olettaa aiheutuvan 3-6 kertaa paalun läpimitan etäisyydellä paalusta ja sen voidaan olettaa alentuvan nolnaan tasaisesti etäisyydellä 40 kertaa paalun sivumitta. Tarvittaessa huokosvedenpainetta seurataan mittauksilla työaikana ja tehdään ennakkokokeita, esimerkiksi koepaalutusta. Työaikana on myös syytä tehdä samanaikaisesti siirtymämittauksia. Huokosvedenpaineen nousun ja maan häiriintymisen riskiä voidaan pienentää käyttämällä pienempää paaluprofiilia, poistamalla savea paalun tieltä (esim. augerkairaus), varustamalla paalu pystysalaojalla tai suunnittelemalla paalutustyö siten että ensin asennetaan osa paaluista ja huokosvedenpaineen laskettua loput paalut. Paineellisen pohja-

veden alueella vaarana on pysyvä pohjaveden vuoto. Tällöin on syytä alentaa pohjaveden pintaa ennen työn aloittamista. (Paalutusohje 2011, 2011, 184-185)

Maan tiivistymistä tai löyhtymistä esiintyy yleensä löyhässä karkearakeisessa maassa. Tämä saattaa johtaa painumiin maaperässä. Jos lähialueella on painumille riskialttiita alueita tai rakenteita, tulee siirtymiä seurata työnaikaisilla mittauksilla ja ryhtyä tarvittaessa korjaaviin toimenpiteisiin. Painumia voidaan olettaa esiintyvän 0,25-1 kertaa paalun maassa olevan pituuden etäisyydellä lyöntikohdasta. Painuman suuruutta voidaan arvioida kaavalla:

$$s = 0,005 \times D_k, \quad (7)$$

Jossa D_k on paalun pituus löyhässä karkearakeisessa maakerroksessa. (Paalutusohje 2011, 2011, 185)

4.7.3 Tärinä ja melu

Lyöntipaalutustyö aiheuttaa aina melua ja tärinää. Melutasojen ylärajoissa tulee noudattaa viranomaisten antamia rajoituksia (Taulukko6.) ja mittausmenetelmiä.

TAULUKKO 6. Yleisen melutason ohjearvot (www.ymparisto.fi)

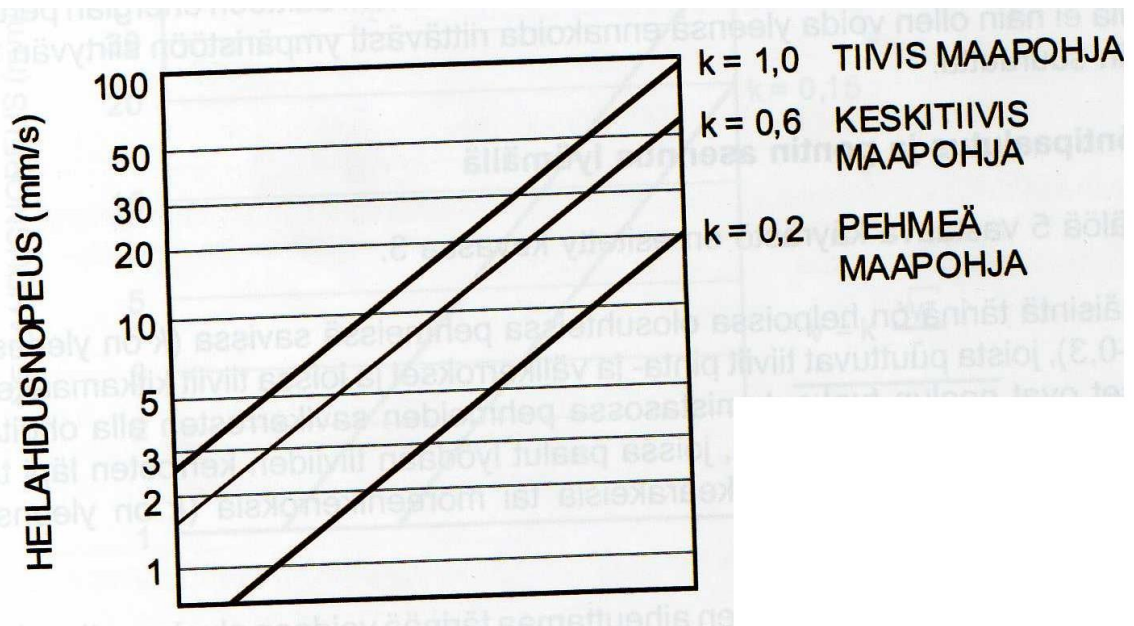
Sijainti	Melutaso päivälä 7-22
Ulkona, Asumiseen käytettävät alueet, virkistysalueet taajamissa ja niiden välittömässä läheisyydessä sekä hoito- tai oppilaitoksia palvelevat alueet	55 dB
Ulkona, Loma-asumiseen käytettävät alueet, leirintäalueet, virkistysalueet taajamien ulkopuolella ja luonnon-suojelualueet	45 dB

Paalutuskone on pistemäinen melulähde, jonka melutaso on avoimessa tasaisessa maastossa kymmenen metrin päässä lähteestä noin 80 dB melusuojatulla ja 115 dB suojaamattomalla järkäleellä. Melutasoa arvioitaessa on huomioitavaa että melu pienenee alueella, jossa on paljon esteitä, mutta toisaalta voi voimistua heijastumalla esimerkiksi viereisistä rakennuksista. Etäisyyden kaksinkertaistuessa pistemäisen lähteen melu pienenee 6-7 dB. Alueella, jossa altistuu yli 80 dB melulle, on käytettävä jatkuvasti kuulonsuojaimia. Lisäksi ulkopuolisten pääsy tällaiselle alueelle on estettävä. Paalutettaessa taulukon 3. mukaisilla alueilla, on tehtävä kyseisen kunnan tai kaupungin viranomaiselle meluilmoitus. (Lyöntipaalutusohje 2005, 2006, 77, www.helsinki.fi)

Tehtäessä paalutustyötä alueella, jossa on tärinän aiheuttamalle rasitukselle alttiita rakennuksia tulee ennen työn aloittamista suorittaa katselmukset riskialttiille rakennuksille. Tärinän esiintymiseen vaikuttavat myös pohjaolosuhteet. Tärinän heilahdusnopeuden arvo on pienimmillään pehmeissä savimaissa ja suurimmillaan tiiviissä karkearakeisissa moreenikerroksissa (Kuva 10.). Vastaava pohjarakennesuunnittelija määrittää tärinän heilahdusnopeuden ohjearvon, sekä päättää mahdollisista tärinämittareiden asentamisesta. Tärinän haittoja lyöntipaalutuksen yhteydessä voidaan pienentää minimoimalla paalun poikkileikkauspinta-ala, valitsemalla kevyempää kalustoa (tuottaa pienempää tärinää ympäristöön), keskeisellä iskulla, optimoidulla lyöntienergialla (PDA-mittaus, tai WEAP-analyysi) tai läpäisemällä tiiviit kerrokset kaivamalla tai esireiällä. Paalutuskoneen aiheuttamaa tärinää arvioidaan suurimman pystysuoran heilahdusnopeuden perusteella kaavalla:

$$v_{max} = k_e \times (\sqrt{E_{max}}) / r, \quad (8)$$

Jossa v_{max} on suurin pystysuora heilahdusnopeus, k_e on kokemukseräinen kerroin, E_{max} tehokas lyöntienergia ja r on etäisyys paalun kärjestä tarkastelukohtaan. Kertoimen k maksimiarvoksi oletetaan 1,5, ellei suoriteta tarkempia mittauksia esimerkiksi koepaalutusten yhteydessä. Yleensä k arvo on paljon pienempi kuin 1,5. (Paalutusohje 2011, 2011, 188; Rakentamisen aiheuttamat tärinät, 2010, 87-88)



KUVA10. Heilahdusnopeuden riippuvuus maaperäolosuhteista. Vaaka-akselin vasen reuna kuvastaa tilannetta löyhässä savimaassa ja oikea reuna tiivistä moreenia. (Rakentamisen aiheuttamat värinät)

4.8 Kohdekohtainen paalutustyö

Kohdekohtaisen paalutustyön tarkoitus on optimoida työn suoritus käytettävän paalun, paalutuskaluston ja vallitsevien maaperäolosuhteiden välillä. Paalutustyö simuloidaan etukäteen iskuaaltoyhtälöanalyysi-ohjelmistolla ja siitä koostetaan asennusohje työn suorittajien käyttöön. Simuloinnin avulla voidaan selvittää paalun jännityksiä upotuksen edetessä ja vaikuttaa jännitysten suuruuteen valittavalla iskunpituudella. Tällöin saadaan tietoa, siitä koska paalun asennusjännitykset ovat suurimmillaan ja samalla riski paalun rikkoontumisesta. Optimitilanne saavutetaan kun iskunpituus on suuri, kantavuus hyvä eikä ylitetä paalun sallittuja lyönninaikaisia jännityksiä. Asennusohjeessa olisi hyvä ottaa kantaa myös käytettävän iskunpituuden vaikutuksesta maaperän värinään. (Tarkio, 2012)

Kohdekohtainen paalutustyö käynnistyy urakka-neuvotteluista. Urakoitsija esittää asiakkaalle paalutustyön iskuaaltoanalyysillä simuloimansa laskelmat paalujen kestävydestä, tietynlaista iskunpituutta ja kalustoa käyttämällä. Simuloinnin paikkansa pitävyys ja paalujen todellinen geotekninen puristuskestävyys varmennetaan dynaamisella koe-kuormituksella. Jos päädytään käyttämään kohdekohtaista paalutusta, on se hyväksytet-

tävä paikallisella rakennusvalvontaviranomaisella sekä johtavalla pohjarakennesuunnittelijalle. (Tarkkio 2012

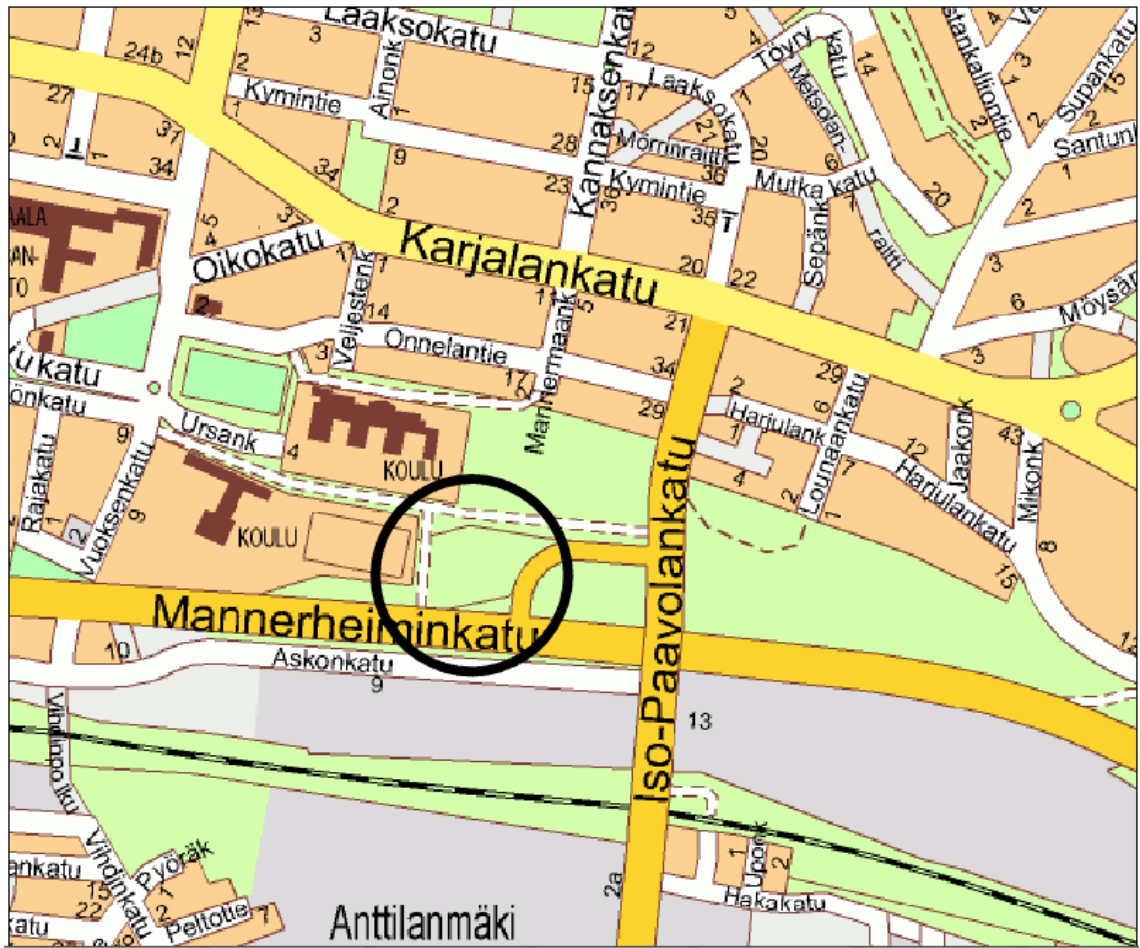
5 ESIMERKKITYÖMAALTA SAADUT TULOKSET

5.1 Yleistä

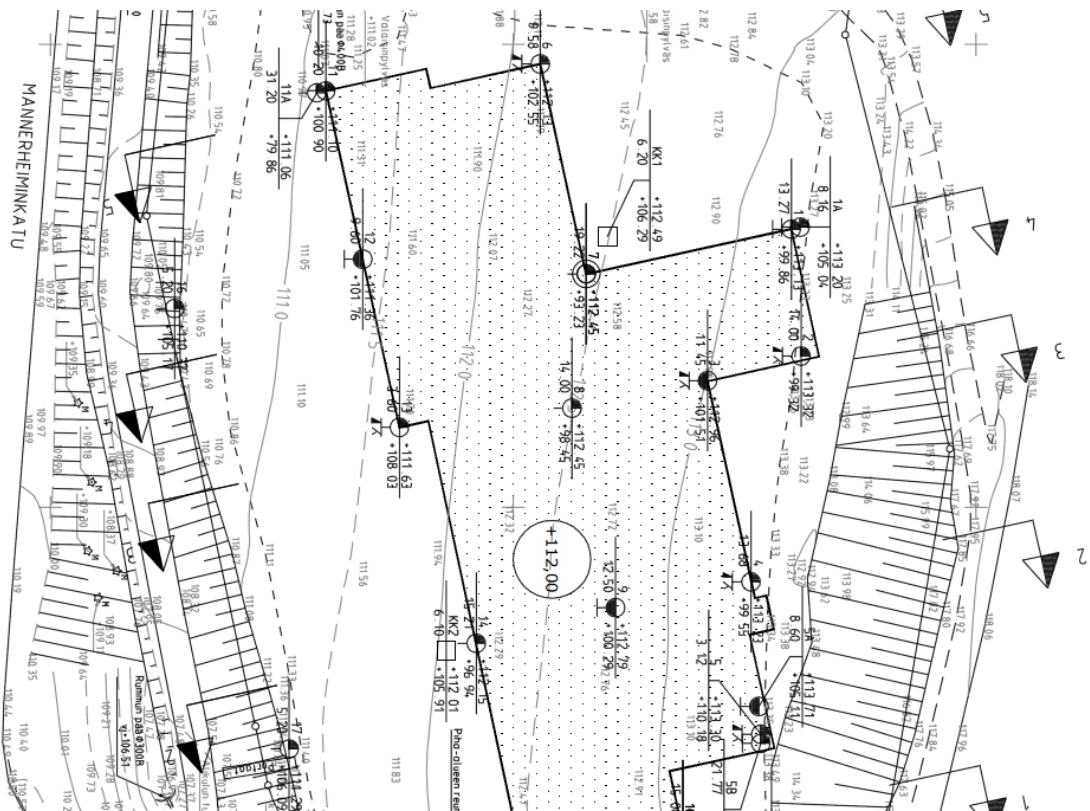
Tämän työn esimerkkityömaa sijaitsee Lahden kaupungissa, Paavolan kaupungin osassa (Kuva 11.). Rakennettava kohde on Päijät-Hämeen pelastuslaitoksen Paavolan palo-asema. Nykytilanteessa tontti on pohjoislaidaltaan Salpausselän jyrkkää rinnettä ja etelälaidalta paikoitusalueetta. Tontin korkeusasema suunnittelun rakennuksen alueella vaihtelee välillä +111,0 - +113,3 (Kuva 12.).

Tontin etelälaidalla sijaitseva paikoitusalue on tehty sekalaisen täytön päälle, jonka ensimmäinen n. 0,5-2,0 metrin paksuinen kerros sisältää soraa, hiekkaa ja tiilimursketta. Syvemmältä täyttö on pääosin silttiä, jonka joukossa on vähäisessä määrin soramaata, kiviä, metallia, tiiltä ja asfalttia. Täyttö ulottuu alueen etelälaidalla noin 6-7 metrin syvyyteen ja pienenee pohjoislaitaa kohti, harjun rinteeseen noustessa. Alueen luonnontilaiset pohjakerrokset ovat 7-15 metrin syvyyteen savista silttiä ja syvemmältä hiekkaa sekä soraa. Pohjatutkimuskairaukset ovat pysähtyneet tasolle n. 31 metriä, ilmeisesti sorakerroksen kiviin.

Pohjatutkimukset ja suunnitelmat on laadittu vanhan LPO-2005 mukaan. Uudessa paalutusohjeessa alueen pohjaolosuhteet luokiteltaisiin todennäköisesti geotekniseen luokkaan 3, sillä Paalutus tehdään n. 7 metrin epämääräisen täytön läpi. Geotekniseen luokkaan 3 kuuluvat erittäin vaativat pohjarakennuskohteet, joihin kuuluu ”rakenteiden perustaminen tätä tarkoitusta varten suunnittelemattomalle täytölle tai täytteelle, jota ei ole tiivistetty kerroksittain”. (Paalutusohje 2011, 2011, 28)



KUVA11. Yleiskartta alueesta.



KUVA12. Pohjatutkimuskartta.

5.2 Käytettävä paalutyyppe sekä käytettävä kalusto

Rakennus on suunniteltu perustettavaksi 300 mm x 300 mm teräsbetonisten kitkapaalujen varaan. Paalutus tehdään LPO-2005 mukaan käyttäen paalutusluokkaa II. Paalujen suunniteltu sallittu kantavuus on 400 kN/paalu. Koska kyseessä on kitkapaalutuskohte, tehdään paalujen kantavuuden ja pituuden tarkastamiseksi alueella koepaalutuksia 8 kappaletta. Kitkapaalujen arvioitu tukeutumistaso on +93,0, eli paalupituudeksi tulee 18,0 - 20,3 metriä. Paalut täytyy siis varustaa mekaanisin paalujatkoksien. Paalun kärjet suojataan maakengillä.

Vertailtaessa LPO-2005 ja PO-2011 välisiä mitoituslukuja, on vertailukelpoinen arvo 400 kN x 2. Tällöin saadaan geoteknisen puristuskestävyyden ominaisarvoksi 800 kN. Paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo olisi kaavan 3 mukaisesti:

$$R_{c;d} = 800 \text{ kN}/1,2 = 666,6 \text{ kN}$$

Uuden paalutusohjeen kanssa kysymyksessä olisi todennäköisesti paalutustyöluokka 2. Kohde on geotekniseltä luokaltaan 3 ja sen seuraamusluokka on CC2, onnettomuustilanteessa keskisuuret seuraamukset ja ihmishenkien menetyksen vaara. Valintaa PTL2 tukee myös suunnittelijan valitsema LPO-2005 mukainen paalutusluokka 2. (SFS-EN 1990, 2007, 7)

Lyöntityöhön käytetään Junttan PM 20 LC -paalutuskonetta. Kone painaa 55 tonnia ja sillä pystytään lyömään yhteismitaltaan 20 metrin pituisia paaluja. Koneessa on 5 tonnin painoinen hydraulijärkäle, sekä lyöntienergian mittaamisen tarvittava laitteisto.

Kohteessa käytettävä paalu on LPO-2005 II-luokan 300 mm x 300 mm teräsbetonipaalu, joka on varustettu maakengällä. Paalun betonin nimellislujuus on C35/40. Paalu pääraudoitteina on jokaisessa neljässä nurkassa A700HW harjaterästanko halkaisijaltaan 12 mm, sekä vahvistuksena 14 mm tanko.

Käytettävän paalun suurin sallittu lyönninaikainen puristusjännitys on kohdan 3.2.2 taulukon 1 mukaan:

$$F_{c;lyönti} = 0,8 \times A_c \times f_{ck} = 0,8 \times (0,3 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}) \times 35 \text{ MPa} = 2520 \text{ kN}$$

Vastaavasti suurin sallittu lyönninaikainen vetojännitys on kohdan 3.2.2 taulukon 1 mukaan:

$$F_{t;lyönti} = 0,9 \times A_s \times f_{yk} = 0,9 \times 1068 \text{ mm}^2 \times 700 \text{ MPa} = 672,8 \text{ kN}$$

Kyseisen paalun suurin mahdollinen geoteknisen puristuskestävyyden ominaisarvo paalutustyöluokassa 2 olisi kohdan 3.2.2 taulukon 1 mukaan: $2520 \text{ kN} \times 0,8 = 2016 \text{ kN}$.

5.3 Iskuaaltoyhtälöanalyysi

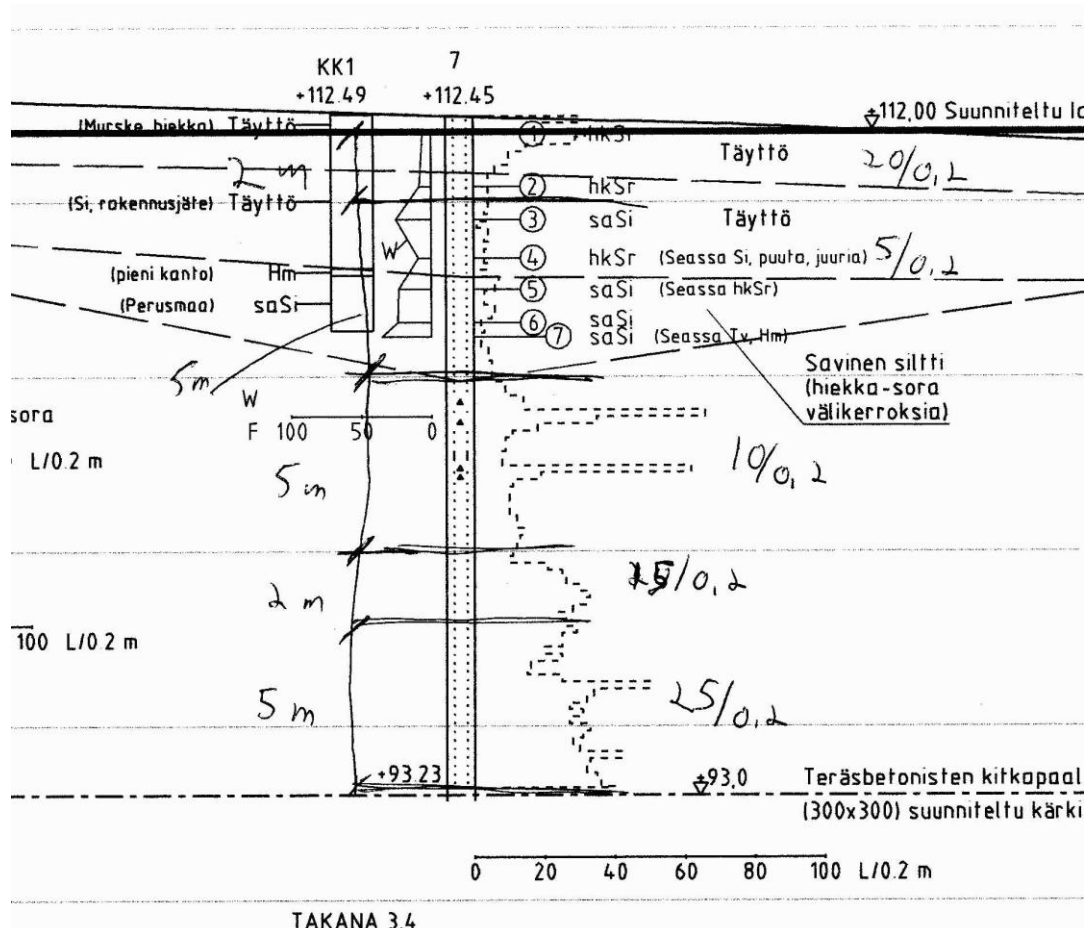
5.3.1 Yleistä

Kohteesta on tehty iskuaaltoyhtälöanalyysi käyttäen GRLWEAP-ohjelmistoa. Analyysin tarkoituksena oli seurata lyönninaikaisten veto- ja puristusjännitysten kehittymistä,

sekä arvioida paalun lopullista kantavuutta. Analyysejä tehtiin kaksi eri versiota. Toinen versio tehtiin tilanteessa, jossa ympäröivä maa ei häiriinny vaan säilyttää kitka- ja kantavuusominaisuutensa täysin ja se tulokset on esitetty liitteessä 2. Toinen versio tehtiin tilanteessa, jossa paalun vaippaan vaikuttava kitka heikentyy 40 % ja kärkeen vaikuttava kärkivastus 20 % ja sen tulokset ovat liitteessä 1. Tällä pyrittiin kuvaamaan työnaikaisia tapahtumia, koska maata syrjäyttävän paalun asennus aiheuttaa aina jonkin verran liikettä maapohjassa.

5.3.2 Maamallin luonti

Simuloinnissa käytetty maamalli pyrittiin luomaan realistisesti olemassa olevien kairastulosten perusteella. Kohteessa on suoritettu yhteensä 17 kpl heijarikairauksia ja 5 kpl painokairauksia. Näistä vain kaksi tutkimuspistettä kattoi maakerrokset pinnasta suunniteltuun paalutustasoon asti. GRLWEAP-analyysiä varten valittiin piste numero 7 (Kuva 13.), joka jaettiin kairausvastuksen perusteella viiteen eri maakerrokseen. Syvyydelle 12 - 14 m mallinettiin maakerros, jotta paalun jatkoskohta saadaan simuloitua tarkemmin, vaikkei kairausvastus välillä oleellisesti muuttunutkaan. Kerrosten keskimääräinen kairausvastus muutettiin paalun kärki- ja vaippavastukseksi, kohdan 3.2.8 taulukon 4. mukaan. Kerroksen kimmoinen kokoonpuristuma ennen murtumista, eli quake, valittiin väliltä 2 - 6 mm. Quake on pienempi kerroksen ollessa tiiviimpi ja vastaavasti suurempi kerroksen ollessa löyhempi. Smith vaimennuskertoimet paalun kärjelle ja vaipalle valittiin väliltä 0,35 - 0,9 s/m.



KUVA13. Tutkimuspiste nro 7 jaettuna maakerrokseen ja keskimääräisiin kairausvas-
tuksiin.

5.3.3 Paalutyypin ja paalutuskaluston mallinnus

Käytettävän paalun ja paalutuskaluston mallintaminen GRLWEAP -ohjelmaan on melko yksinkertaista. Työssä paalu mallinettiin kohdan 3.2.7. mukaisesti. Paalun kimmoduuliksi saatiin kaavalla 6:

$$E=23000*((35+8)/10)^{0,3} = 35\ 626\ \text{MPa}$$

Kohteessa käytettävä paalutuskalusto mallinettiin laitevalmistajien antamien tietojen perusteella, eli periaatteessa kun tunnettiin kone ja järkäle valittiin ne valmiista listasta. Iskusoja ja iskutyyny mallinettiin myös Junttanin antamilla tiedoilla. Iskunpituudeksi valittiin 0,3 m.

Ohjelmalla voidaan simuloida myös erilaisia maan kitkaominaisuuksien heikentymisiä paalun vaipan tai kärjen ympärillä. Tätä kohdetta varten tehtiin kaksi tarkastelua, toinen tehtiin asennustilanteesta, jolloin vaippavastuksen oletettiin heikentyvän 40 % ja kärki-
vastuksen 60 % maan löyhtymisestä paalun ympärillä. Toinen simulointi tehtiin tilanteesta noin viikko työn jälkeen, jolloin tilanne maaperässä on normalisoitunut.

5.3.4 Iskuaaltoyhtälöanalyysin tulokset

GRLWEAP-simuloinnin tulokset on esitetty liitteessä 1-2. Simulointituloksista nähdään että asennuksen aikaiset puristusjännitykset ovat suurimmillaan 8,0 metrin upotuksen jälkeen eli kohdassa jossa löyhä täyttö päättyy ja tiiviimpi sora ja hiekkakerros alkavat. Huippuarvoksi saatiin 20,144 MPa eli 1812,6 kN. Vastaavasti suurimmaksi asennuksen aikaiseksi vetojännitykseksi saatiin 3,148 MPa eli 313,2 kN, 6,0 metrin upotuksen jälkeen.

Simuloinnin avulla määritettiin myös koepaalutuksen loppulyöntiehdot. Tuloksista nähdään että paalun lähestyessä tavoitetasoan ja tavoitekantavuuttaan pienenee paalun painuma noin 4,5 mm per lyönti. Loppulyöntiehdoksi määriteltiin 55 mm:n painuma 10 iskun sarjalla.

Tällöin paalun geotekninen murtokestävyys noin viikon kuluttua asentamisesta olisi 1710 kN. Tämä arvo on uuden paalutusohjeen mukainen $(R_{c,m})_{mean}$, koska se on pohjatutkimustulosten kannalta huonoimmasta mahdollisesta pisteestä. Pohjatutkimustulosten perusteella samanlaisia pohjaolosuhteita on noin 50 % kohteessa. Tällä saadaan korrelaatiokertoimeksi taulukosta 2. $\xi_6=1,45 \times 1,05=1,52$ paalun ominaiskestävyyden johtamiseksi. Varmuuskerroin γ on teräsbetonipaaluille 1,2. Näin ollen voidaan laskea Paalutusohje 2011:n mukainen kantavuus eli kestävyuden mitoitusarvo $R_{c,d}$ kaavojen 5 ja 3 mukaisesti.

$$R_{c,k}=1710,0 \text{ kN}/1,52=1125,0 \text{ kN}$$

$$R_{c,d}=1125,0 \text{ kN}/1,20=937,5 \text{ kN}$$

5.4 Ympäristön huomioiminen kohteessa

Lähin häiriintyvä rakennus sijaitsee Mannerheiminkadun eteläpuolella, noin 130 metrin päässä paalutuskohteesta. RIL-253-2011 Rakentamisen aiheuttamat tärinät -julkaisun perusteella voidaan rakennuksen rakennustapakertoimeksi arvioida 1,00. Tärinän ohjearvoksi saadaan:

$$v = 1,00 \times 10 \text{ mm/s} = 10 \text{ mm/s}$$

Paalutustyön aiheuttama tärinä kohteessa likimäärin on kaavan 8 mukaan:

$$v_{\max} = 1,5 \times \sqrt{(0,3 \text{ m} \times 5 \text{ tn})/130 \text{ m}} = 0,015 \text{ mm /s,}$$

Tämän johdosta siis ei tarvita toimenpiteitä tärinän ehkäisemiseksi.

Paalutustyön aiheuttama melutaso 130 m päässä on noin 50 dB. Paalutustyö ei siis aiheuta haittaa ympäristön asumis- tai työskentelyviihtyyteen, jonka rajana pidetään 65 dB. Lähimmän häiriintyvän kohteen ja työmaan välissä sijaitsee lisäksi vilkkaasti liikennöity valtatie, joka toimii myös melunlähteenä.

Pohjatutkimuksissa ei ole havaittu pohjavettä. Tutkimusten mukaan pohjaveden oletetaan olevan syvällä, paalutustason alapuolella.

5.5 Koepaalutustyö

Koepaalutus kohteeseen suoritettiin 15.4 - 18.4.2013. Kohteeseen lyötiin vaihteleviin kohtiin yhteensä 32 kpl koepaaluja Junttan PM20Lc -koneella ja Junttanin 5 tonnin kiihdytetyllä hydraulijärkälällä. Paalut lyötiin 0,3 m iskunpituudella, kunnes painuma pieneni alle 50 mm. Paalujen kantavuus varmistettiin aiemmin määritettyjen loppulyöntiohjeiden mukaisesti. Yhden paalun kohdalla asennus lopetettiin 80 mm painumaan, koska kyseessä oli kuitenkin koepaalutus ja haluttiin saada hieman vertailua.

5.6 Koekuormituksen tulokset

Kun koepaalut olivat asettuneet noin viikon verran, suoritettiin paalujen kantavuuden määrittämiseksi dynaaminen koekuormitus (Taulukko 7).

TAULUKKO7. PDA-mittauksen tulokset.

Paalu nro:	Paalupituus L (m)	Tehokas pituus Le (m)	Kantavuus RMX (kN)
1	15	12,5	1843
13	11	9,2	1484
14	15	11,0	1718
15	11	7,5	1814
35	11	10,4	1027
36	14	12,5	1721
37	11	10,0	1148
54	10	9,2	1481
55	10	8,2	1535
86	10	9,0	1498
87	11	10,2	1585
121	11	10,4	1495
122	13	11,2	1783
216	11	10,4	1439
217	13	11,5	1523
218	14	11,5	1686
225	10	9,0	1523
226	13	10,0	1808
232	15	10,0	1228
233	15	11,0	1531
234	15	11,5	1520
235	15	9,0	1130
236	15	10,5	1996
256	11	8,4	1764
259	14	10,0	1606
261	10	9,1	1592
274	11	9,4	1372
296	11	8,9	1409
316	11	9,0	1572
318	10	8,7	1750
320	10	9,2	1450
501	9	8,4	834
(Rc;m)mean (kN)			1549,39

Dynaamisen koekuormituksen keskiarvossa, $(R_{c;m})_{\text{mean}}$, ei ole huomioitu paalua nro 501, jonka asennus päätettiin 80 mm:n painumaan 10 lyönnin sarjalla. Paalujen kantavuutta laskettaessa Paalutusohje 2011:n mukaisesti käytetään kaavaa 5 ja 3. Huonoin tulos, $(R_{c;m})_{\text{min}}$, on otettu paalusta nro. 35, 1027 kN. Koska kyseessä on kitkapaalukohde, tulee korrelaatiokertoimet kertoa luvulla 1,05. Toisaalta koska kyseessä on LPO-2005:n mukainen kitkapaalukohde, tulee PDA-mittauksissa käyttää aina signaalinsovitusta, joten kertoimet kerrotaan myös 0,9. Asennetuista paaluista yli 30 kpl on koekuormitettu, joten ominaisarvon laskemiseksi käytetyssä kaavassa käytettiin korrelaatiokertoimina $\xi_5=1,4 \times 1,05=1,33$ ja $\xi_5=1,25 \times 1,05=1,19$.

$$R_{c;k}=1549,4 \text{ kN}/1,33=1164,9 \text{ kN}$$

tai

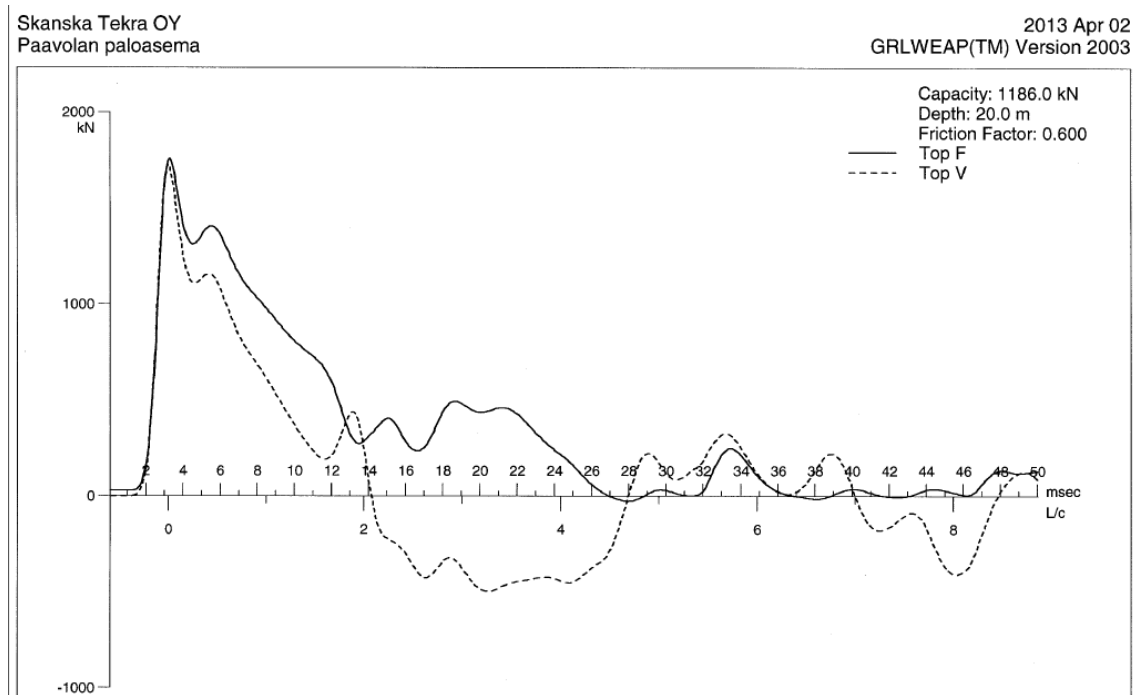
$$R_{c;k}=1027 \text{ kN}/1,19=863,0 \text{ kN}$$

$$R_{c;d}=784 \text{ kN}/1,2=719,1 \text{ kN}$$

5.7 Yhteenveto ja jatkotoimenpiteet

Alustavien suunnitelmien mukainen tavoitekantavuus, eli geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo, paaluille oli 400 kN LPO-2005 mukaan ja uuden ohjeen mukaan 666,6 kN. Molemmat arvot ylittyvät kirkkaasti sekä simuloinnissa että lopullisessa tilanteessa. PDA-mittauksen lopputuloksena on suositeltu loppulyöntiohjetta 55 mm/s10, joka on sama, johon päädyttiin simuloinnin pohjalta. Mittauksen perusteella myös kaikki asennetut paalut olivat säilyneet ehjinä, mikä oli yksi tavoite simulointiin pohjautuneessa asennusohjeessa. Dynaamisen koekuormituksen myötä paalujen lopulliseksi upotustasoksi suositeltiin +100,00, joka on 7 metriä korkeampi kuin alkuperäinen taso. GRLWEAP-simuloinnin avulla saatiin yksittäisen paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvoksi 937,5 kN joka on aika paljon suurempi kuin PDA:lla todennettu 719,1 kN. Yksittäisten paalujen kantavuuksia vertailtaessa simuloinnin arvoihin löytyy koepaaluista 8 kappaletta, joiden R_c on 1700 kN tai parempi. Kuvassa 14 on esitetty GRLWEAP-ohjelman iskuaaltokuvaaja (Kuva 14) ja vertailun vuoksi on kuvassa 15 todellisen PDA-mittauksen iskuaaltokuvaaja (Kuva 15). Molemmissa tapauksissa suurin paaluun siirtynyt jännitys on 2000 kN:n luokkaa, tosin GRLWEAP-kuvaajassa tämä tapahtuu heti ja PDA-mittauksessa hieman myöhemmin. PDA-mitattua paalua on myös

kuormitettu eri lyöntienergialla, sillä PDA-mitattua paalua tulee lyödä kovempaa kellovollisten tuloksien saamiseksi.



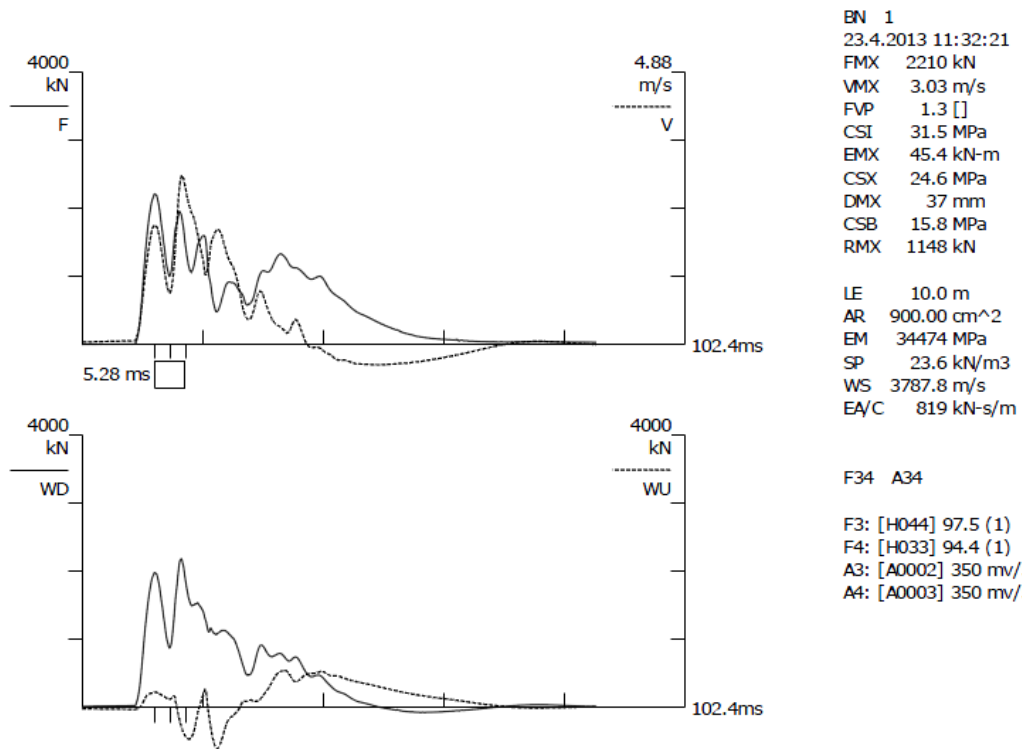
KUVA14. GRLWEAP-ohjelman iskuaaltokuvaaja.

FCG

PAAVOLA PELAS 23042013
PDA OP: TAUBERT

PILE DRIVING ANALYZER ®
Version 2010.101.005
37

SKANSKA INFRA OY



KUVA15. Paalun 37 PDA-mittauksen iskuaaltokuvaaja.

6 POHDINTA

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia paalun asennuksen ja rakenteellisen kestävyysriippuvuutta. Tarkoituksena oli tutkia uuden Paalutusohje 2011:n sallimissa rajoissa työtapaa, jolla voidaan optimoida paalun kantavuutta lopullisessa tilanteessa. Työn tarkoituksena oli myös tehdä paalutuspyötkirjapohja (Liite 4 ja 5).

Työn tuloksia todennettiin yhden esimerkkityömaan kautta. Esimerkkityömaalla oli yksittäisen paalun kantavuuden tavoitteeksi asetettu 666,6 kN. Simuloimalla suoritettua kantavuuden määrittämisestä saatiin arvoksi 937,5 kN. Dynaamisesta koekuormituksesta taas saatiin tulokseksi 719,1 kN. Etukäteen määritettyjen asennusohjeiden perusteella saatiin siis paalun kantavuus n. 8 % suuremmaksi kuin vaadittu.

Esimerkkityömaalle tehdyn simuloinnin ja PDA-mittauksen 200 kN:n ero selittyy sillä että alkuperäinen upotustaso oli lopullista liki 7 m. syvemmällä. Paalupituuden erotus WEAP-analyysin ja PDA-mittauksen välillä vähentää paalun vaippa pinta-alaa 8,4 m. Koska kitkapaalun kantavuus riippuu vaippakitkan suuruudesta, voidaan olettaa että erot kantavuuksissa johtuvat pienemmästä käytössä olevasta vaippa pinta-alasta.

Syy WEAP-analyysin pidemmästä ylettyvistä paalupituuksista johtuu kohteen alkuperäisestä upotustason arvioista. Alkuperäisessä arviossa upotustasolle ylettyneitä kairausdiagrammeja oli vain 2 kappaletta, joista huonommasta luotiin simuloinnin maamalli. Todellisuudessa kohteessa oli myös huonompia maamalleja. Koska GRLWEAP on lisenssi ohjelma, oli simuloinnin tekemiseen varattu rajallisesti aikaa. Jos kohteesta olisi tehty useita simulointeja eri pisteistä ympäri rakennusta ja todennettu näiden pisteiden vastaavuus PDA-mittauksella, voitaisiin jatkossa harkita koepaalutuksen korvaamista simuloinnilla vastaavanlaisissa kohteissa. Toisaalta simuloinnista ei saatu viitteitä paalupituuden lyhentymisestä.

Toinen tärkeä huomio on paalujen asennuksen aikaisten jännitysten hallinta. Kun pahimmat kohdat varsinkin paalun asennuksen aikaisten vetojännitysten osalta ovat tiedossa, voidaan tällä säästää aikaa ja rahaa, koska paalut eivät rikkoudu asennustilanteessa. Lisäksi kustannussäästöjä saadaan myös suuresta iskunpituudesta, joten paalutuskooneen toiminta-aika lyhenee.

Uusi paalutusohje asettaa myös työn suorittajalle entistä tiukempia vaatimuksia. Paalutuskoneenkuljettajan pätevyysvaatimukset ovat hyvä lisä pyrkimyksissä laadukkaampaa työn jälkeä kohti. Paalutustyönjohtaja ei välttämättä ole aina työmaalla ongelmatilanteen sattuessa, ja on jo työn sujuvuuden kannalta hyvä, että paikalla on joku joka tuntee työn.

Kohdekohtaisesti suunnitellussa paalutustyössä voidaan myös puuttua paalutuskohteen ympäristöön ja työn vaikutuksiin siihen. Kun simuloinnin avulla on selvitetty käytettävä iskunpituus, voidaan helposti arvioida työn aiheuttamia värinävaikutuksia. Tämän jälkeen voidaan tarkemmin harkita värinämittareiden asentamista. GRLWEAP-simulointi on myös nopea suorittaa uudestaan tallennettuun pohjaan. Jos käytettäisiin värinämittareita, voitaisiin mittaustulosten jälkeen hienosäätää iskunpituutta ja ohjata työtä kentällä heti simuloinnin tuloksiin. Sama pätee muihinkin vaikeuttaviin seikkoihin, joiden johdosta iskunpituutta jouduttaisiin pienentämään.

LÄHTEET

Rantamäki, M. & Tammirinne, M. 1979. Pohjarakennus. Helsinki: Yliopistokustannus/Otatieto.

Jääskeläinen, R. 2009. Pohjarakennus. Tampere: Tammertekniikka/Amk-kustannus Oy.

RT-2011 Paalutuotelehti. 2011. Betoniteollisuus ry.

RIL-254-2011. Paalutusohje 2011. 2011. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

RIL-223-2005. Lyöntipaalutusohje 2005. 2005. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

RIL-253-2011. Rakentamisen aiheuttamat tärinät. 2010. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

Riihimäki, T. 2011. Uusi paalutusohje PO-2011. Betoniteollisuuden paaluseminaari 1.12.2011. Vantaa.

<http://www.betoni.com/elementtirakentaminen/paalut/paaluseminaari-2011>

Henkilöhaastattelu: Tarmo Tarkkio, Skanska Infra Oy, 19.12.2012.

Henkilöhaastattelu: Tarmo Tarkkio, Skanska Infra Oy, Olli-Heikki Pietikäinen, Rudus Oy. 12.12.2012

Lujabetoni. Luja-pienpaalutusohje. Luettu 21.12.2012.

http://www.lujabetoni.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/luja/embeds/lujabetoniwwstructure/17539_20110526142003-1570-Luja-pienpaaluohje.pdf

Laitakari, A. 2011. Teräsbetonipaalujen ja RR-paalujen hintavertailu. Betoniteollisuuden paaluseminaari 1.12.2011. Vantaa.

<http://www.betoni.com/elementtirakentaminen/paalut/paaluseminaari-2011>

Emeca. Tuotteet. Luettu 8.1.2013. <http://emeca.fi/index.php?lang=fin&p=2>

American Piledriving Equipment inc. APE Drive Caps and Inserts. Luettu 11.1.2013. <http://www.apevibro.com/ver2/products/diesel/inserts.asp>

Helsingin kaupunki. Meluilmoitukset. Luettu 12.1.2013.

<http://www.hel.fi/hki/ymk/fi/Yritykset,+toiminnanharjoittajat/Luvat,+ilmoitukset,+maksut/Ymparistolainsaadannon+mukaiset+luvat+ja+ilmoitukset/Meluilmoitukset>

Ympäristöministeriö. Melutason ohjeartot. Luettu 12.1.2013.

<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=8899&lan=fi>

SFS-EN 1990 Eurokoodi suunnitteluperusteet. Luettu 21.3.2013

<http://www.eurocodes.fi/1990/1990/NA%20SFS-EN1990-YM.pdf>

Pulkkinen, J. 2013. Lahden paloaseman koepaalutus. Sähköpostiviesti. ja-pulkkinen@skanska.fi. Tulostettu 25.3.2013.

LIITTEET

Liite 1. GRLWEAP iskuaaltoyhtälöanalyysi työnaikainen tilanne

Skanska Tekra OY
Paavolan paloasema

2013 Apr 02
GRLWEAP(TM) Version 2003

Gain/Loss 3 at Shaft and Toe 0.600 / 0.800

Depth m	Ultimate Capacity kN	Friction kN	End Bearing kN	Set mm/10 bl	Comp. Stress MPa	Tension Stress MPa	Stroke m	ENTHRU kJ
1.0	324.0	36.0	288.0	228.8	19.892	-2.790	0.30	12.3
2.0	360.0	72.0	288.0	202.4	19.892	-1.748	0.30	12.3
3.0	350.4	105.6	244.8	192.3	19.892	-1.842	0.30	12.3
4.0	336.0	134.4	201.6	189.4	19.892	-2.133	0.30	12.3
5.0	316.8	158.4	158.4	192.7	20.046	-2.509	0.30	12.3
6.0	292.8	177.6	115.2	204.5	20.076	-2.978	0.30	12.3
7.0	264.0	192.0	72.0	226.2	20.123	-3.483	0.30	12.3
8.0	291.3	204.9	86.4	206.2	20.142	-3.148	0.30	12.4
9.0	320.4	219.6	100.8	188.3	20.144	-2.940	0.30	12.3
10.0	351.3	236.1	115.2	172.4	20.128	-2.987	0.30	12.3
11.0	384.0	254.4	129.6	159.5	20.132	-2.877	0.30	12.4
12.0	418.5	274.5	144.0	147.1	20.113	-2.862	0.30	12.4
13.0	478.3	297.0	181.3	137.9	20.063	-3.126	0.30	12.7
14.0	541.2	322.5	218.7	119.9	20.091	-2.269	0.30	12.7
15.0	607.0	351.0	256.0	106.5	20.110	-2.934	0.30	12.8
16.0	734.9	382.9	352.0	86.1	20.112	-2.494	0.30	12.8
17.0	866.5	418.5	448.0	70.5	20.099	-1.670	0.30	12.8
18.0	1001.9	457.9	544.0	58.9	20.103	-1.705	0.30	12.7
19.0	1141.0	501.0	640.0	48.6	20.088	-1.732	0.30	12.7
20.0	1186.0	546.0	640.0	45.2	20.032	-1.486	0.30	12.4

Total Number of Blows: 1628

Driving Time (min): 54 40 32 27 23 20 18 16 14 13
 @Blow Rate (b/min): 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120

Driving Time for continuously running hammer; any wait times not included

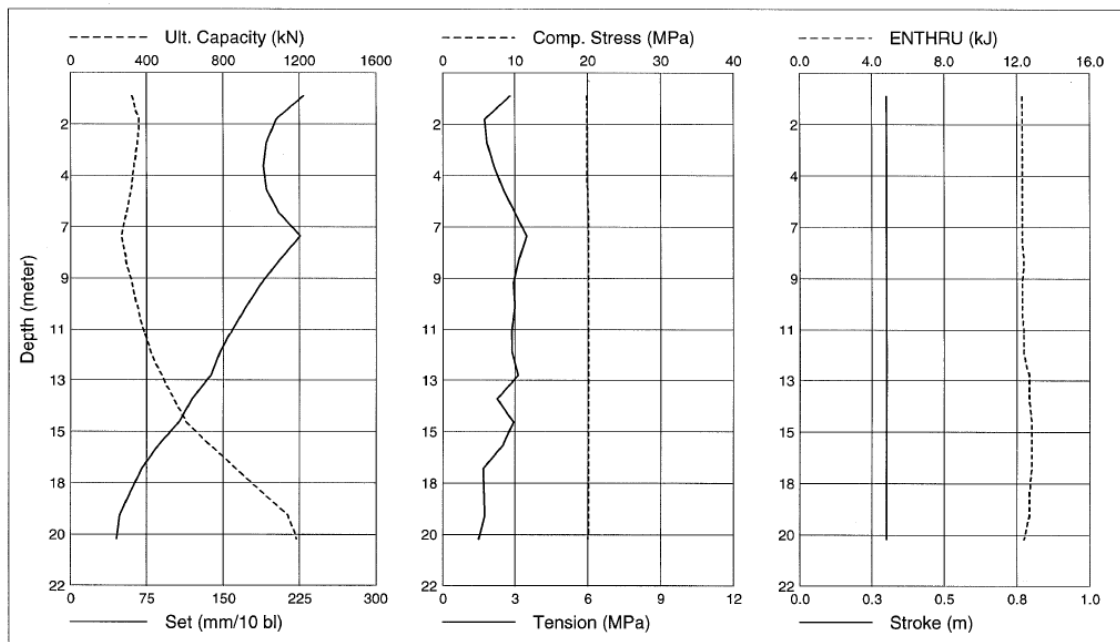
Skanska Tekra OY

2013 Apr 02

Paavolan paloasema

Gain/Loss 3 at Shaft and Toe 0.600 / 0.800

GRLWEAP(TM) Version 2003



Liite 2. GRLWEAP iskuaaltoyhtälöanalyysi, lopullinen tilanne

Skanska Tekra OY
Paavolan paloasema

2013 Apr 02
GRLWEAP(TM) Version 2003

Gain/Loss 1 at Shaft and Toe 1.000 / 1.000

Depth m	Ultimate Capacity kN	Friction kN	End Bearing kN	Set mm/10 bl	Comp. Stress MPa	Tension Stress MPa	Stroke m	ENTHRU kJ
1.0	420.0	60.0	360.0	171.5	19.892	-0.831	0.30	12.3
2.0	480.0	120.0	360.0	144.1	19.892	-1.730	0.30	12.3
3.0	482.0	176.0	306.0	132.3	19.892	-1.538	0.30	12.3
4.0	476.0	224.0	252.0	126.1	19.980	-1.551	0.30	12.3
5.0	462.0	264.0	198.0	125.6	20.195	-1.776	0.30	12.3
6.0	440.0	296.0	144.0	130.0	20.232	-1.817	0.30	12.3
7.0	410.0	320.0	90.0	140.3	20.269	-3.046	0.30	12.3
8.0	449.5	341.5	108.0	128.2	20.276	-3.150	0.30	12.3
9.0	492.0	366.0	126.0	117.4	20.267	-2.851	0.30	12.4
10.0	537.5	393.5	144.0	108.0	20.256	-2.464	0.30	12.5
11.0	586.0	424.0	162.0	99.3	20.256	-2.134	0.30	12.5
12.0	637.5	457.5	180.0	91.3	20.224	-1.795	0.30	12.6
13.0	721.7	495.0	226.7	84.0	20.219	-2.552	0.30	12.8
14.0	810.8	537.5	273.3	72.2	20.241	-2.424	0.30	12.7
15.0	905.0	585.0	320.0	62.1	20.249	-2.007	0.30	12.7
16.0	1078.1	638.1	440.0	47.4	20.240	-3.011	0.30	12.6
17.0	1257.5	697.5	560.0	35.1	20.228	-2.621	0.30	12.6
18.0	1443.1	763.1	680.0	24.6	20.232	-1.623	0.30	12.5
19.0	1635.0	835.0	800.0	15.6	20.203	-0.933	0.30	12.3
20.0	1710.0	910.0	800.0	12.7	20.129	-1.069	0.30	11.9

Total Number of Blows: 3330

Driving Time (min): 111 83 66 55 47 41 37 33 30 27

@ Blow Rate (b/min): 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120

Driving Time for continuously running hammer; any wait times not included

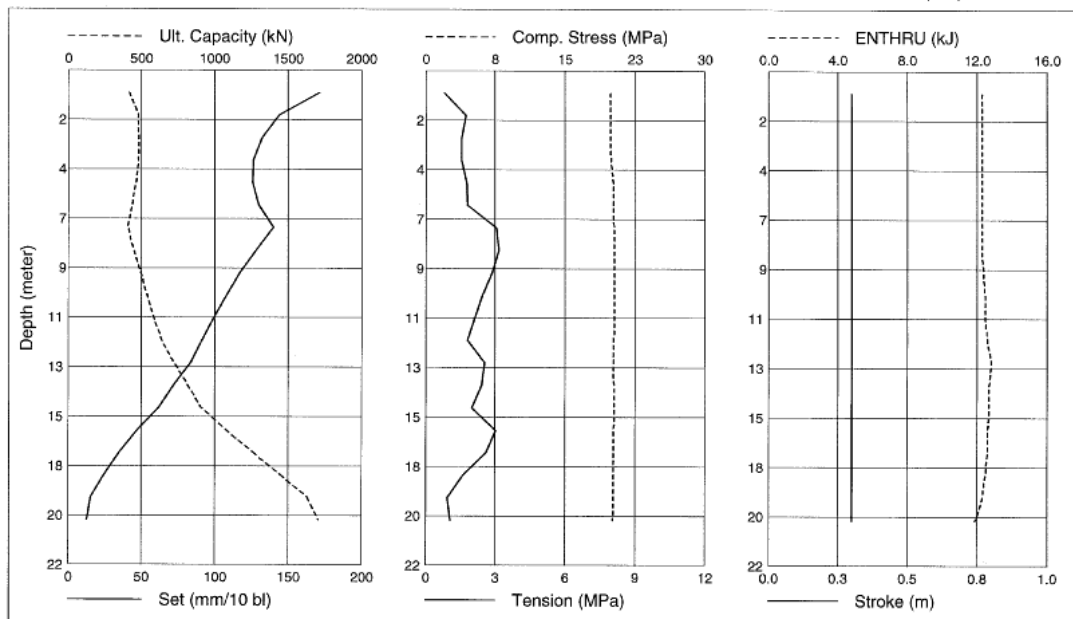
Skanska Tekra OY

2013 Apr 02

Paavolan paloasema

Gain/Loss 1 at Shaft and Toe 1.000 / 1.000

GRLWEAP(TM) Version 2003



Liite 3: 1 (3) Paavolan paloaseman kohdekohtainen paalutusohje

1. Työmaan sijaintitiedot

Kaupunki: Lahti

Kaupunginosa: Paavola

Kortteli: 2199

Tontti: 4

2. Kaluston tiedot

Käytettävä paalutuskone:

Junttan PM 20 LC

Järkäle:

Junttan HHK-5, 5 tonnin hydraulijärkäle

Iskusuoja ja iskutyyny Junttanin valmistamat

3. Käytettävä paalu

Käytettävä paalutyypäi:

TB 300x300 mm², LPO-2005 Lk II

Kärkityyppi:

Maakenkä

Nimellislujuus ja teräslaatu:

C35/45, A700HW pääteräkset nurkissa d 12+14 mm

Suurin sallittu rakenteellinen puristusjäännitys, PO-2011 mukaan:

$f_{ck} = 35 \text{ MPa}$

$A_c = 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$

$F_{c,lyönti} \leq 0,8 \times 35 \text{ MPa} \times 90\,000 \text{ mm}^2 = 2520 \text{ kN}$

Jatkuu

Liite 3: 2 (3). Paavolan paloaseman kohdekohtainen paalutusohje

Suurin sallittu rakenteellinen vetojännitys, PO-2011 mukaan:

$$f_{yk} = 700 \text{ MPa}$$

$$A_s = 1068 \text{ mm}^2$$

$$F_{c,lyönti} \leq 0,9 \times 700 \text{ MPa} \times 1068 \text{ mm}^2 = 672,8 \text{ kN}$$

Paalupituus:

18-20 m

4. Pohjaolosuhteet

Pohjaolosuhteiltaan kohde on seuraavanlainen:

0-2 m	Tiivis sora/mursketäyttö
2-7 m	Löyhä täyttö, silttiä, hiekkaa, soraa. Lisäksi seassa kiviä, puun ja asfaltin kappaleita
7-12 m	silttinen hiekkakerros
12-20 m	Hiekka-sorakerros

5. Lyöntiohjeet

Paalutustyöstä on tehty iskuaaltoyhtälöanalyysi heijarikairausten mukaiseen maa-malliin käyttäen pudotuskorkeutta 0,30 m. Analyysissä on otettu huomioon maan mahdollinen häiriintyminen paalun vaipan ja kärjen läheisyydessä. Suurin paaluun kohdistuva puristusrasitus, 1812,6 kN, havaittiin 8 m upotuksen jälkeen. Suurin paalun kohdistuva vetorasitus, 313,2 kN, havaittiin paalun upottua 6 m. Erytistä varovaisuutta tulee noudattaa n. 2 m upotuksen jälkeen paalun tunkeutuessa tiivistä maakerroksesta löyhempään. Jos havaitaan paalujen särkymistä, pienennetään iskunpituutta 0,15 m 2-6 metrin syvyydellä. Varsinkin paalutettavan alueen itälaidalla saattavat vetojännitykset olla hieman arvioitua suuremmat.

Syvyys	Paalun arvioitu painuma
0-9 m	200 mm
9-13 m	170-130 mm
14-16 m	120-80 mm
16-20 m	70-50 mm

Kun paalun painuma pienenee alle 50 mm, voidaan lyödä paalun lopetuslyönnit. Kantavuuden varmistamiseksi lyödään 10 lyönnin sarja, käyttäen pudotuskorkeutta 0,3 m. Kun painuma (s10) sarjalla on alle 55 mm, voidaan todeta paalun saavutaneen tavoitellun kantavuutensa. Jos painuma lyöntisarjan aikana on suurempi, lyödään toinen sarja. Kuitenkin maksimissaan kolme sarjaa.

Jatkuu

Liite 3: 3 (3). Paavolan paloaseman kohdekohtainen paalutusohje

6. Ympäristön huomioiminen

Lähin häiriintyvä rakennus sijaitsee Mannerheiminkadun eteläpuolella, noin 130 metrin päässä paalutuskohteesta. RIL-253-2011 Rakentamisen aiheuttamat tärinät, julkaisun perusteella voidaan rakennuksen rakennustapakertoimeksi arvioida 1,00.

Tärinän ohjearvoksi saadaan:

$$v = 1,00 \times 10 \text{ mm/s} = 10 \text{ mm/s}$$

Paalutustyön aiheuttama tärinä kohteessa likimäärin on:

$$v_{\max} = 1,5 \times \sqrt{(0,3 \text{ m} \times 5 \text{ tn})/130 \text{ m}} = 0,015 \text{ mm/s}, \text{ ei toimenpiteitä tärinän ehkäisemiseksi.}$$

Paalutustyön aiheuttama melutaso 130 m päässä on noin 50 dB. Paalutustyö ei aiheuta siis haittaa ympäristön asumis-, tai työskentelyviihtyyteen, jonka rajana pidetään 65 dB. Lähimmän häiriintyvän kohteen ja työmaan välissä sijaitsee lisäksi vilkkaasti liikennöity valtatie, joka toimii myös melunlähteenä.

Pohjatutkimuksissa ei ole havaittu pohjavettä. Tutkimusten mukaan pohjaveden oletetaan olevan syvällä, paalutustason alapuolella.

Laatija:

Henri Unkila

050-5230123

henri.unkila@eng.tamk.fi

Liite 4. Paalutuspöytäkirja, yleinen osa

SKANSKA INFRA OY			
Projekti		Projektinumero	
Osoite			
Kaupunki	Kortteli	Tontti	
Paalutustyönjohta	Puh.	Mail	
Paalutuskoneenkäyttäjä	Puh.	Mail	
Tilaaja			
Tilaajan yhteyshenkilö	Puh.	Mail	
Pohjarakennesuunnittelija			
Vastuuhenkilö	Puh.	Mail	
Paalutustyyppi	Paalukoko	Kätkityyppi	Määrä kpl
Paalutustyyppi	Paalukoko	Kätkityyppi	Määrä kpl
Paalutustyyppi	Paalukoko	Kätkityyppi	Määrä kpl
Paalutustyyppi	Paalukoko	Kätkityyppi	Määrä kpl
Paalutuskone:	Jätkä:	Jätkään paino:	
Huomautuksia/lisätietoja:			
Paikka:	Pvm:	Paalutustyönjohtajan allekirjoitus:	
_____	_____	_____	
Skanska Infra Oy Nauvontie 18 00280 Helsinki 020 719 211			

Liite 4. Paalutuspöytäkirja, paalukohtainen osa

SKANSKA INFRA OY				Paalun numero:		
Materiaali ja lujuusluokka:		Mitat:	Asennuspituus:		Asennuspäivä:	
Paalutustyyppi:	Kätkityyppi:	Paalutustyyppi:				
SUAJINTI:	Suunniteltu	Toteutunut		Ero		
	X:	X:		ΔX:		
	Y:	Y:		ΔY:		
Paalun kaltevuus:						
Suunta mittalinjan suhteen:						
Käytetty mittalinja:						
Paalun yläpään taso:						
Paalun kärjen taso:						
Paalun pituus:						
UPOTUS:		Työskentelytaso:	Paalutuskoneenkäyttäjä:		Kone:	
Jätkä ja jätkäleen paino:		Kunto:	Iskusuojan materiaali:	Iskusuojan kunto:	Lkm:	
Klo:	Paalun pituus, m	Pudotuskorkeus, m	Kärjen taso, m	Loppulyönnit		Huomautukset, keskytykset, katkeamiset, apupaalun käyttö yms.
				s10, mm	Jousto, mm	
KOEKUORMITUS:		Koeormituksen tekijä:				
Päivämäärä:	Menetelmä	Raportti Nro.		Tulos		
Paikka:		Pvm:	Paalutustyönjohtajan allekirjoitus:			
_____		_____	_____			