



TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

Rakennustekniikka
Ympäristörakentaminen

INSINÖÖRITYÖ

SMP-PAALU

Työn tekijä: Katariina Kärnä
Työn valvoja: Simo Hoikkala
Työn ohjaaja: Tarmo Tarkkio

Työ hyväksytty: __. __. 2006

Simo Hoikkala
lehtori

ALKUSANAT

Insinööriytyö on tehty Helsingin ammattikorkeakoulu Stadialle tekniikan ja liikenteen rakennustekniikan osastolle. Insinööriytyön tilaajana toimi Skanska Tekra Oy ja työn aiheena oli SMP-paalu eli Skanska Mini Pile. Tapausesimerkin insinööriytyöhön antoi Skanska Tekra Oy.

Insinööriytyöni valvonnasta kiitän DI Simo Hoikkalaa, Tuomo Suorsaa ja Sonja Holappaa sekä Skanska Tekra Oy:n projektipäällikkö Tarmo Tarkkiota ja vastaava mestari Esko Kautia.

Lopuksi haluan kiittää myös kaikkia teitä, ketkä olette panoksellanne auttaneet minua työn valmistumisessa.

Hyvinkäällä 10. huhtikuuta 2006

Katariina Kärnä



TEKNIIKAN JA LIIKENTEEEN TOIMIALA

INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Katariina Kärnä	
Työn nimi: SMP-paalu	
Päivämäärä: 10.4.2006	Sivumäärä: 43+14
Koulutusohjelma: Rakennustekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Ympäristörakentaminen
Työn valvoja: Simo Hoikkala Työn ohjaaja: Tarmo Tarkkio	
<p>Tämä insinööriötyö on suomenkielinen työ Skanska Mini Pilestä ja laadittiin Skanska Tekra Oy:n toimeksiannosta. Skanska Tekra Oy oli tuomassa Suomeen uutta paalutusmenetelmää, eikä tämän pohjaksi ollut olemassa yhtenäistä koottua suomenkielistä teosta paalutusmenetelmästä. Tästä syystä yhtenäisen selvityksen laatiminen taustatiedoksi osoittautui tarpeelliseksi.</p> <p>Työn tarkoituksena oli koota tietoa Skanska Mini Pilesta sekä selvittää sen etuja ja haittoja muihin paalutusmenetelmiin nähden. Työssä selvitettiin lähinnä puupaaluperustusten saaneerausessa käytettäviä paalutusmenetelmiä. Esimerkkikohteen avulla verrattiin Skanska Mini Pilea muihin paalutusmenetelmiin.</p> <p>Työn avulla pyrittiin selvittämään, paalutusmenetelmän etuja ja haittoja sekä kirjoittamaan ensimmäinen suomenkielinen selvitys paalutusmenetelmästä. Tulevaisuudessa Skanska Mini Pilen toivotaan olevan varteenotettava paalutusmenetelmä Suomessa ja että sillä pystyttäisiin saamaan lisää uusia paalutuskohteita.</p> <p>Tämä työ kokonaisuudessaan toimii pohjana Skanska Mini Pilen tunnettavuuden tekijänä Suomessa. Selvityksen toivotaan auttavan paalutusmenetelmän tunnettavuuden edistäjänä Suomessa ja näin ollen edesauttaen uusien kohteiden saamisessa.</p>	
Avainsanat: pienpaalu, teräspaalu, paalutus, paaluperustusten korjaus	



HELSINKI POLYTECHNIC / TECHNOLOGY

ABSTRACT

Author: Katariina Kärnä	
Title: SMP Pile	
Date: 10 April 2006	Number of pages: 43+14
Department: Civil Engineering	Study Programme: Environmental Engineering
Instructor: Simo Hoikkala, Principal Lecturer	
Supervisor: Tarmo Tarkkio, M.Sc., Skanska Tekra Ltd.	
<p>This study was carried out for Skanska Tekra Oy, Helsinki, Finland. It is a Finnish version of the Skanska Mini Pile, which is about a new piling method introduced to the Finnish market by Skanska Tekra Oy in the autumn of 2004. This study which provides basic information about this piling method was necessary because there was no Finnish documentation about it.</p> <p>The purpose of this study was to examine the benefits and disadvantages of this particular piling method compared to the other methods. This study concentrated mostly on piling types where wooden piles are being renovated. The comparison to other methods was carried out as a pilot project.</p> <p>The Skanska Mini Pile now exists in Finnish and the idea is to turn the method it describes into a competitive piling method in the future by increasing the awareness of this method in the construction field through this document.</p>	
Key Words: Mini Pile, Steel pile, piling, Renovation of pile foundation	

SISÄLLYS

ALKUSANAT

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1 JOHDANTO	1
2 PERUSTUSTEN VAURIOITUMISEN SYYT	2
2.1 Vaurioiden ilmeneminen	2
2.2 Pohjavedenpinnan aleneminen	2
2.2.1 Yleistä pohjavedestä	2
2.2.2 Pohjavedenpinnan alenemisen seuraukset	3
2.3 Routa	4
2.4 Tärinä	5
2.5 Rakennustoiminta lähiympäristössä	5
2.6 Rakennemuutokset	6
3 PERUSTUSTEN KORJAUS- JA VAHVISTAMISMENETELMIÄ	7
4 SKANSKA MINI PILE JA MUUT PAALUT	9
4.1 Puupaalujen korjauksessa käytettäviä paalutustyyppejä	9
4.1.1 Yleistä	9
4.1.2 Porapaalu	9
4.1.3 Lyöntipaalutus	12
4.1.4 Puristuspaalu	13
4.1.5 Suihkuinjektointi	14
4.2 Skanska Mini Pile	15
5 PAALUPERUSTUKSEN SUUNNITTELU	21
5.1 Yleistä paaluperustusten suunnittelusta	21
5.2 Paalun kantavuus sekä kuormitukset	21
5.3 Geotekninen kantavuus	22
5.4 Loppulyönnit	23
6 SKANSKA MINI PILE, PAALUTUS	24
6.1 Paalutusprosessi	24
6.2 Paalutuskalusto	26
6.3 Laadunvalvonta	28
6.4 Paalujen koestus	29
6.5 Laskelmat	31

7 ESIMERKKIKOHDE	34
7.1 Yleistä esimerkkikohteesta	34
7.2 Koekuormitukset ja mittaukset.....	38
7.2.1 Koekuormitukset ja ehjyysmittaukset yleistä.....	38
7.2.2 Staattinen koekuormitus	38
7.2.3 Dynaaminen koekuormitus	40
7.2.4 Ehjyysmittaukset.....	40
7.3 Mittaustulokset	40
7.3.1 Staattisten koekuormitusten tulokset	40
7.3.2 Dynaamisten koekuormitusten tulokset	41
7.3.3 Ehjyysmittausten tulokset	41
8 YHTEENVETO	42
VIITELUETTELO	43
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Insinööriyö SMP-paalusta eli Skanska Mini Pilesta laadittiin Skanska Tekra Oy:n toimeksiannosta. Skanska Tekra Oy oli tuomassa syksyllä 2004 uutta paalutusmenetelmää Suomeen, eikä tämän pohjaksi ollut olemassa yhtenäistä koottua suomenkielistä teosta paalutusmenetelmästä.

Insinööriyön tavoitteena on kuvata perustusten korjauksessa käytettäviä menetelmiä sekä verrata näihin menetelmiin Skanska Mini Pilea. Työssä keskitytään erityisesti puupaaluperustusten korjaukseen, millä menetelmillä puupaaluperustuksia korjataan.

Ensiksi selvitettiin yleisesti kirjallisuuslähteistä perustusten korjaukseen johtavia yleisiä syitä sekä perustusten korjauksissa käytettäviä menetelmiä. Kirjallisuuslähteiden avulla verrattiin puupaaluperustusten korjauksessa käytettäviä menetelmiä, selvitettiin näiden menetelmien hyötyjä ja haittoja.

Työssä vertaillaan puupaaluperustusten korjauksissa käytettäviä menetelmiä Skanska Mini Pileen. Sekä esitellään Skanska Mini Pilea tarkemmin esimerkkikohteen avulla. Vertailun lopputuloksena on Skanska Mini Pilen hyötyjä ja haittoja verrattuna muihin puupaaluperustusten korjausmenetelmiin.

2 PERUSTUSTEN VAURIOITUMISEN SYYT

2.1 Vaurioiden ilmeneminen

Rakennusten vauriot johtuvat useimmiten perustusten painumisesta. Rakennusten vaurioiden laatu, suuruus ja määrä riippuvat yleensä painumien suuruudesta, epätasaisesta painumisesta, nopeudesta sekä rakennusrungon rakenteesta. Julkisivuissa vauriot näkyvät halkeamina sekä rappauksen putoamisena. Myös ikkunoiden ja ovien avaaminen saattaa vaikeutua, ja putkijohtojen liittymäkohdat rakennuksiin saattavat katketa, koska epätasainen painuma kasvaa liian suureksi.

Rakennusten painumista voivat aiheuttaa seuraavat tekijät:

- pohjavedenpinnan aleneminen
- täytemaa
- routa
- tärinä, mm. liikenne
- rakennustoiminta lähiympäristössä
- rakennemuutokset. /9, s. 15–16./

2.2 Pohjavedenpinnan aleneminen

2.2.1 Yleistä pohjavedestä

Pohja- sekä orsivedenpinta saattaa vaihdella voimakkaastikin vuoden aikana sademäärien mukaan. Pohja- ja orsivedenpinnan aleneminen jostakin syystä aiheuttaa puupaalujen lahoamista sekä maakerrosten painumista. Nämä vahingoittavat puupaaluille tai löyhille maakerroksille perustettuja rakennuksia.

Pohjavedenpinnan alenemista aiheuttaa maankuoren kohoaminen. Maankuoren kohoaminen vaikuttaa erityisesti alemman pohjavedenpinnan korkeuteen. Myös taajamarakentaminen vaikuttaa veden kiertokulkuun. Päälystetyt kadut ja sadevesiviemärointi estävät sadannan normaalin imeytymisen maaperään.

Orsivedenpinnan alenemista aiheuttavat maanalaisten putkikanavien soraistus, joka toimii salaojan tavoin. Tosin vanhat vuotavat viemäriputket voivat

paikallisesti nostaa orsivedenpintaa mutta viemäriveden laatu vaikuttaa haitallisesti mm. puuperustuksiin. Kaukolämpöputkien lämpövuodot ovat joissakin tapauksissa kuivattaneet savea ja aiheuttaneet paikallisesti orsivedenpinnan alenemista.

Pohjavedenpinnan aleneminen otettiin huomioon vasta 1970-luvulla. Kuitenkin syvienkaivantojen murtumien estämiseksi edelleen alemmaa orsivedenpintaa usein rakennusaikana tilapäisesti alennetaan. Nämä vaikutukset saattavat jäädä pysyviksi. Esimerkiksi Helsingissä 30 vuoden aikana on ollut syvärakennuskohteita, joilla on ollut merkittävä vaikutus pohjavesitilanteeseen ja vaikutukset ovat ulottuneet jopa 500–800 metrin etäisyydelle kaivannosta. /9, s. 17–20./

2.2.2 Pohjavedenpinnan alenemisen seuraukset

Pohjavedenpinnan aleneminen aiheuttaa maapohjan kokoonpuristumista. Pehmeillä savialueilla alemman pohjavedenpinnan muutos aiheuttaa huokosvedenpaineen muutoksen ja tämä aiheuttaa savikerroksen kokoonpuristumisen. Esimerkiksi pohjavedenpinnan kahden metrin aleneminen saattaa aiheuttaa 10 metrin savikerroksessa noin 30 cm painuman. Painuminen tosin saattaa kestää useita vuosikymmeniä. Maan kokoonpuristuminen paalutetun rakennuksen ympärillä aiheuttaa paaluille lisäkuormitusta negatiivisen vaippahankauksen johdosta. Negatiivisen vaippahankauksen syntymiseen riittää usein pieni suhteellinen muodonmuutos. Tästä aiheutuvat vauriot vanhoille rakennuksille ovat kuitenkin hyvin harvinaisia. Tavallisesti paalut vaurioituvat silloin, jos pohjaveden alenemisen takia on painuneita piha-alueita korotettu. Lisääntynyt painuminen on työntänyt maamassoja paaluja vastaan ja tällöin ne ovat murtuneet.

Suotuisissa oloissa puuperustukset säilyvät vedenpinnan alapuolella erittäin kauan. Rakennusvaiheessa puuperustukset pyrittiin sijoittamaan noin 0,5 metriä alimman orsivedenpinnan alapuolelle. Nykyään ne ovat monessa paikassa jo vedenpinnan yläpuolella, joten se antaa lahoamiselle erittäin hyvät edellytykset. Lahoamisen voi aiheuttaa lahottajasienet, kuten katkojalahottajasienet sekä valko- ja ruskolahottajat.

Katkojarahottajasieniä voidaan pitää merkittävimpana puun hajottajina, niiden toiminta perustuu selluloosan ja polysakkaridien hajottamiseen entsyymien avulla. Lahoaminen pienentää ensisijaisesti puun taivutusvetolujuutta. Valko- ja ruskohajottajien toiminta perustuu selluloosan ja ligniinin hajottamiseen. Valkolahottajan hajottama puuaines on kiinteän sekä sitkeän tuntuista kun ruskohajottajan lahottaa puun pintaosaa muodostaen ruudullisen verkon. Tällöin lahoaminen puu menettää sekä puristus- että taivutusvetolujuutensa.

Aikaisemmin yleisenä käsityksenä pidettiin sitä, että puun lahoaminen hapettomassa tilassa on mahdotonta mutta se on tietoa virheellistä. Hapettomassa tilassa lahoaminen on vain hitaampaa kuin hapellisessa tilassa. Tutkimuksissa on havaittu, että paaluissa, jotka ovat todistettavasti olleet pohjaveden alla, on havaittu lahoamismerkkejä. Typpeä on pidetty lahoamista hidastavana tekijänä. Kuitenkin on todettu, että helposti liukenevat typpiyhdisteet siirtyvät kuivuvassa puussa ulkopintaa kohti, ja luovat edellytykset lahoamiselle.

Syy miksi osittain lahonneet paalut kuitenkin vielä kantavat rakennusta on se, että puupaalut ovat olleet reilusti ylimitoitettuja. Jatketuissa paaluissa varmuuskertoimet ovat todennäköisesti olleet pienemmät ja siksi perustusrakenne, jossa on jatkettuja puupaaluja, vaurioituu helpommin lahoamisen yhteydessä. /9, s. 21–25./

2.3 Routa

Routimisella tarkoitetaan ilmiötä, jossa maakerroksen jäätyessä sen tilavuus kasvaa. Routimista ilmenee kun:

- maalaji on routivaa
- maan lämpötila laskee alle 0 °C:n
- vesi pääsee kulkemaan jäätymisrintamaan
- routapainetta suurempaa vastapainetta ei ole maassa

Roudan aiheuttamat haitat ilmenevät lähinnä matalaan perustetuissa rakenteissa, routivilla mailla. Rakennusvaiheessa maan jäätyminen voi vahingoittaa myös syvälle perustettuja rakennuksia. Routiminen voi nostaa perustuksia, ja roudan sulaessa perustukset voivat painua ennalleen. Näin ei kuitenkaan aina tapahdu. Routa vaikuttaa kaikkiin perustusrakenteisiin. Paalu- ja

pilariperustukset kestävät roudan vaikutukset heikommin kuin jäykät perusmuurit. /9, s. 25–26./

2.4 Tärinä

Yleisimpiä tärinä lähteitä ovat liikenne, louhinta-, paalutus- sekä tiivistämissyöt. Tärinän aiheuttamat vauriot rakenteissa, voivat johtua rakenteen venymästä, repeämästä tai taipumasta. Maan tärinät käsitetään maanpinnan aaltoliikkeeksi, jonka aiheuttaa seisminen aaltojen eteneminen.

Liikennetärinän heilahdusnopeudet ovat yleensä pieniä. Kadunpinnan epätasaisuudet vaikuttavat tärinäaallon heilahdusnopeuteen. Esimerkiksi nupukivikadulla heilahdusnopeudet olivat yli 3-kertaiset asfaltoituun katuun verrattuna. Suomessa ei ole yleisesti määritetty jatkuvan tärinän heilahdusnopeuden raja-arvoa. Esimerkiksi Helsingin keskustassa mitatun liikennetärinän ei tulisi aiheuttaa suoranaisia vaurioita rakennuksille. On kuitenkin mahdollista, että jatkuva tärinä voi laukaista jännityksiä, joita esimerkiksi epätasainen painuminen on aiheuttanut.

Paalutustärinä on matalajaksoista aaltoliikettä liikennetärinän tavoin. Louhinta- ja paalutustärinä aiheuttavat heijastuneen tai taittuneen tärinäaallon, joka voi aiheuttaa rakennuksissa resonanssi-ilmiön. Louhintatyölle on asetettu räjäytystärinän ohjeelliset tärinäarvot, joiden ei tulisi aiheuttaa rakenteissa vaurioita. /9, s. 28–31./

2.5 Rakennustoiminta lähiympäristössä

Kaivannon teko vanhan rakennuksen viereen voi vaurioittaa perustuksia monella tavalla. Pohjaveden pumppauksen sekä louhinta- ja paalutustärinän lisäksi vaurioita voi aiheutua itse kaivutyöstä. Yleensä kaivantojen sortumiset vaurioittavat vakavasti ympäristön rakenteita. Kaivuvaiheessa kaivannon tukiseinät voivat pettää, ennen kuin riittävät ankkuroinnit on asennettu. Yleensä naapurirakennuksen perustusvauriot kaivutöiden yhteydessä johtuvat puutteellisista pohjatutkimuksista, suunnittelu- tai rakennusvirheistä.

Usein viereisen tontin paalutustyö on vaurioittanut olemassa olevia rakenteita. Tärinävaikutusten lisäksi maan sivusiirtyminen on haitallista. Kokeissa on todettu saven voimakasta sivusiirtymää, siirtynyt savimäärä on vastaa yleensä

sä paalun tilavuutta. Paalun lyönnin aikaiset siirtymät ovat yleensä suurempia kuin lopullinen pysyvä siirtymä. Naapurirakennuksen vaurioitumisriski onkin suurin juuri paalun lyönnin aikana.

Rakennuksia on perustettu usein täytemaalle. Epäsuotuisissa olosuhteissa täytemaiden siirtyminen aiheuttaa vaurioita rakennusten paaluperustuksissa. Paaluperustukset voivat menettää kallistuessaan ensin kantavuuttaan ja saattavat lopulta katketa kokonaan. Rakennusten siirtymät aiheutuvat epätasaisesta painumisesta. Epätasaisesti painunut rakennus saattaa aiheuttaa myös vaakasiirtymiä viereiselle rakennukselle. /9, s. 32–35./

2.6 Rakennemuutokset

Perusparannuksen yhteydessä usein syntyy tilanteita, jossa perustuksille tulevat kuormat muuttuvat, esimerkiksi lisäkerroksen rakentaminen tai kantavien rakenneosien muuttaminen. Näistä muutoksista johtuen lisäkuormat usein jakaantuvat epätasaisesti rakennuksen eri osille ja näin aiheuttavat painuvilla maapohjilla epätasaista painumista. Rakennemuutoksista johtuvat perustusvauriot ovatkin usein suunnittelu- ja rakennusvirheitä, kun asioita ei ole ajoissa huomioitu. /9, s. 35–36./

3 PERUSTUSTEN KORJAUS- JA VAHVISTAMISMENETELMIÄ

Perustusten korjauksessa rakennuksen perustuksia voidaan ulottaa syvemmälle. Tämä tulee kyseeseen kohteissa, joissa maaperän kantokykyä alkuperäisellä perustamistasolla epäillään, kun kuormitusta maapohjalla lisätään. Myös kohteissa, joissa kellarin lattiataso alennetaan perustusten alapuolelle tai rakennuksen viereen tehdään perustustasoa alemmaksi ulottuva kaivanto, tällöin käytetään perustusten syventämistä. Menetelmän käyttö edellyttää, kantavan maakerroksen oloa kohtuullisella syvyydellä. Tällöin kaivaminen suoritetaan vaiheittain siten, että paikallisia epätasaisia painumia ei synny, eikä maapohja löyhdy. /9, s. 52–72./

Puupaalut, jotka ovat orsivedenalenemisen takia lahonneet yläpäistään, voidaan katkaista ja korvata teräskiskolla. Ennen korjauksia on tehtävä huolellinen pohja- sekä orsiveden tarkkailu. Lisäksi on selvitettävä lähiympäristön rakennustoimenpiteet, jotka voivat vaikuttaa orsiveden pinnantasoon. Paalujen katkaisutason olisi oltava vähintään 0,5 m matalimman orsivedenpinnan alapuolella. Paalut katkaistaan yksitellen sekä esijännitetään, jonka jälkeen teräskisko ympäröidään betonilla. Lopuksi paalujen välit täytetään savella. Haittana van on menetelmän tilapäinen luonne. Monesti perustuksia on jouduttu vahvistamaan uudestaan, kun orsivesi on laskenut uudestaan.

/9, s. 52–72./

Perustuksia voidaan vahvistaa käyttäen erilaisia paalutusmenetelmiä vaurioista ja vanhasta perustamista sekä perustamisolosuhteista riippuen. Paalutusmenetelmä valitaan aina kulloiseenkin tilanteeseen sopivaksi.

/9, s. 52–72./

Perustuksia voidaan myös routasuojata, koska routanousu voi ajan myötä vaurioittaa routivan maan varaan perustettuja rakennuksia. Vaurioita voidaan pienentää sekä estää routasuojalla. Routasuojaukseen vaikuttavat mm.:

- maalaji
- ilmasto
- perustamistapa, perustuksen rakenne
- perustamissyvyys
- routasuojauksen rakenne.

Eristyksen paksuus määräytyy lämmön vastuksesta sekä eristeen lämmönjohtavuudesta. /9, s. 52–72./

Rakennuspohjan kuivatuksella voidaan myös pienentää routimista. Kuivatus-tason määrittämisessä on otettava huomioon ympäröivien rakennusten mahdolliset puuperustusten yläpinnantasot. Parhaiten rakennuspohjan kuivatus onnistuu salaojituksen avulla. /9, s. 52–72./

Rakennusten peruskorjaaminen on yleensä huomattavan kallis toimenpide ja siksi päätös peruskorjauksen tekemisestä on yleensä vaikea. päätös peruskorjauksesta on aina tapauskohtainen ja siihen vaikuttavat ensisijaisesti korjauksen tekniset edellytykset. Perustusten korjaamiseen ja vahvistamiseen olisi ryhdyttävä mahdollisimman varhaisessa vaiheessa ennen kuin perustusten painuminen aiheuttaa merkittäviä vaurioita ylärakenteiden kantaviin rakenteisiin. Ennakoivilla toimenpiteillä, esimerkiksi puuperustusten kuntotutkimuksilla, pohjavedenpinnan tarkkailulla ja painumaseurannalla, perustusten vahvistamistarve voidaan määrittää. /9, s. 82–83./

4 SKANSKA MINI PILE JA MUUT PAALUT

4.1 Puupaalujen korjauksessa käytettäviä paalutustyyppejä

4.1.1 Yleistä

Suurin osa puupaalujenperustusten korjauksista suoritetaan vielä nykyään teräspaalutuksena. Teräspaalutus voidaan suorittaa usealla tavalla: lyömällä, poraamalla, puristamalla, täryttämällä tai ruuvaamalla. Vaihtoehtoisesti puupaaluperustusten vahvistaminen voidaan suorittaa myös suihkuvahvistamisena eli suihkuinjektointina. Seuraavassa käsitellään näistä yleisimmin Suomessa käytettyjä menetelmiä eli porapaalua, lyöntipaalua, puristuspaalua sekä suihkuinjektointia. /3./

4.1.2 Porapaalu

Porapaaluja käytetään jatkuvasti perustusten vahvistamisen yhteydessä. Porapaalun etuna on, että se onnistuu, vaikka paalutusalueella olisikin epämääräisiä vanhoja perustusratkaisuja. Perustuksia vahvistettaessa porapaalu tunkeutuu helposti kivienkin läpi ja jopa vanhojen puupaalujen läpi käytettäessä erikoisteriä. /1, s.77/ /2, s. 150./

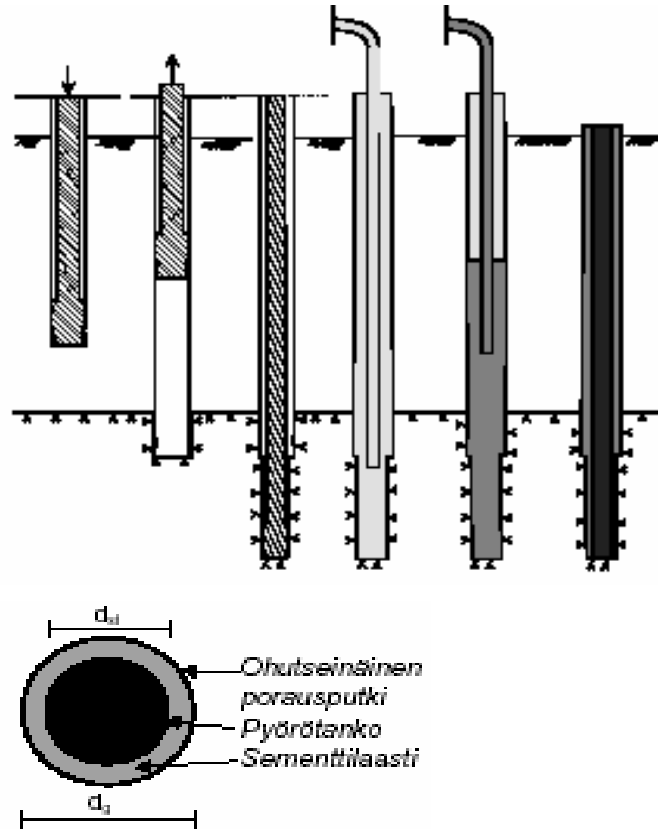
Porapaaluja ovat

- sydänteräspaalu
- porattava teräspuutkipaalu, jossa porausputki jää rakenteen osaksi
- porattava teräspuutkipaalu, jossa porausputki nostetaan ylös
- läpi-injektoitava porapaalu. /1, s. 75./

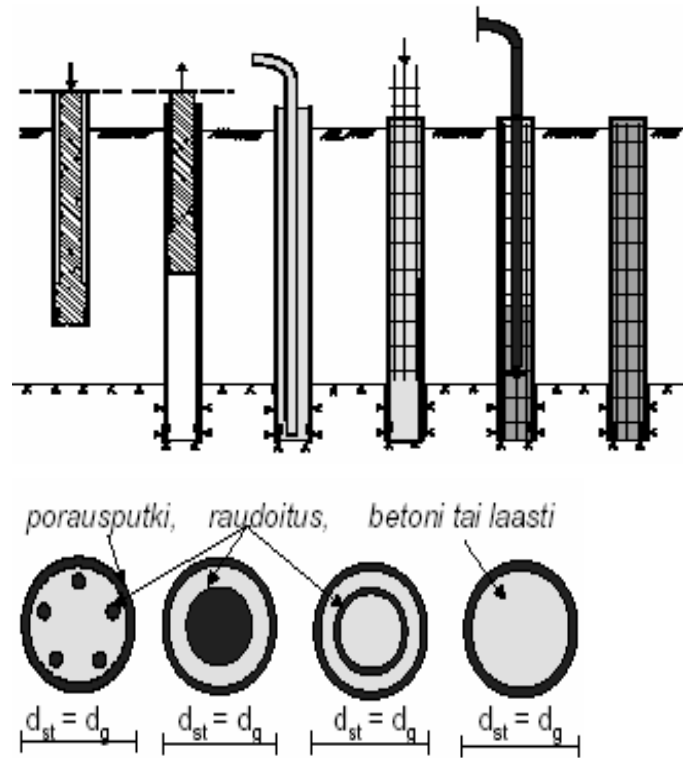
Porapaalu tehdään poraamalla porauskalustolla suojaputkea käyttäen reikä, johon paalu lasketaan, käyttäen jatkoksina täyshitsiä tai hitsattua holkkijatkosta. /2, s. 150./

Porapaaluilla itsellään voi jo olla jäykkyys, joka sallii niiden väliaikaisen käytön työnaikaisina pilareina. Monet porapaalutuskoneet mahtuvat toimimaan matalissakin tiloissa./1, s. 77./

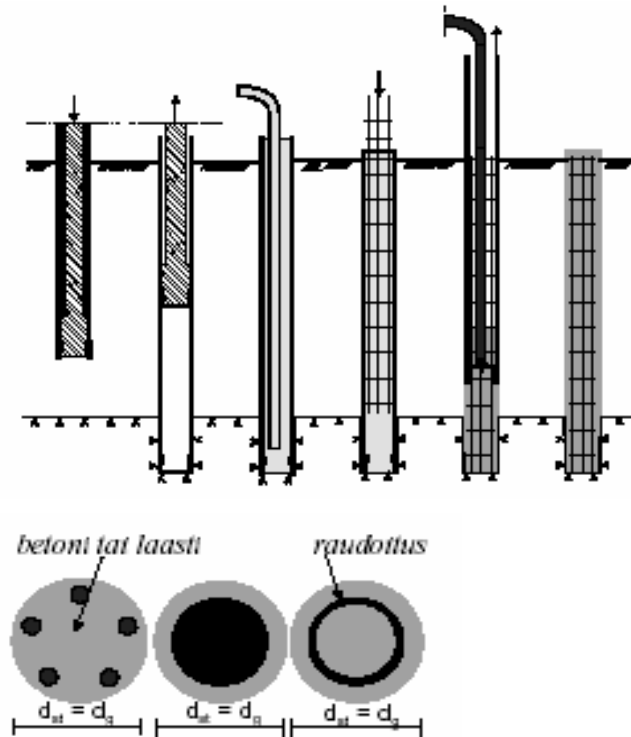
Porapaalutekniikkaa on jatkuvasti kehitetty, erityisesti on parannettu kruunuja, poraustekniikkaa ja paalujen jatkamista hitsaamalla. Porapaalu on kustannuksiltaan kilpailukykyinen varsinkin suurilla kuormilla. Haittoina voidaan pitää melua sekä roiskuvaa kuravettä. /3./



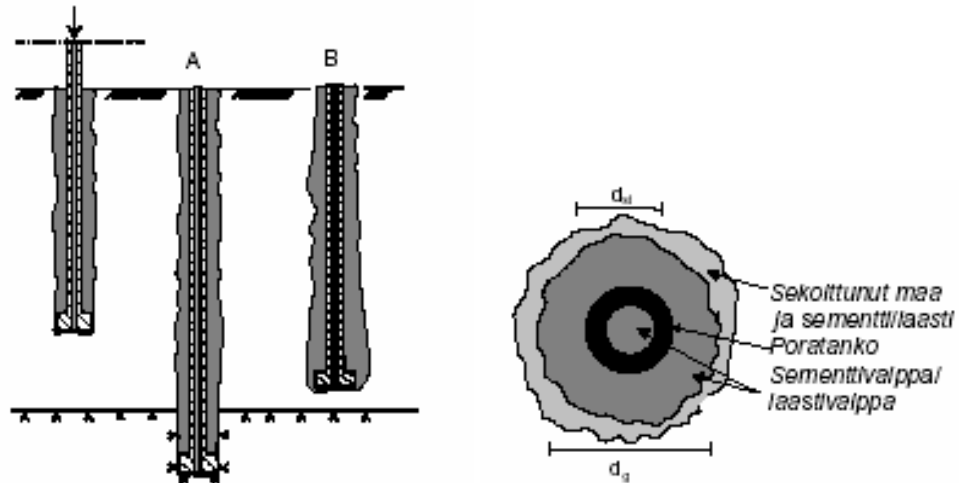
Kuva 1. Sydänteräspäalun työvaiheet sekä paalun poikkileikkaus. /6./



Kuva 2. Porattavan teräsputkipaalun työvaiheet, jossa porausputki jää rakenteen osaksi sekä paalun raudoitusvaihtoehtoja. /6./



Kuva 3. Porattavan teräsputkipaalun työvaiheet, jossa porausputki nostetaan ylös sekä paalun raudoitusvaihtoehtoja. /6./



Kuva 4. Läpi-injektoitavan porapaalun työvaiheet. Kallioon tukeutuva paalu (A) ja maakerrokseen tukeutuva paalu (B) sekä läpi-injektoitavan paalun poikkileikkaus. /6./

4.1.3 Lyöntipaalutus

Teräspaalu lyömällä on ollut pitkään yleisin paalutustapa, koska se on halpa menetelmä ja paaluja on ollut helppo jatkaa. Teräsputkipaalu lyödään joko pienellä järkäleellä tai tavallisimmin kevyellä paineilmavasarella pehmeikön läpi. Paalut on varustettu kiinni kiilautuvilla muhvi-jatkoksilla.

/2, s. 145–147./ /3./

Haittoina voidaan pitää tärinää ja melua, jonka paalutustapa aiheuttaa. Lisäksi kalustoa on vaikea kuljettaa ahtaissa tiloissa. Vanhoihin puupaaluihin tai kiviin törmätessään lyötävä paalu voi taipua, jolloin se lisäksi kasvattaa paaluhukkaa. Huonokuntoiset rakennukset voivat vaurioitua lyöntipaalutuksen seurauksena lisää. Lyöntipaalujen kantavuus on lisäksi suhteellisen alhainen. Lyöntipaalutus aiheuttaa saven voimakasta sivusiirtymää, syrjäytymistä, siirtynyt savimäärä on vastaa yleensä paalun tilavuutta. Paalun lyöntin aikaiset siirtymät ovat yleensä suurempia kuin lopullinen pysyvä siirtymä. Siirtymät voivat aiheuttaa viereisissä rakennuksissa siirtymiä tai painumia.

/3./

4.1.4 Puristuspaalu

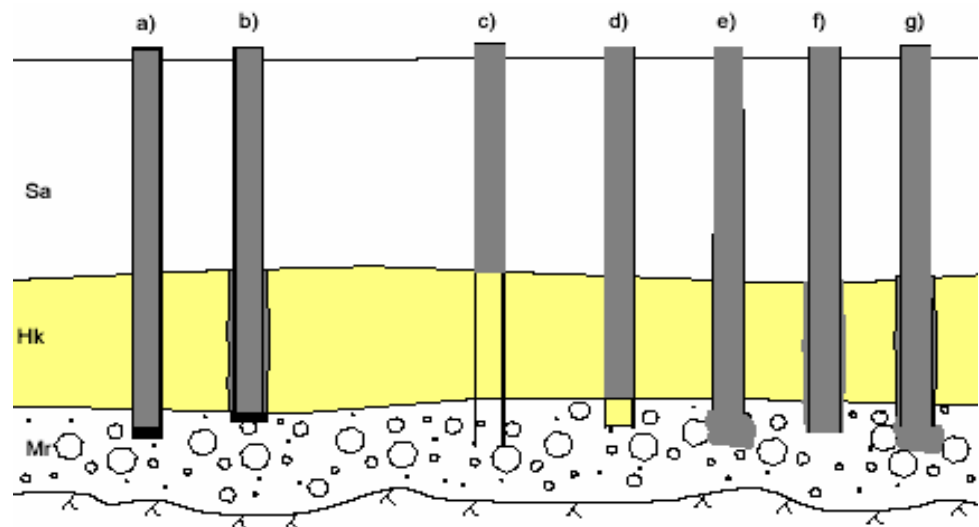
Puristuspaalutusta voidaan käyttää ahtaissa ja matalissa tiloissa, joihin ei muulla paalutuskalustolla päästä. Vaikeimman osuuden puristuspaalutusta käytettäessä muodostaa usein työskentelytilan kaivaminen perustusten alle tai sisään. /2, s. 143–145./

Puristuspaalun rakenne on kolmiosainen ja paalu koostuu kärkipaalusta, varsielementistä ja paaluhatusta. Varsinainen paalutustyö tapahtuu puristamalla hydraulisesti paaluelementtejä maahan käyttäen rakenteen omaa painoa vastapainona. Kärkielementin saavutettua kantavan kerroksen, asennetaan paaluhattu ja suoritetaan loppupuristus, joka samalla on pienimuotoinen koekuormitus. /2, s. 145./

Puristuspaalutekniikka on värinätöntä ja hiljaista ja näin ollen sopii myös huonokuntoisille rakennuksille. Vanhaan rakenteeseen reikä tehdään timanttikairalla, jonka jälkeen paalu puristetaan paikalleen. Lisäksi paalun jatkaminen on helppoa. Tunkkaustekniikka on kehittynyt jatkuvasti lisää ja on nykyään jo aika nopeaa ja lisäksi kalustoa on helppo liikutella paikasta toiseen. /3./

Puristuspaalun ongelma on sen vaatima vastapainorakenne. Ja pienten rakennusten kanssa tätä tekniikkaa ei voidakaan käyttää, sillä asennus edellyttää ylikuormitusta, jota ei keveissä rakennuksissa ole. Puristuspaalu on myös arka dynaamiselle kuormitukselle. /3./

Puristuspaalu on suljettuna maata syrjäyttävä paalu ja syrjäytyvä savimäärä vastaavat yleensä paalun tilavuutta. Maan syrjäytyminen voi aiheuttaa viereisissä rakennuksissa siirtymiä tai painumia. Avoimena puristuspaalu on maata syrjäyttämätön paalu, mikäli tulppaantumista ei tapahdu. Avointa paalua käytetään yleensä vain kitkapaaluna. /7./



Kuva 5. Puristuspaaluvaihtoehdot a) suljettu paalu, b) vaippainjektoitu suljettu paalu, c) avoin paalu, d) tulppaantunut avoin paalu, e) kärki-injektoitu avoin paalu, f) vaippainjektoitu avoin paalu, g) kärki- ja vaippa-injektoitu avoin paalu. /7./

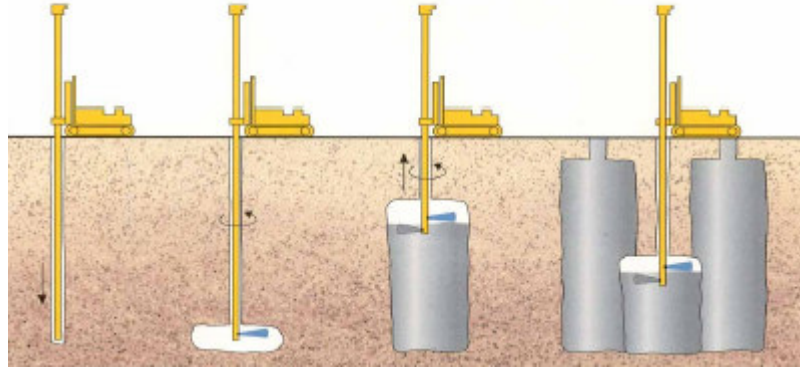
4.1.5 Suihkuinjektointi

Suihkuinjektointia käytetään pääasiassa lujittamaan löyhää maata ja tiivistämään vettä läpäiseviä maita. Tämän takia sitä käytetään myös vanhojen rakennusten saneerauksissa ja perustusten vahvistamisessa. /1, s. 79./

Suihkuinjektoinnissa maahan porataan erikoisporatanko aina haluttuun syvyyteen saakka. Tangon kärkeen sijoitettujen korkeapainesuuttimien avulla voidaan pieniläpimittaisella, korkeapaineisella suihkulla leikata ja osittain syrjäyttää maata, johon suihku on suunnattu ja sementtisuspensio sekoittuu. Pyörittämällä ja poratankoa hitaasti nostamalla saadaan maahan syntymään pyöreä maabetonipilari. Voidaan menetellä myös niin, että suihkutetaan erikseen vesisuihkua, jota ympäröidään ilmasuihkulla ja sen jäljessä suihkutaan erikseen sementtisuspensio. Heti valmistuttuaan paalu on vailla lujuutta, mutta kovetettuaan matalalujuuksista betonia. /1, s. 78–79./

Suihkuinjektointia voidaan käyttää vaihtoehtona teräspaaluille. Sitä voidaan käyttää paalutukseen kohteissa, joissa puupaalut ovat lahonneet eikä savi-kerros ole 15 metriä paksumpi. Suihkuinjektoinnin etuina on, että siitä ei aiheudu melua eikä tärinää sekä tarvittava kalusto mahtuu pieniinkin tiloihin. Suihkuinjektoinnissa paalu tehdään suoraan kantavan anturan alle, eikä eril-

lisiä kuormansiirtorakenteita tarvita. Ympäristönkin painumat ovat näin ollen vähäisiä. /3./



Kuva 6. Suihkuinjektioinnin työvaiheet. /8./

4.2 Skanska Mini Pile

Skanska Mini Pile on Alankomaissa yleisesti käytetty paalutusmuoto, jossa sitä on käytetty jo monta vuosikymmentä. Alankomaissa paalua käytetään lähinnä kitkapaaluna, mikä johtuu erilaisista maalajeista, kuin meillä Suomessa. Suomessa Skanska Mini Pileä käytetään tukipaaluna, joka lyödään kallioon tai tiiviiseen pohjakerrokseen, kuten moreeniin asti.

Skanska Mini Pile on rakenteeltaan teräskuorinen teräsbetonipaalu. Paalun teräskuori on teräsputki, joka toimii pääasiallisesti asennusmuottina mutta jää paalun pysyväksi rakenteeksi. Skanska Mini Pilen upotus tapahtuu pienemmällä paalutuskalustolla kuin esimerkiksi teräsbetonipaalun upotus. Tämä johtuu siitä, että Skanska Mini Pilen upotusvaiheessa lyödään suoraan paalun kärkeen, eikä paalun yläpäähän kuten on totuttu lyöntipaalutuksen tapahtuvan. Vesitiiveyden säilyttämiseksi paalun jatkaminen tapahtuu hitsaamalla. Paalut raudoitetaan ainoastaan yläosastaan ja paalun suoruu määrää raudoituspituuden. Paalun valu suoritetaan kuivavaluna ja betonina käytetään K40 betonia. Korroosiovähennyksen jälkeen paalu mitoitetaan liittorakenteena.

Skanska Mini Pilen etuina voidaan pitää, että paalutustyössä tarvittava paalutuskalusto mahtuu pieneen tilaan, kuten asuinrakennusten kellaritiloihin. Paalun teräskuori on teräsputki, jota jatketaan työmaalla hitsaamalla eli paa-

lun kuoreen käytettävät teräsputket tulevat määrämittäisinä paalutuksen osakomponentteina työmaalle.

Paalun upotus tapahtuu vaijeritoimisella 500 kg:n pudotusjärkäleellä, jolla isketään suoraan paalun kärkeen, toisin kuin normaalisti esimerkiksi lyöntipaalutuksessa, jossa lyönti tapahtuu paalun yläpäähän. Iskettäessä suoraan paalun kärkeen ei tarvita niin paljoa tilaa paalutuskoneen yläpuolella, kuin normaalisti paalutustyössä tarvitaan.



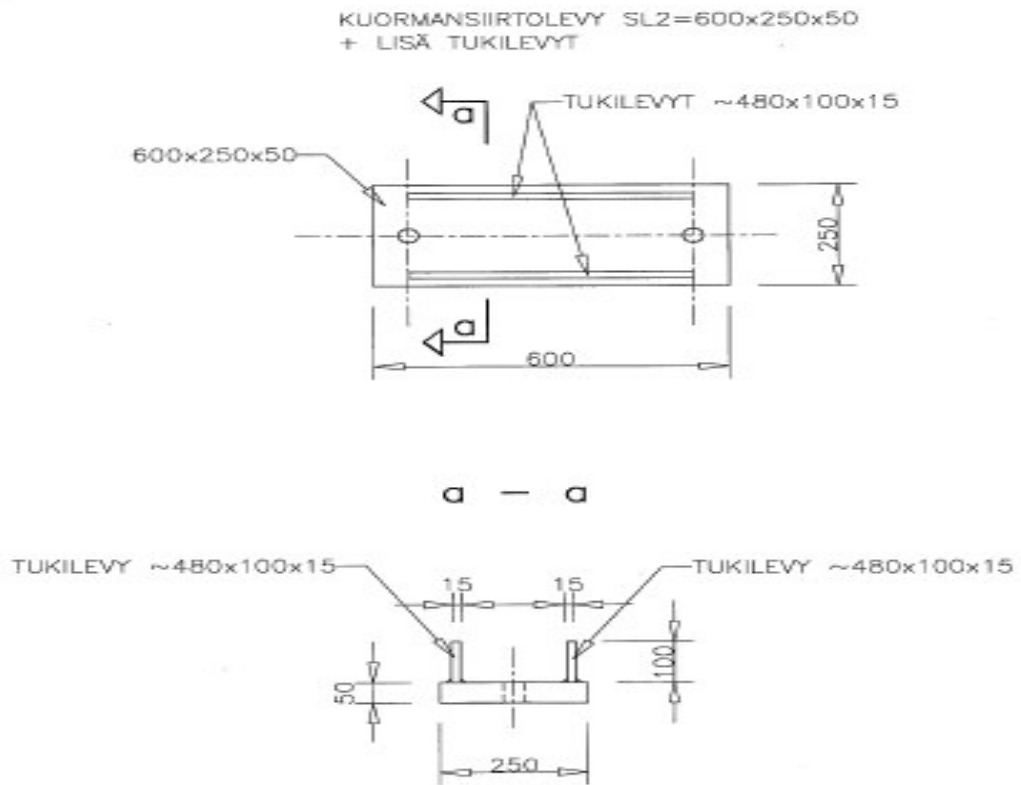
Kuva 7. Paalutuskoneen 500 kg pudotusjärkäle teräsputken sisällä. /15/

Itse paalutustyö on huomattavasti nopeampaa kuin esimerkiksi samanpituisen puristuspaalun lyöntityö. Esimerkkinä voidaan mainita, että Skanska Mini Pilen lyönti moreeniin noin 26 metriin asti kesti noin yhden tunnin kuin sama työ puristuspaalulla kesti noin kahdeksan tuntia.

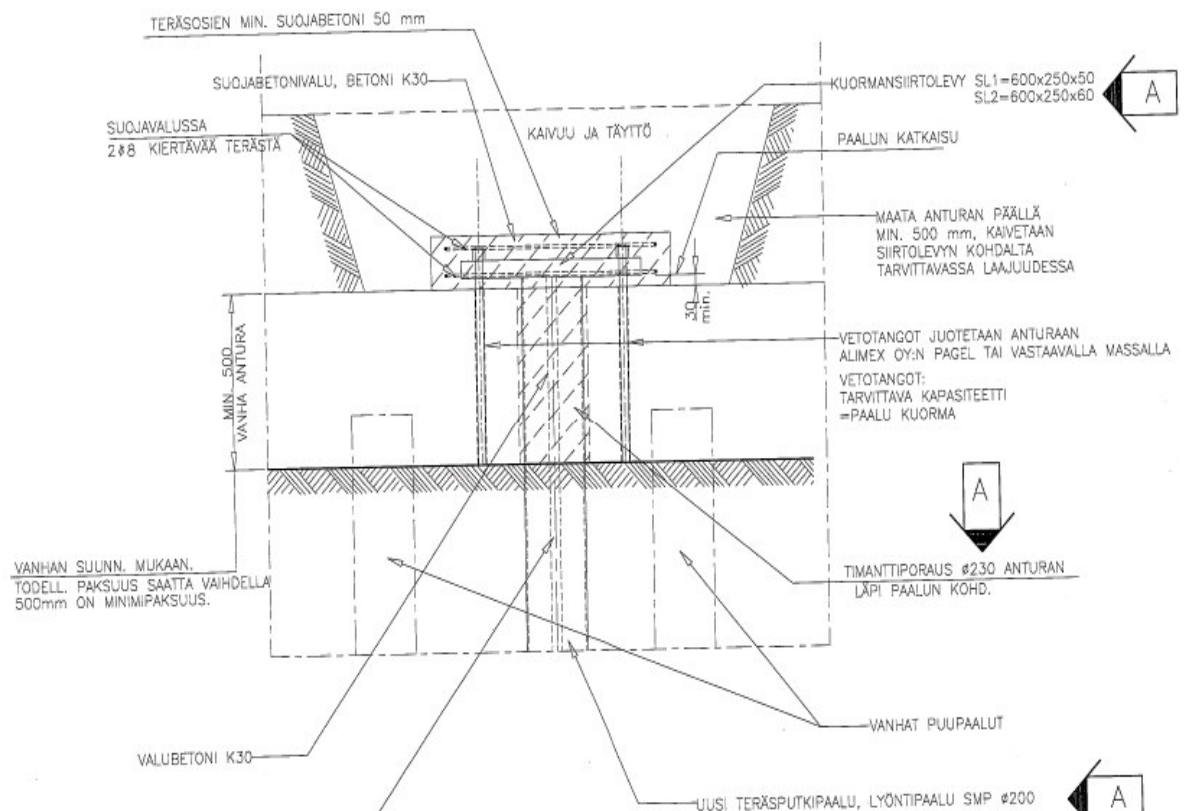
Paalutyöstä aiheutuvat haitat ympäristölle ovat vähäisempiä kuin muissa paalutustavoissa. Paalutuksesta aiheutuva melu on huomattavasti pienempää kuin paalutuksessa yleensä. Paalutustyöstä aiheutuvat tärinät ympäröivään maaperään ovat paljon pienempiä kuin esimerkiksi lyöntipaalutuksessa. Liikenne aiheuttaakin enemmän tärinää ympäröivään maaperään kuin mitä paalutustyö aiheuttaa. Paalutustyö ei aiheuta ympäröivien maamassojen nousuja vaan maamassat pysyvät hyvin paikoillaan.

Lisäksi paalutustyössä ei tarvitse suorittaa niin paljon laadunvalvontaa kuin puristuspaalutuksessa, myös tämä nopeuttaa työtä. Laadunvalvontaa suoritetaan mutta se on helpompaa.

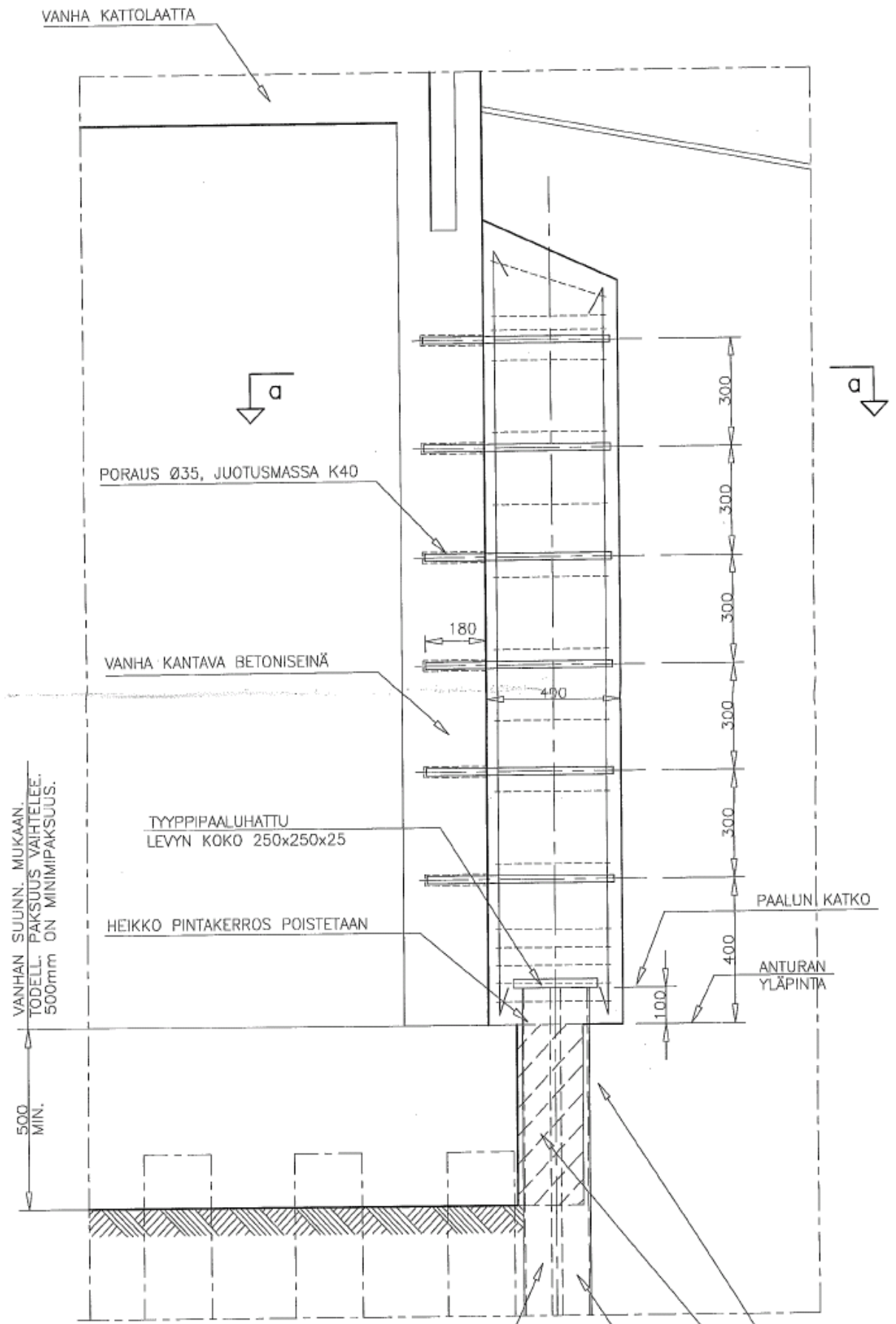
Skanska Mini Pilea voidaan käyttää myös korjauskohteissa, joissa rakennuksen antura on kapea tai sitä ei ole ollenkaan. Tällöin kuormansiirtorakenteet voidaan tehdä kuormasiirtolevyillä. Kuormansiirtorakenteet ovat myös edullisempia kuin esimerkiksi puristuspaalutuksen yhteydessä. /16./



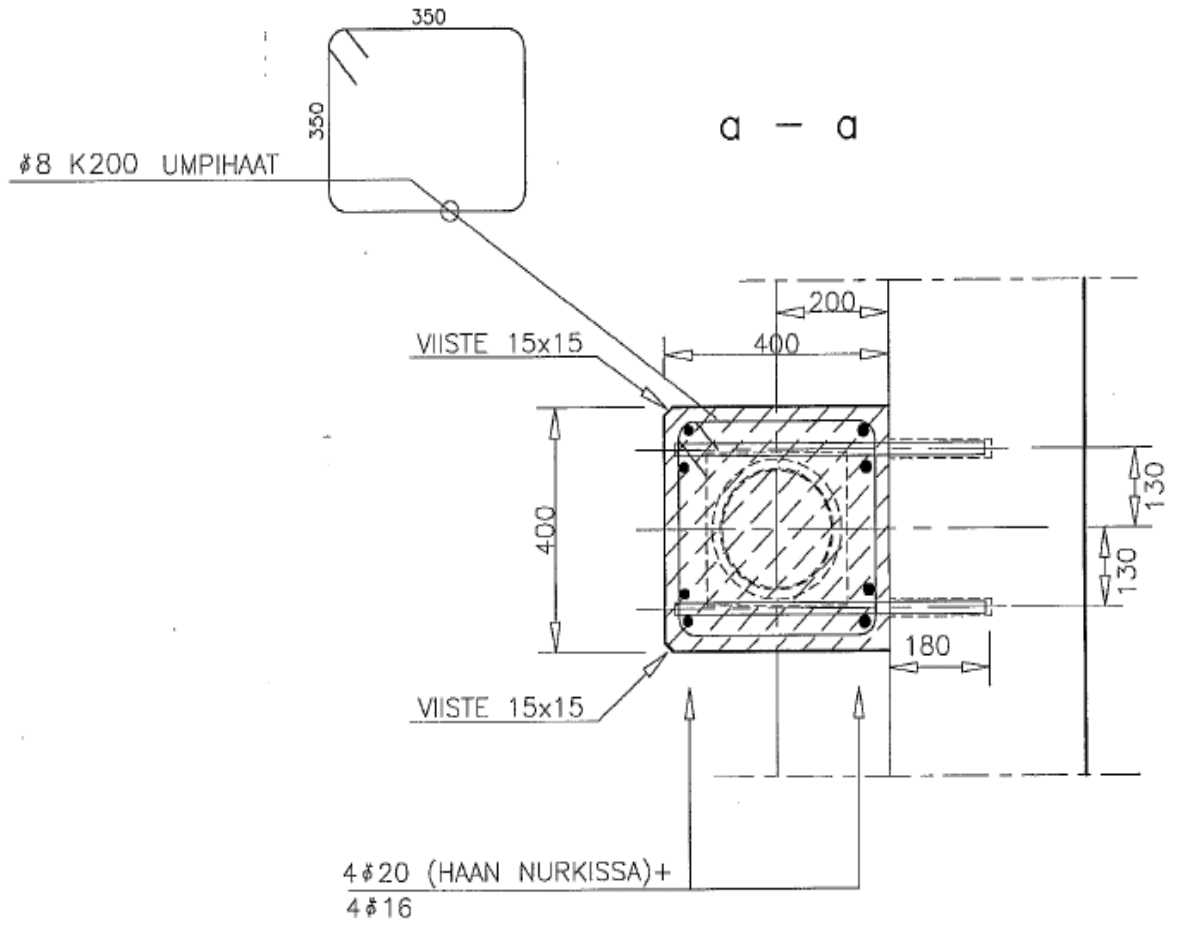
Kuva 8. Kuormansiirtolevy. /13./



Kuva 9. Kuormansiirtolevyn asennus anturan päälle. /13./



Kuva 10. Skanska Mini Pilen kuormansiirtorakenne vanhaan väliseinään. /13./



Kuva 11. Leikkaus a-a kuormansiirtorakenteesta. /13./

5 PAALUPERUSTUKSEN SUUNNITTELU

5.1 Yleistä paaluperustusten suunnittelusta

Paaluperustus on suunniteltava siten, että se kestää sekä rakenteesta siirtyvät kuormat, että maan aiheuttamat kuormitukset. Lisäksi on otettava huomioon perustusten mahdollinen siirtyminen, jonka on pysyttävä rakenteiden siirtämissä rajoissa.

Paaluperustuksen suunnittelu edellyttää paalumateriaalin lujuuden, maa- ja kalliopohjan kantokyvyn, paalujen kantavuuden sekä hyväksyttävien paalutoleranssien selvittämistä. Sopiva paalutustyyppi valitaan ylärakenteiden vaatimusten sekä pohjasuhteiden mukaan.

Paalutustyö tehdään hyväksytyjen paalupiirustusten ja työselitysten mukaan. Käytettäessä erikoispaaluja on jokaisessa tapauksessa paalujen rakenteesta ja laatuvaatimuksista sekä mitoituksessa päätettävä paalujen kantavuudesta erikseen. /11, s. 51–52/ /10, s. 38./

5.2 Paalun kantavuus sekä kuormitukset

Paalun kantavuus määräytyy joko rakenteellisen tai geoteknisen kantavuuden mukaan. Näistä geotekninen kantavuus on usein pienempi, kun kantavuus esitetään keskeisenä puristusjännityksenä. Teräspaaluilla myös nurjahdusvaara on aina tarkasteltava ja teräspaalujen suoruteen on aina kiinnitettävä erityistä huomiota. Paalujen kantavuus on varmistettava asennuksen jälkeen dynaamisella koekuormituksella tai staattisella koekuormituksella. /11, s. 52–53./

Paaluun vaikuttavat kuormitukset ovat:

- pystykuormitus
- vaakakuormitus ja momenttikuormitus
- sivukuormitus
- negatiivinen vaippahankaus /12, s. 46–47./

Paaluihin kohdistuu aina myös taivutusrasituksia esimerkiksi kuormien epäkeskisyydestä, toispuoleisesta maanpaineesta sekä maan vaakasiirtymistä

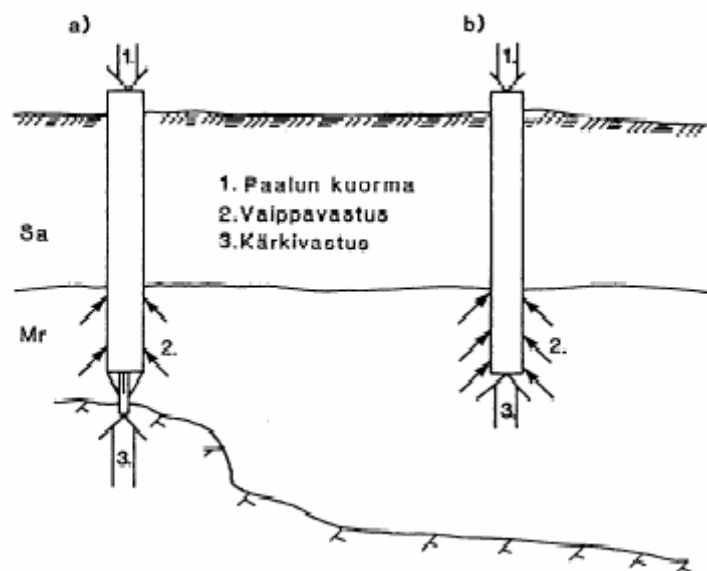
johtuen. Taivutusta paaluun aiheuttaa myös paalun sivuvastuksen hyväksikäyttäminen ja pakkovoimien aiheuttamat vaakakuormat. Paalujen kuormituksessa on aina otettava huomioon myös paalua ympäröivän maapohjan painumisesta aiheutuva negatiivinen vaippavastus. Teräspaalujen rakenteellista kantavuutta laskettaessa on pysyvien rakenteiden osalta otettava huomioon korroosion osuus paalun poikkileikkauspinta-alasta. Jatkettaessa teräspaaluja hitsaamalla, on hitsausjatkoksella oltava sama lyönninkestävyys ja puristuslujuus kuin jatkamattomalla paalulla. /11, s. 52–53./

Paalun kantavuuden tarkastus voidaan tehdä dynaamisen paalutuskaavan avulla lasketun loppulyöntiehdon perusteella. Paalun loppulyönnit käsittävät vähintään kolme kymmenen iskun sarjaa ja jokaisen sarjan pysyvän painuman on oltava pienempi kuin laskettu loppulyöntipainuma iskua kohti.

/10, s. 38–40./

5.3 Geotekninen kantavuus

Skanska Mini Pileä käytetään Suomessa tukipaaluna. Tällöin paalu siirtää pääosan kuormastaan kärjen välityksellä kallioon tai tiiviiseen maakerrokseen. Osa kuormasta voi siirtyä myös vaippakitkan avulla tukikerrokseen. /4./



Kuva 12. a) Kallioon tukeutuvan tukipaalun toimintatapa ja b) maahan tukeutuvan tukipaalun toimintatapa. /4./

Paalun geotekninen kantavuus määritetään niin, että paalua tukeva maapohja eri kuormitustapauksissa kestää sille tulevat kuormitukset. Geotekninen kantavuus koostuu paalun kärjen kantavuudesta, kärkivastuksesta sekä vaipan kantavuudesta, vaippavastuksesta. Paalun geotekninen kantavuus voidaan määrittää usealla tavalla:

- iskuaaltomittaukset
- dynaamiset koekuormitukset
- staattiset koekuormitukset. /4/ /12, s. 50./

Skanska Mini Pilen geotekninen kantavuus on laskettu dynaamisen työn avulla. Tavoitteena on paaluille vaadittu 390 kN tai 250 kN sallittu kantavuus. Murtokuorman tavoitteena on 780 kN tai 500 kN. Työsuunnitteluvaiheessa Skanska Mini Pilestä on tehty mitoitus suunnitelmat kantavuuden ja murto-kuorman suhteen sekä paalun puristuskestävyyden, nurjahduksen mitoitus.

5.4 Loppulyönnit

Paalun loppulyönnit voidaan aloittaa siinä vaiheessa, kun paalun kärki on tunkeutunut lähelle pohjatutkimusten perusteella suunniteltua tavoitetasoa. Ja paalun painuma selvästi vähenee. Paalun upotuksessa ei saa pitää taukoa ennen loppulyöntien aloitusta ja loppulyönnit on lyötävä keskeytyksettä.

Loppulyöntisarjojen lukumäärä määritetään olosuhteiden mukaan. Yleensä lyödään 3-5 kymmenen lyönnin sarjaa. Paalun painumisen pienetessä hitaasti lyödään useampia sarjoja loppulyöntejä. Kun paalun painuminen pienenee nopeasti lyödään vähemmän loppulyöntisarjoja.

Koepaalutusvaiheessa on hyödyllistä lyödä paaluja eri loppulyöntiehdolla. Tällöin voidaan valita riittävä loppulyöntiehto, jota käyttäen sitten tehdään varsinainen paalutustyö. /12, s. 81–83./

6 SKANSKA MINI PILE, PAALUTUS

6.1 Paalutusprosessi

Paalutuksen aluksi teräsputki varustetaan kalliokärjellä. Kalliokärki hitsataan kiinni paalun varteen. Lisäksi paalun kärkeen asennetaan iskutyyny. Paalun upotus tapahtuu vaijeritoimisella 500 kg pudotusjärkeleellä. Järkeleellä isketään suoraan paalun kärkeen eli pudotusjärkele on ns. sisäinen järkäle. Upotusvaiheessa järkäleen pudotuskorkeus on 1,5 m.



Kuva 13. Paalun upotus. /15/

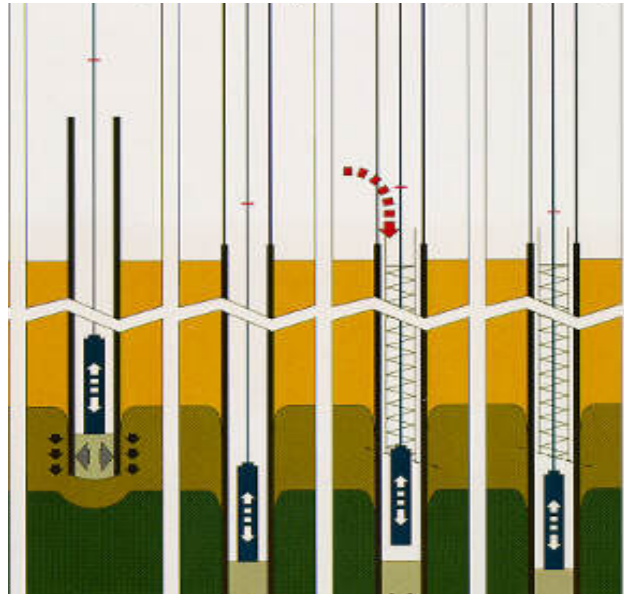
Paalua aletaan upottaa saveen aina yhden teräsputken pituuden verran kerrallaan. Teräsputkesta jätetään esiin maanpinnan yläpuolelle sen verran, että seuraavan jatkoholkin eli teräsputken hitsaus kiinni jo upotettuun holkkiin

onnistuu. Hitsauksen ajaksi järkäle nostetaan pois teräspuutkesta. Kun hitsaus on suoritettu ja on varmistettu, että hitsattu jatkosholkki on suorassa, jatketaan paalun upotusta. Paalua jatketaan koko upotuksen ajan hitsaamalla jatkosholkkeja kiinni paaluun, kunnes paalu saavuttaa laskennallisen loppulyöntivaatimuksen.



Kuva 14. Paalun jatkaminen hitsaamalla. /15./

Paalun upotusvaiheessa seurataan järkäleen pudotuskorkeutta ja paalun painumaa järkäleen iskiessä paalun kärkeen. Loppulyöntikriteerien täytyttyä aloitetaan tarkastustoimet. Laskennallisen tiukkuuden saavutettua paalu on saavuttanut geoteknisen kantavuuden. Kantavuus tarkistetaan koepaaluilla, jolloin myös loppulyöntikriteeriä voidaan muokata. Koepaalutus tarkoitti paalutuksen aikana 10–15 koepaaluja, jotka upotettiin laskennalliseen tiukkuuteen loppulyöntiehdolla 20 mm/ 10 iskua.



Kuva 15. Periaatekuva paalunupotuksesta.

Paalun upotuksen jälkeen tarkastetaan valotestillä paalun suoruus ja paalun ollessa suora on raudoituksen pituus neljä metriä paalun yläosassa. Mikäli paalu ei ole suora, raudoituksen pituutta kasvatetaan, jotta paalun kantavuus säilyy suunniteltuna. Paalun valu suoritetaan kuivavaluna ja betonina käytetään K40 betonia.

6.2 Paalutuskalusto

Paalutustyössä kalustona käytettiin Skanska Tekra Oy:n vuokraamaa paalutuskonetta Vermeer HL1200S. Paalutuskone on suunniteltu käytettäväksi erittäin pienissä ja ahtaissa olosuhteissa, kuten kellaritiloissa ja se eroaakin muista paalutuskoneista juuri kokonsa vuoksi. Paalutuskone on rakennettu pienelle rungolle, jonka pituus on vain 1450 mm. Paalutuskone liikkuu telojen avulla, jonka lisäksi se on varustettu 20 cm leveillä kumitassuilla. Koneessa on myös säädettävä raideleveys mitta-alueella 700 mm – 1000 mm. Paalutuskoneessa on kolme hydraulisesti toimivaa vakaajaa, joista kaksi ovat koneen etuosassa ja näitä kahta voidaan säätää manuaalisesti kolmeen eri asemaan.

Koneen vinssi on varustettu vaijerilla, jonka paksuus on \varnothing 12 mm ja pituus 35 m. Vinssi on suunniteltu aina 1200 kg:n asti ja sen maksimi nostonopeus on 80m/min. Vinssin käyttöasento on muutettavissa nostoasennosta vapaa pudotus asentoon, paalutusta varten. Nostonopeutta voidaan säädellä mikä auttaa esimerkiksi uuden paalun aloitusta, kun lyhyet iskut paaluun ovat tar-

peellisiä. Kone on varustettu ohjelmoitavalla logiikalla, johon tarvitsee syöttää vain tiedot pudotusjärkäleen painosta ja pudotuskorkeudesta ja järjestelmä laskee paalun uppoamissyvyyden jokaisen iskun aikana.

Paalutuskoneen hydrauliiikan vaatima energia saadaan erillisestä moottorista. Paalutuskoneen kokonaispaino on noin 1500 kg, riippuen lisävarustuksesta ja hydrauliyksikön kokonaispaino on noin 1000 kg. /5./



Kuva 16. Paalutuskone Vermeer HL1200S. /15./

6.3 Laadunvalvonta

Laadunvalvontaa tehtiin niin paalun materiaalille, paalutustyölle, paalulle sekä ennen betonointia että betonoinnin jälkeen suoritettavilla kokeilla ja koekuormituksilla. Paalujen suoruutta havainnointiin aluksi ns. valotestillä. Paaluille suoritetaan dynaamisia koekuormituksia ja ehjyysmittauksia. Laaduntarkkailua tarvitsee kuitenkin tehdä vähemmän ja se on helpompaa kuin esimerkiksi puristuspaalutuksen yhteydessä. /16./

Kaikista paaluista pidettiin paalutustyön aikana paalutuspöytäkirjaa, johon merkittiin seuraavat asiat:

- paalun numero
- paalutuspäivämäärä
- paaluelementin pituus
- muut havainnot, esteet
- loppulyönnit
- suoruustarkastus, ns. valotesti
- inklinometrimitaus päivämäärä
- koekuormitus päivämäärä
- paalun betonointi päivämäärä
- paalun raudoitus päivämäärä ja raudoituksen pituus.

Materiaalit tarkastetaan vastaanottovaiheessa työmaalla ja kaikesta saapuvasta materiaalista materiaalitoimittaja toimittaa laatutodistukset. Kaikki materiaaleista toimitetut laatutodistukset säilytetään ja arkistoidaan työmaalla. /16./

Paalutustyön aikana tarkkaillaan koko ajan paalun suoruutta. Hitsausvaiheessa tarkastetaan ennen hitsaamista jokaisen jatkosholkin pään suoruus silmämääräisesti, että holkki on varmasti katkaistu suoraksi. Lisäksi tarkastetaan holkin pystysuoruus sekä silmämääräisesti että vatupassilla ennen sen hitsaamista mutta myös kiinni hitsauksen jälkeen tarkastetaan jatkosholkin suoruus. Kun paalu on upotettu laskennalliseen tiukkuuteen, tarkastetaan jokainen paalu valotestillä ja todetaan paalun suoruus tai mahdollinen epäsuoruus. Paalu on suora, mikäli valotestissä valo näkyy paalun pohjalta, jos valotestissä ei nähdä valoa paalun pohjalla, suoritetaan paalulle inklinometrimitaus, jolla tarkastetaan paalun kaarevuussäde. /16./

Paalutustyönjohtajan on oltava pätevä ja kokenut henkilö ja hänellä on laatu-
vastuu seuraavista asioista:

- työ tehdään työkohtaisten laatuvaatimusten ja työselitysten sekä ohjeiden mukaisesti
- paalutus- ja laatusuunnitelma sekä muut työsuunnitelmat laaditaan ja tarkastetaan ajallaan
- paalutuspöytäkirjat laaditaan viipymättä ja toimitetaan valvojalle ja suunnittelijalle tarkastettavaksi
- valvontamittaukset suoritetaan ja tarpeelliset asiakirjat laaditaan
- suunnittelijalle ilmoitetaan työmaalla tapahtuvista poikkeuksellisista tilanteista ja olosuhteista
- erikoistöiden tekijä, kuten hitsaaja, on suorittanut pätevyyskokeen.
/10, s. 49./

6.4 Paalujen koestus

Paalujen koekuormituksia voidaan käyttää mitoitukseen, työmenetelmien- ja laaduntarkastamiseen. Tällöin voidaan selvittää mm. paalujen ehjyyttä. Koekuormitukset voivat olla staattisia koekuormituksia tai dynaamisia koekuormituksia. Dynaamisilla koekuormituksilla voidaan määrittää paalutuksen loppulyöntiehto ja staattisia koekuormituksia voidaan käyttää kun halutaan selvittää paalun pitkäaikaista käyttäytymistä.

Staattisen koekuormituksen on sisällettävä vähintään kuusi kuormitusporras-
ta. Painumanopeutta on mitattava vähintään kolmella kellolla ja painumano-
peuden on oltava alle 0,25 mm/h ennen seuraavalle kuormitusportaalle siir-
tymistä. Vakionopeusmittauksessa nopeuden on oltava koko ajan vakio ja
sen on oltava noin 0,1 mm/min koko kokeen ajan. Painumaa mitattaessa on
mittalaitteen painumatarkkuuden oltava vähintään 0,1 mm ja mittalaitteet on
kalibroitava vähintään kerran vuodessa. Staattiset koekuormitukset on aina
tehtävä rakennuspaikan epäedullisimmissa pohjaolosuhteissa.

Dynaamiset koekuormitukset voi suorittaa kokenut henkilö, joka tuntee tar-
koin paalutustekniikan, maaperäolosuhteet ja iskuaaltoteorian. Dynaamiset
koekuormitukset tulee suorittaa tarkoitukseen soveltuvalla laitteella.

/10, s. 50–51./



Kuva 17. Paalun dynaaminen koekuormitus. /15./

6.5 Laskelmat

Skanska Mini Pilen mitoittavat laskelmat on esitetty jo työsuunnitelmassa. Työsuunnitelmassa on esitetty vaadittavat mitoituskijät ja kuinka Skanska Mini Pile nämä täyttää. Skanska Mini Pilen geotekninen kantavuus on laskettu dynaamisen työn avulla ja tavoitteena paalulle on vaadittu 390 kN tai 250 kN kantavuus. Murtokuorman tavoitteena on 780 kN tai 500 kN.

Paalun geoteknisessä kantavuuslaskelmassa on tarkasteltu paalua eri halkaisijoiden suhteen ja kolmella eri painumalla. Vertailussa käytetyt halkaisijat olivat 193 mm, 219 mm ja 273 mm. Painumiksi oli otettu 1 mm, 2 mm ja 4,5 mm. Näillä halkaisijoilla ja painumilla on vertailtu paalun kantavuutta. Laskelmissa järkäleen iskuenergia, pudotuskorkeus, hyötysuhde, paalun pituus, teräksen kimmomoduuli, betonin lujuus sekä maapohjan jousto pysyivät vakioina kaikissa laskelmissa. Halkaisijan ollessa 193 mm, on kantavuudeksi saatu 2 mm painumalla 790 kN ja painuman ollessa 4,5 mm on kantavuudeksi saatu samalla halkaisijalla 503 kN eli molemmilla painumilla paalu saavuttaa vaaditun kantavuuden. Geoteknisen kantavuuden tuloksista (Liite 1) käy ilmi, että paalun halkaisijan kasvaessa kasvaa myös paalun kantavuus. Mitä pienempi on paalun painuma, sitä suurempi on paalun geotekninen kantavuus.

Paalun rakenteelliset murtokuormat on laskettu 250 kN ja 390 kN pystykuormituksilla. Paalun rakenteelliset murtokuormat on laskettu 193 mm halkaisijalla sekä teräksen paksuudella 3 mm, ja paalun pituudeksi on oletettu 20 m. Raudoituksen pituus 4 m paalun yläpäässä ja määrä sekä betonin materiaalitiedot ovat molemmissa laskelmissa vakiot. Laskelmissa on lisäksi otettu huomioon korroosion vaikutus laskettaessa rakenteellista murtokuormaa. Rakenteellista murtokuormaa laskettaessa pystykuormalla 390 kN, oletettiin korroosion olevan 3 mm. Tällä pystykuormalla rakenteellisen murtokuorman arvoksi saatiin 755 kN ja kimmoinen puristuma oli 9,6 mm. Pystykuormalla 250 kN oletettiin korroosioksi vaikutukseksi 2 mm. Näillä arvoilla rakenteellisen murtokuorman arvoksi saatiin 825 kN ja kimmoinen puristuma oli 5,7 mm. Murtokuormien laskentatulokset on esitetty taulukossa 1. Murtokuormien laskelmat ovat liitteessä 3.

Taulukko 1. Rakenteellisten murtokuormalaskelmien tulokset.

Pystykuorma	Korroosio	Murtokuorma
250 kN	3 mm	825,9783 kN
390 kN	2 mm	755,6933 kN

Teräspaaluilla myös nurjahdusvaara on aina tarkasteltava ja teräspaalujen suoruuteen on aina kiinnitettävä erityistä huomiota, koska paalut saattavat nurjahtaa riittävän sivutuen puuttuessa. Mitoitettaessa paaluja nurjahdusta vastaan oletetaan ne aina käyristyneiksi. Paalujen minimikäyryssäde määräytyy valmistustoleranssien ja jatkoksen sallitun kulmamuutoksen perusteella. Paalun kestävyys saavutetaan, kun paalun rasitetuimman poikkileikkauksen rakenteellinen kapasiteetti ylittyy. Skanska Mini Pilestä on työsuunnitel-mavaiheessa esitetty paalun kaarevuudesta johtuva nurjahdusmitoitus. Paalun kaarevuus saa suurimmillaan olla 1:100 eli pienin mahdollinen kaarevuussäde on $R=100$ m. Paalun nurjahtamiseen liittyen, on paalulle tehty puristuskestävyyden mitoitus, jossa esitetään poikkileikkauksen tyssäytymis- ja momenttikapasiteetti, paalun jäykkyys sekä paalun nurjahduskestävyys. Tämän jälkeen on laskettu poikkileikkauksen puristuskestävyys alkukäyrille paaluille. Nämä tarkastelut on tehty sekä paalun kaarevuussäteelle 100 m että 180 m.

Paalun puristuskestävyyden mitoitus on tehty paalulle, jonka halkaisija on 193 mm ja paalun seinämäpaksuus 4 mm. Korroosiovähennykseksi on otettu 2,5 mm ja betonin lujuus oli 30 MN/m^2 . Tavoite paalukuormalle oli 390 kN. Alkukaarevuussäteet olivat 100 m ja 180 m. Aluksi laskettiin poikkileikkauksen tyssäytymis- ja momenttikapasiteetti, jonka jälkeen laskettiin paalun jäykkyydet. Tämän jälkeen laskettiin nurjahduskestävyys suoralle paalulle, 100 m alkukäyrälle paalulle käytettiin savikerroksen paksuutena 3,5 m ja 180 m alkukäyrälle paalulle savikerroksen paksuutta 3,7 m. Lopuksi laskettiin poikkileikkauksen puristuskestävyys alkukäyrille paaluille. 100 m alkukäyrän paalun puristuskestävyys oli 334 kN ja 180 m alkukäyrälle paalulle 390 kN. Tuloksista pääteltiin, että paalun rakenteellinen kestävyys määrää paalun kapasiteetin. Tulokset on esitetty taulukossa 2. Laskelmat on esitetty liitteessä 4.

Taulukko 2. Paalun puristuskestävyyden mitoitus tulokset.

Alkukaarevuussäde	Paalukuorma käyttörajatilassa
100 m	334,632 kN
180 m	390,066 kN

7 ESIMERKKIKOHDE

7.1 Yleistä esimerkkikohteesta

Esimerkkikohteena oli Salon keskustassa Asemakatu 4:ssä sijaitseva asuin-kerrostalo. Rakennus sijaitsee pohjaolosuhteiltaan vaativalla alueella. Rakennuksen lattiatason alla on ensiksi täyttömaata sekä savea. Täyttömaan alla on noin 20 metrin paksuinen savikerros. Moreenikerroksen päällä on paikoin ohut silttikerros. Moreenikerros alkaa noin 20 metristä ja voi paikoin olla yläosaltaan löyhää, mutta muuttuu nopeasti tiiviiksi (liite 2). Rakennus on perustettu puupaaluille, jotka olivat, pohjaveden alenemisen seurauksena alkaneet lahota ja perustukset olivat päässeet painumaan. Tästä syystä lahoamaan alkaneet puupaalut tarvitsivat korjausta. /14./

Ennen korjauksen aloittamista, pohjasuhteet tutkittiin tarkkaan. Tontilta, jolla rakennus sijaitsee, tehtiin siipikairauksia kolme kappaletta, painokairauksia kaksi kappaletta sekä porakonekairauksia kaksi kappaletta, lisäksi vuonna 1990 oli tontilla tehty painokairauksia neljä kappaletta. Lisäksi alueelle oli asennettu kolme orsiveden havaintoputkea (liite 1). /14./

Lisäksi ennen korjaustoimenpiteiden alkua selvitettiin koekuoppatutkimusten avulla puupaalujen kuntoisuutta koko alueella. Koekuoppatutkimuksia tehtiin yhteensä viisi kappaletta. Koekuoppatutkimuksista kävi ilmi mm. seuraavia asioita esimerkkinä koekuopan 1 tulokset:

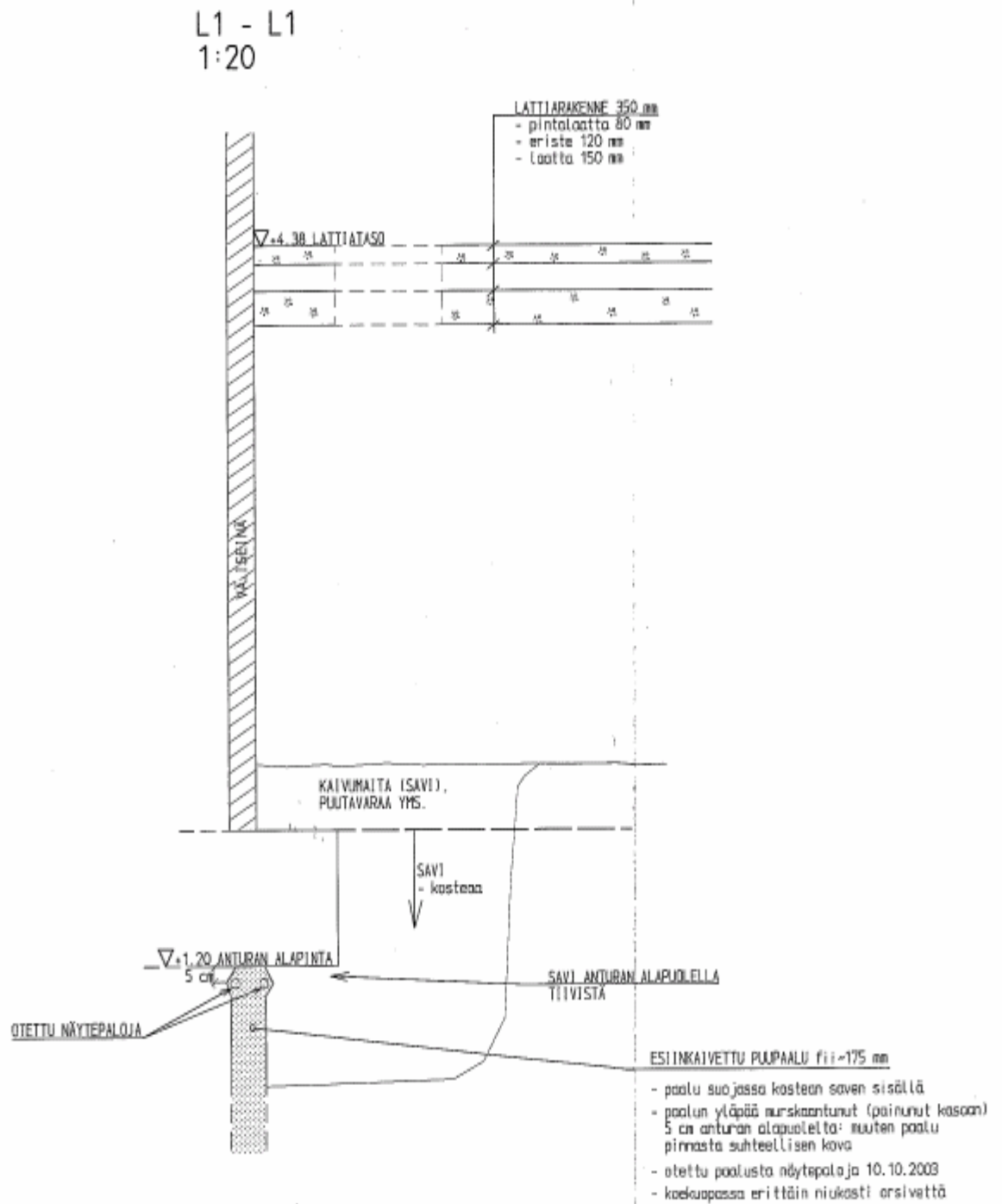
- Koekuoppa 1 ja puupaalunäytteet
 - lattialaatan paksuus on 150 mm + 80 mm
 - lattialaatan alapuolella on ryömintätila, jonka korkeus on anturan yläpinnasta lattialaatan alapintaan 2,2 m
 - betonianturan ympärillä oli kosteaa savea
 - betonianturan alapuolella ei havaittu tyhjää tilaa
 - puupaalun yläpäästä ympäröi betoni ja kostea savi
 - puupaalun halkaisija oli 175 mm
 - betonianturan alapinnan alueella puupaalun solukkorakenne oli murskaantunut paalun koko poikkipinnassa
 - puupaalusta otettu näyte koestettiin piikillä mekaanisesti

- puupaalun pintaosassa oli pehmeyttä 11 mm syvyyteen saakka
- muilta osin näyte oli kova
- koekuopassa havaittiin niukasti orsivettä.

Samanlaisia tuloksia saatiin muistakin neljästä koekuopasta. Koekuoppatutkimusten perusteella koko rakennuksen alueella oli puupaalujen alueella laajoja mekaanisia vaurioita. puupaalunäytteiden perusteella puupaalujen yläpäiden mekaanisten vaurioiden aiheuttaja ei ollut lahottajasieni. /14./

Koekuoppatutkimusten tulosten perusteella rakennuksen alueella oli suuri määrä paaluja, joiden kantavuus oli menetetty kokonaan. Joukossa saattoi olla myös hyväkuntoisempia paaluja mutta todennäköisesti myös nämä paalut olivat lähestymässä mekaanista murtotilaa, koska kuormitukset olivat siirtyneet heikommin kantavista paaluista näihin paaluihin. /14./

Vaurioituneiden paalujen lukumäärän kasvaessa seurauksena olisi ollut rakennuksen perustusrakenteiden toimintamekanismin laaja-alainen pettäminen. Vaaitustulosten perusteella puupaalujen yläpäiden mekaaniset vauriot olivat jo aiheuttaneet rakennuksen epätasaista painumista. Näin rakennuksen runkorakenteiden ehjänä pysymisen edellytys oli perustusten vahvistaminen ensi tilassa. /14./



Kuva 18. Koekuoppatutkimuksentulos vanhasta rakenteesta väliseinän kohdalla. /14./

Rakennuksen puupaaluista korvattiin Skanska Mini Pileilla ja puristuspaaluilla. Skanska Mini Pileja tuli yhteensä 132 kappaletta, paalujen keskipituus oli 26,3 m ja koko toteutunut määrä oli 3472,2 m. Puristuspaaluja tuli 32 kappaletta. /15./

Esimerkkikohteessa 132 kappaleesta Skanska Mini Pileja tuli ns. hukkapaaluja vain viisi kappaletta. Nämä paalut huomattiin jo paalutustyön aikana ja niitä ei näin ollen edes lyöty lopulliseen tiukkuuteen asti, vaan ne poistettiin jo paalutustyön aikana. Tällöin syynä oli, että paalu osui puupaaluun tai johonkin muuhun esteeseen ja se muutti suuntaa, jolloin paalut saatiin poistettua jo työn aikana. /15./

Skanska Mini Pileilla hylkäysprosentti oli nolla. Yhtään moreeniin asti lyötyä paalua ei siis hylätty. Paalut, jotka valotestissä osoittautuivat kaareviksi, mitattiin kaarevuussäteen määrittämiseksi inklinometrimittauksella ja mittaustulosten perusteella kaikki paalut olivat määritettyjen kaarevuussäderajojen sisällä. Kaarevien paalujen kantavuutta lisättiin vain raudoitusta lisäämällä. /15./

7.2 Koekuormitukset ja mittaukset

7.2.1 Koekuormitukset ja ehjyysmittaukset yleistä

Koepaalutus esimerkkikohteessa As Oy Asemakatu 4, tarkoitti 10–15 paalua, jotka upotettiin laskennalliseen tiukkuuteen 500 kg järkäleellä 1,5 m pudotuskorkeudella ja loppulyöntivaatimus oli 20 mm/ 10 iskua tai pienempi. Kantavuus mitattiin osasta koepaaluista. Koepaaluista kolme tarkastettiin PDA-mittauksella ja kolme paalua staattisella koekuormituksella. Koekuormitukset tehtiin useassa vaiheessa, kun paalut oli betonoitu. Koepaalutusten upotuksen aikana mitattiin lähirakenteiden siirtymiä ja tärinöitä.

Esimerkkikohteessa paaluille suoritettiin ehjyysmittauksia koekuormitusten lisäksi. Ehjyysmittauksia suoritettiin 30 paalulle. Ehjyysmittausten tarkoituksena oli määrittää paalujen betonin ehjyys.

7.2.2 Staattinen koekuormitus

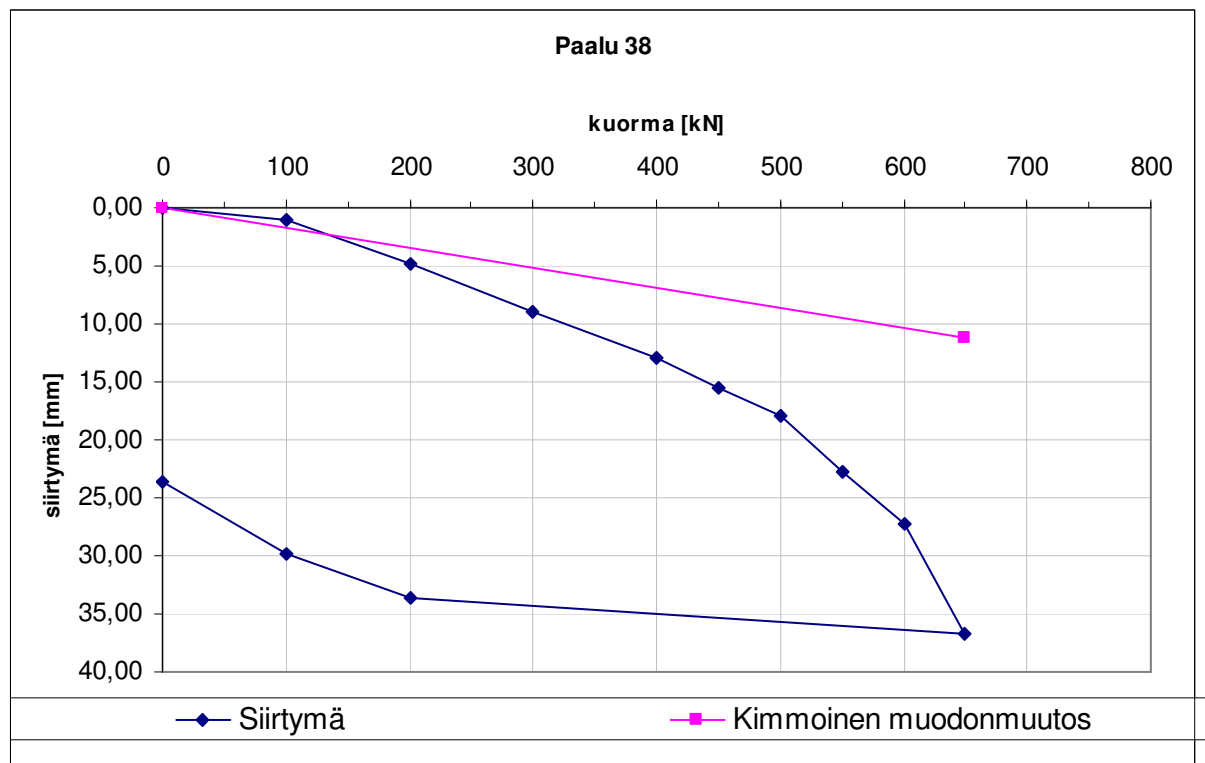
Staattiset koekuormitukset suoritettiin useassa vaiheessa, kun paalut oli injektoitu. Koekuormitetut paalut olivat ensivaiheessa upotettu laskennalliseen tiukkuuteen 500 kg pudotusjärkäleellä 1,5 metrin pudotuskorkeudella loppulyöntitiukkuus on 15 mm/ 10 iskua tai pienempi. Toisessa vaiheessa paalut lyötiin tiukempaan 5 mm/ 10 iskua suuremmalla pudotuskorkeudella.

Koekuormituksissa käytettiin hydraulista 90 tonnin Enercap-merkkistä tunkkia. Koekuormitusohjelma tehtiin yhteistyössä geosuunnittelijan kanssa. Koekuormituksessa kuormaa lisättiin aina, kun paalun tulkittiin olevan pysähtynyt. Jokaista kuormitusporrasta eli tietyllä kuormalla kuormitettiin paalua vähintään viisi minuuttia. Tavoitteena oli päästä 900 kN kuormitukseen asti.

Kuormituksen aikana siirtymää seurattiin kahdella siirtymäkellolla, joiden lukematarkkuus on 0,01 mm. Siirtymäkellojen lukemista laskettiin paalun siirtymä, joka oli näiden kahden kellon lukemien keskiarvo. Lisäksi voimaa seurattiin yhdellä painemittarilla koekuormituksen aikana. Taulukossa 3 on esitetty paalun numero 38 staattisen koekuormituksen tulokset.

Taulukko 3. Paalun 38 staattisen koekuormituksen tulokset.

Kuormitus KN	kello1	kello2	step1	step2	KA	Siirtymä	lukema1	lukema2
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,28	1,34
100	-1,29	3,34	-1,29	3,34	1,03	1,03	-0,01	4,68
200	1,71	8,01	3,00	4,67	3,84	4,86	2,99	9,35
300	5,26	12,57	3,55	4,56	4,06	8,92	6,54	13,91
400	8,74	17,06	3,48	4,49	3,99	12,90	10,02	18,40
450	11,10	19,99	2,36	2,93	2,65	15,55	12,38	21,33
500	13,26	22,65	2,16	2,66	2,41	17,96	14,54	23,99
550	18,33	27,02	5,07	4,37	4,72	22,68	19,61	28,36
600	23,12	31,37	4,79	4,35	4,57	27,25	24,40	32,71
650	33,58	39,80	10,46	8,43	9,45	36,69	34,86	41,14
200	30,03	37,13	-3,55	-2,67	-3,11	33,58	31,31	38,47
100	26,43	33,31	-3,60	-3,82	-3,71	29,87	27,71	34,65
0	23,57	23,81	-2,86	-9,50	-6,18	23,69	24,85	25,15



Kuva 19. Paalun 38 staattisen koekuormitustuloksen kuvaaja.

7.2.3 Dynaaminen koekuormitus

Dynaamisia koekuormituksia (PDA, Pile Driving Analyzer) suoritettiin kolmelle paalulle. PDA-mittauksia suoritettiin paalujen injektoinnin jälkeen. Dynaamisten koekuormitusten avulla oli tarkoitus määrittää paalujen kantavuus.

PDA-mittaukset suoritettiin Pile Dynamics Inc. valmistamalla Pile Driving Analyser®-nimisellä laitteella, malli PAK ja PDA-W-analyysiohjelmalla. Mittaukset suoritettiin käyttämällä kahta voima-anturia ja kahta kiihtyvyyssanturia. Mittauksissa iskuaallon etenemisnopeutena paalussa käytettiin (WS) 3850 m/s. Kantavuuslaskelmissa vaimennuskertoimen arvona oli $JC=0,3$.

PDA- mittauksia varten paalutuskoneeseen kiinnitettiin 1000 kg vapaasti putoava järkäle. Mittauksia varten suurempi tarvittiin suurempi iskuenergia kuin mitä paalutustyössä oli iskuenergiaksi tarvittu.

7.2.4 Ehjyysmittaukset

Ehjyysmittauksia (PIT, Pile Integrity Tester) suoritettiin 30 paalulle. Ehjyysmittausten tavoitteena oli määrittää betonin ehjyys.

PIT-mittaukset suoritettiin Pile Dynamics inc. valmistamalla Pile integrity Tester®-nimisellä laitteella ja tulosten analysointi PIT-W-analyysiohjelmalla.

7.3 Mittaustulokset

7.3.1 Staattisten koekuormitusten tulokset

Staattisten koekuormitusten ensivaiheen tulokset osoittivat, että tehdyllä paalutustavalla saavutettiin $P=270$ kN sallittu kantavuus. Toisessa vaiheessa tiukemmalla loppulyöntiehdolla 5 mm/ 10 iskua saavutettiin yli 780 kN kantavuus.

Staattisen koekuormitusten perusteella paalutuksen loppulyöntivaatimuksiksi ehdotettiin seuraavaa:

- Paalun kuoma alle 270 kN
 - loppulyöntiehto oli vähintään kolme kymmenen iskun sarjaa, joissa painuma oli alle 15 mm/ 10 iskua pudotuskorkeudella 1,5 m.
- Paalun kuorma yli 270 kN

- loppulyöntiehto oli vähintään kolme kymmenen iskun sarjaa, joissa painuma oli alle 5 mm/ 10 iskua ja viimeinen kymmenen iskun sarja alle 3 mm/ 10 iskua.

Lisäksi staattisten koekuormitusten jälkeen annettiin ohjeeksi, että paalujen suoruus tuli tarkastaa inklinometrimittauksella, kun esitarkastuksessa valo-havainto hävisi ennen 15 m syvyyttä paalun yläpäästä mitattuna.

7.3.2 Dynaamisten koekuormitusten tulokset

Kolmelle paalulle suoritettujen PDA-mittausten tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. PDA-mittaustulokset.

pl	L[m]	Le [m]	s [mm]	EMX [kNm]	RMX[kN]
65	24,5	24,3	5	9,9	630
163	24,5	24,3	4	9,5	623
164	24,5	24,3	2	9,5	999

Taulukossa 3. esitetyt tiedot ovat:

- pl, paalun numero
- L [m], paalun pituus
- Le [m], paalun mittauspituus antureista alaspäin
- s [mm], mitattu painuma (koelyönti)
- EMX [kNm], lyönnistä paaluun siirtynyt maksimienergia (koelyönti)
- RMX [kN], mitattu murtokuorma

PDA-mittauksissa paalujen kantavuus oli välillä 623–999 kN. Paalut todettiin kantavuuden perusteella toimiviksi paaluiksi. Liitteenä PDA- mittauskuvaukset paaluista 65, 163 ja 164 (liite 5).

7.3.3 Ehjyysmittausten tulokset

PIT-mittausten perusteella kaikki mitatut paalut olivat ehjiä. Iskuaallon nopeus paaluissa oli noin $WS=4000$ m/s. Jokaisesta mitatusta paalusta on esitetty mittauskuvaukset. Liitteenä PIT-mittauskuvaukset paaluista 38 ja 43 (liite 6).

8 YHTEENVETO

Työssä kerättiin tietoa perustusten korjaukseen johtavista yleisistä syistä sekä korjausmenetelmistä. Erityisesti keskityttiin puupaaluperustusten korjausmenetelmiin ja kerättiin puupaaluperustuksiin käytettävien menetelmien hyötyjä ja haittoja sekä verrattiin näitä eri menetelmiä Skanska Mini Pileen. Skanska Mini Pilea esiteltiin tarkemmin esimerkkikohteen avulla mm. millainen on itse paalu, millainen on paalutusprosessi, esiteltiin paalutuskalusto, minkälaista laadunvalvontaa tarvitsee suorittaa sekä kerrottiin miten paalu oli mitoitettu.

Puupaaluperustusten korjaukseen on olemassa monia korjausmenetelmiä, joista valitaan aina paras kunkin tilanteen mukaan. Skanska Mini Pilen etuina voidaan pitää, että siinä käytettävä paalutuskalusto mahtuu pieneenkin tilaan, paalutustyö on huomattavasti nopeampaa kuin monen muun paalutustavan paalutustyö, paalutustyön haitat ympäristölle ovat vähäisempiä kuin monessa muussa paalutustavassa. Esimerkiksi paalutustyöstä aiheutuva melu ja värinä ovat pienempiä kuin useissa muissa paalutustavoissa eikä paalutustyö aiheuta ympäröivien maamassojen nousuja vaan maamassat pysyvät hyvin paikoillaan. Skanska Mini Pilea voidaan hyvin pitää yhtenä vaihtoehtona valittaessa perustusten korjausmenetelmää.

Skanska Mini Pilella pitäisi saada lisää korjauskohteita Suomessa, jotta saataisiin paremmin tietoa sekä sen hyödyistä että haitoista. Useamman korjauskohteen perusteella pystyttäisiin myös vertailemaan kustannuksia muihin paalutusmenetelmiin nähden. Kustannuksia ei ole perusteltua vertailla ensimmäisen Suomessa toteutetun kohteen perusteella, joten siksi se jätettiin tästä työstä pois.

Skanska Mini Pile on vartenotettava paalutusvaihtoehto mietittäessä tulevaisuudessa perustusten korjausmenetelmiä. Tarvitaan vain lisää korjauskohteita, jolloin voidaan paremmin vertailla Skanska Mini Pilea eri korjausmenetelmiin.

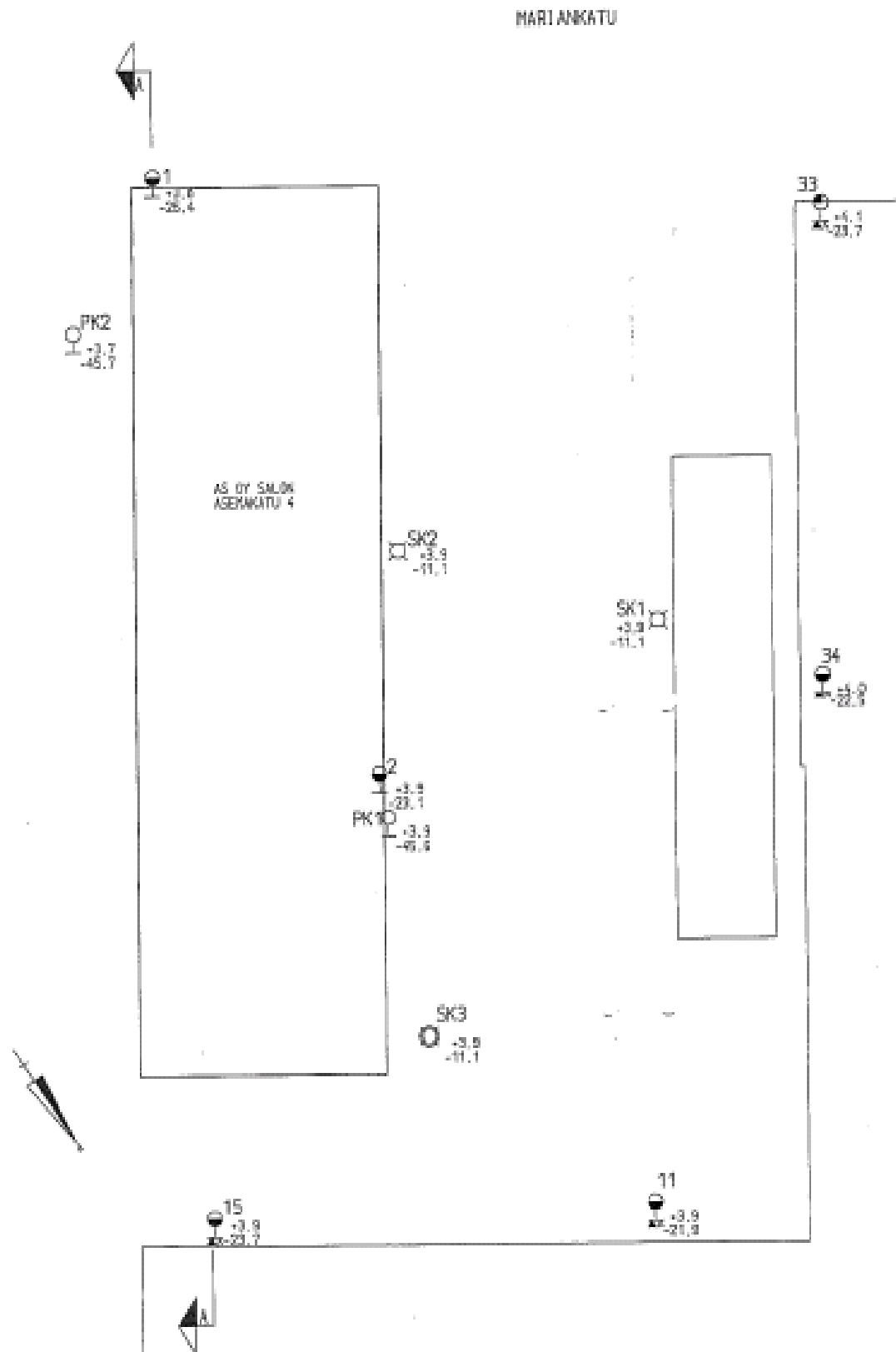
VIITELUETTELO

- /1/ Jääskeläinen Raimo, *Pohjarakennuksen perusteet*, Tammertekniikka: Tampere, 2003
- /2/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL, *RIL 174-5 Korjausrakentaminen V Perustukset-Pohjarakenteet*, Vammalan kirjapaino: Vammala, 1991
- /3/ *Rakennustaito nro 2101 6/2005*, Turun vanhojen rakennusten ongelmina painuminen ja lahovauriot
- /4/ Tiehallinto, *Teräspalkkipaalut*, Edita Oy, Helsinki 1999
- /5/ Vermeer-Holland, *Pile Driver HL-1200S*, esite 2004
- /6/ Tiehallinto, *Porapaalutusohje*, Edita Oyj, Helsinki 2001
- /7/ <http://www.terasrakenneyhdistys.fi/julkaisut/mvr/mpr-oppik.pdf>, luettu 30.3.2006
- /8/ http://www.mutku.com/tekstit/Mutku_paivat2005/Juha_Forsman.pdf, luettu 30.3.2003
- /9/ Holmberg Henrik, *Vanhojen rakennusten perustusten korjaaminen ja vahvistaminen*, VTT Offsetpaino: Espoo, 1982
- /10/ Rautaruukki, *RR-Paalutusohjekirja*, 2002
- /11/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL R.Y., *RIL 121–2004 Pohjarakennusohjeet*
- /12/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL R.Y., *RIL 223–2005 Lyöntipaalutusohje LPO-2005*, Hakapaino Oy, Helsinki 2005
- /13/ Pertti Jääskeläinen Oy, As Oy Salon Asemakatu 4, Rakennepiirustukset ja työselitys
- /14/ Geo-Master Oy, As Oy Salon Asemakatu 4, geotekniikkakuvat ja geotekninen työselitys
- /15/ Skanska Tekra Oy, As Oy Salon Asemakatu 4, laskelmat, selostukset, valokuvat
- /16/ Kauti Esko, haastattelu 17.2.2005, Skanska Tekra Oy

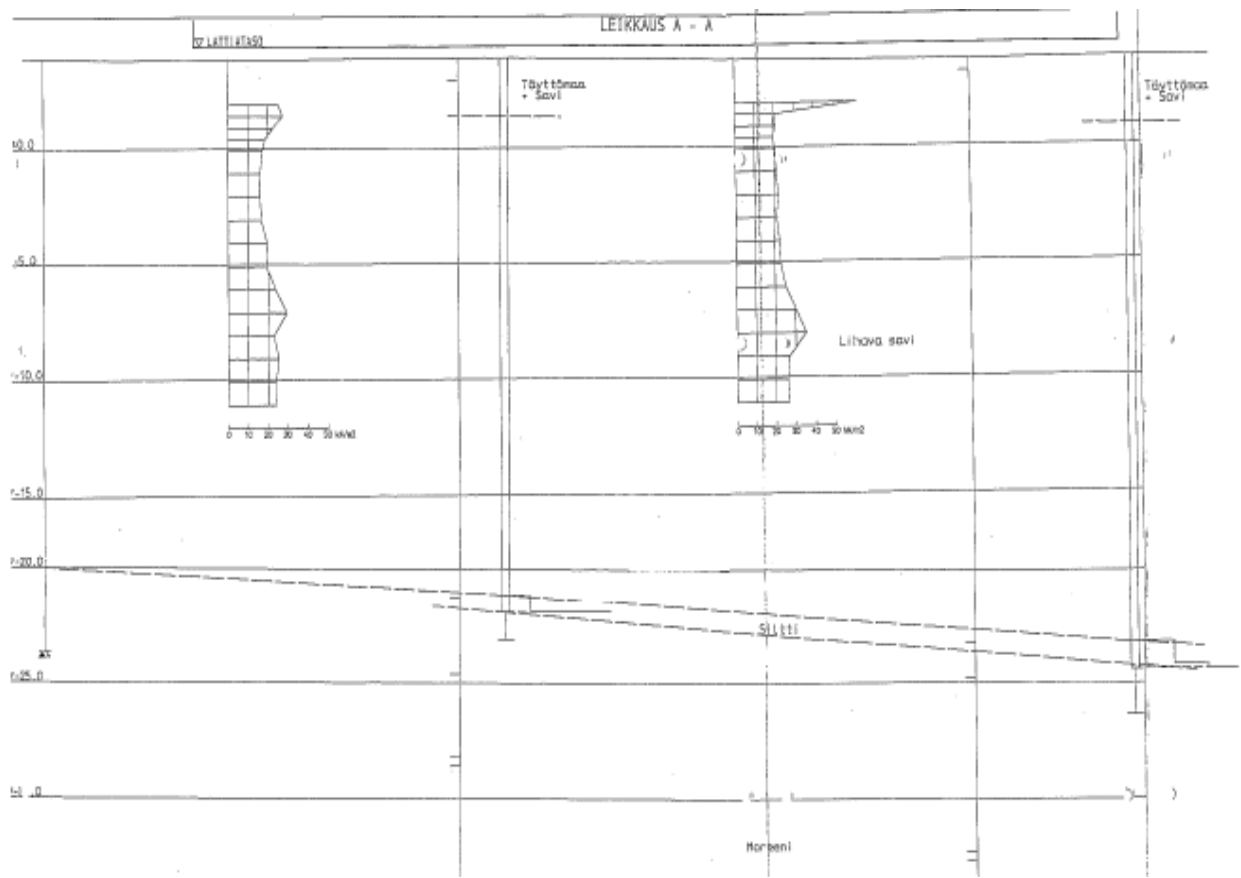
LIITTEET

- Liite 1 Pohjatutkimuskartta, kairauspisteet
- Liite 2 Pohjasuhteet leikkaus A-A
- Liite 3 Geoteknisen kantavuuden laskenta, murtokuorman mitoitus ja kantavuuslaskelma
- Liite 4 Paalun puristuskestävyyden mitoitus, nurjahdusmitoitus
- kaarevuussäteellä 100 m
 - kaarevuussäteellä 180 m
- Liite 5 PDA-mittauskuvaajat paaluista 65, 163 ja 164
- Liite 6 PIT-mittauskuvaajat paaluista 38 ja 43

Pohjatutkimuskartta, kairauspisteet



Pohjasuhteet leikkaus A-A



Pystykuormitus 390 kN ja korroosio 3mm		Pystykuormitus 250 kN ja korroosio 2 mm		
paalun halkaisija	193 mm	paalun halkaisija	193 mm	
paalun pituus	20 m	paalun pituus	20 m	
kärki halkaisija	203 mm	kärki halkaisija	203 mm	
kärjen paksuus	8 mm	kärjen paksuus	8 mm	
pystykuormitus	390 kN	pystykuormitus	250 kN	
vaakakuormitus	0	vaakakuormitus	0	
taivutuskuormitus	0	taivutuskuormitus	0	
vetoluormitus	0	vetoluormitus	0	
Raudoitus		Raudoitus		
betoniteräs	500 N/mm ²	betoniteräs	500 N/mm ²	
materiaalivarmuus	1,2	materiaalivarmuus	1,2	
sallittu jännitys	416,667 N/mm ²	sallittu jännitys	416,667 N/mm ²	
lukumäärä	6 kpl	lukumäärä	6 kpl	
halkaisija	10 mm	halkaisija	10 mm	
tartuntapituus	269 mm	tartuntapituus	269 mm	
raud.pituus	4000 mm	raud.pituus	4000 mm	
hakateräs	8 mm	hakateräs	8 mm	
hakaväli	750 mm	hakaväli	750 mm	
suojabetoni	40 mm	suojabetoni	40 mm	
ala	471 mm ²			
Laskenta		Laskenta		
Betoni		Betoni		
K-luku	40 N/mm ²	K-luku	40 N/mm ²	
materiaalivarmuus	1,5	materiaalivarmuus	1,5	
laskentalujuus	26,667 N/mm ²	laskentalujuus	26,667 N/mm ²	
E-luku	28500 N/mm ²	E-luku	28500 N/mm ²	
ala	28338,5 mm ²	ala	28338,5 mm ²	
kantavuus	755,6933 kN	kantavuus	755,6933 kN	
Teräsputki		Teräsputki		
teräslaatu	235 N/mm ²	teräslaatu	235 N/mm ²	
min paksuus	3 mm	min paksuus	3 mm	
korroosio	3 mm	korroosio	2 mm	
E-luku	210000N/mm ²	E-luku	210000N/mm ²	
ala	0	ala	299,085 mm ²	
kantavuus	0	kantavuus	70,28498 kN	
Etot	25000	Etot	30395,55	
as+ab	28338,5	as+ab	28637,59	
Etot2	28500			
as+ab2	28809,5			
		yläpää		
		235,5 kN		
Yhteensä	755,6933 kN	991,1933 kN	Yhteensä	825,9783 kN
kimmoinen puristuma	9,657682 mm		kimmoinen puristuma	5,744122 mm

Kantavuuslaskelma

Halkaisija	Pohjanala	Järkäle	Pud.kor- keus	Painuma	Hyötysuhde	Kantavuus	Jousto	Lpile	Epile	Bet.lujuus	Maapohjan jousto
193	0,02924	5	1,5	0,001	0,7	1023,468	0,0022	20	31622776	40	0,0025
219	0,03764	5	1,5	0,001	0,7	1106,349	0,0017	20	31622776	40	0,0025
273	0,05850	5	1,5	0,001	0,7	1229,797	0,0011	20	31622776	40	0,0025
193	0,02924	5	1,5	0,002	0,7	790,0953	0,0022	20	31622776	40	0,0025
219	0,03764	5	1,5	0,002	0,7	838,5923	0,0017	20	31622776	40	0,0025
273	0,05850	5	1,5	0,002	0,7	907,6532	0,0011	20	31622776	40	0,0025
193	0,02924	5	1,5	0,0045	0,7	503,228	0,0022	20	31622776	40	0,0025
219	0,03764	5	1,5	0,0045	0,7	522,4728	0,0017	20	31622776	40	0,0025
273	0,05850	5	1,5	0,0045	0,7	548,4732	0,0011	20	31622776	40	0,0025

Paalun puristuskestävyyden mitoitus, kun kaarevuussäde on 100m

PAALUN PURISTUSKESTÄVYYDEN MITOITUS

1. LÄHTÖTIEDOT

Teräsputken ulkohalkaisija	RR140 D=	193	mm
seinämän paksuus	t=	4	mm
Sisäteräksen halkaisija	d _r =	1	mm
Betoniterästen kpl-määrä	n=	1	kpl
Korroosiovähennys (Eurocode 3 Design of steel structures: Part 5 Piling)	s(t)=	2,5	mm
mitoitettava aika on	t=	100	v
Betonin lujuus	K	30	MN/m ²
ominaispuristuslujuus	f _{ck} =	28	
betonin materiaosavarmuuskerroin	γ _c =	1,5	
Betoniteräksen myötöjännitys A500H	f _{yk} =	500	MN/m ²
betoniteräksen materiaosavarmuuskerroin	γ _{rs} =	1,2	
Rakenneteräksen myötöjännitys S440	f _{syd} =	440	MN/m ²
paaluteräksen materiaosavarmuuskerroin	γ _s =	1,1	
g on pitkäaikaisen kuorman osuus koko kuormasta q	g	0,85	
Kokonaiskuorma	q	1	1
Betonilla täytetty teräsosa : estetty sivusiirtävyys	λ _{max} = 0,8/α _c	RR140 B54	
vapaa sivusiirtävyys	λ _{max} = 0,5/α _c	RR140 B55	
suljettu leikkauslujuus	c _{uk} =	30	kPa
Alkukaarevuussäde	R ₀ =	100	m
Tavoite paalukuormalle	P _k =	390	kN

PAALUN PURISTUSKESTÄVYYDEN MITOITUS

2. POIKKILEIKKAUKSEN TYSSÄYTYMIS- JA MOMENTTIKAPASITEETTI

$$N_p = N_u = A_c f_{cd} + A_s f_{yd} + A_s f_{yd} =$$

$$N_u =$$

$$M_u =$$

betoniosakerroin $0.1 < \alpha_c < 0.8$

$$\alpha_c = A_c f_{cd} / N_p =$$

3. JÄYKKYYDET

Betonipoikkileikkaus	$E_{cd} I_c$	862,5 kNm ²	$E_{cd} A_c$	403192,0012
Teräsydin	$E_{td} I_t$	0,0 kNm ²	$E_{td} A_t$	164,9
Teräsputki	$E_{sd} I_s$	764,3 kNm ²	$E_{sd} A_s$	175772,1
Yhteensä	EI	1626,7 kNm²	EA	579129,0

4. NURJAHDUSKESTÄVYYS

Nurjahduspituus savikerroksessa

$$L_{cr} = \pi \sqrt{(EI_1 / (k_{sd} D))}^{1/4} = 3,5 \text{ m}$$

$$\text{suoran paalun nurjahduskuorma } P_{cr} = 2(k_{sd} D EI_1)^{1/2} = 3293,2 \text{ kN}$$

POIKKILEIKKAUKSEN PURISTUSKESTÄVYYS ALKUKÄYRILLE PAALUILLE

$$\text{kriittinen kuorma maan murtuessa } P_d < P_{cr} / (1 + k_{sd} \sigma_d / P_M) = 1940 \text{ kN}$$

kun $\sigma_d = L_{cr}^2 / 8R_n$

$$\text{kriittinen kuorma paalun murtuessa } P_d / N_u + M_{tot} / N_u M_u \times (N_u - N_c) < 1 \quad (1)$$

$$N_c = f_{cd} A_c \quad (2)$$

$$M_{tot} = 0,5 P_d \sigma_d / (1 - P_d / P_{cr}) = M_o / (1 - P_d / P_{cr}) \quad (3)$$

$$M_o = 0,5 P_d \sigma_d \quad (4)$$

Ratkaisemalla (1)...(4) yhtälöt saadaan toisen asteen yhtälön ratkaisuna P_d

$$P_d^2 - P_d (P_{cr} + N_u + 0,5 \sigma_d P_{cr} (N_u - f_{cd} A_c) / M_u) + P_{cr} N_u = 0$$

$$\text{jossa } A = P_{cr} + N_u + 0,5 P_{cr} \sigma_d (N_u - N_c) / M_u$$

$$B = P_{cr} N_u$$

$$P_d = A/2 - 0,5(A^2 - 4B)^{1/2} \quad 6462 \text{ kN}$$

$$P_d = A/2 + 0,5(A^2 - 4B)^{1/2} \quad 435 \text{ kN}$$

$$\text{Paalukuorma käyttörajatilassa } P_k = P_d / 1,3 = 334,632032 \text{ kN}$$

Paalun rakenteellinen kestävyys määrää paalun kapasiteetin

Paalun puristuskestävyyden mitoitus, kun kaarevuussäde on 180

PAALUN PURISTUSKESTÄVYYDEN MITOITUS

1. LÄHTÖTIEDOT

Teräsputken ulkohalkaisija	RR140 D=	193	mm
seinämän paksuus	t=	4	mm
Sisäteräksen halkaisija	d _r =	171	mm
Betoniterästen kpl-määrä	n=	1	kpl
Korroosiovähenys (Eurocode 3 Design of steel structures: Part 5 Piling)	s(t)=	2,5	mm
mitoitettava aika on	t=	100	v
Betonin lujuus	K	40	MN/m ²
ominaispuristuslujuus	f _{ck} =	28	
betonin materiaosavarmuuskerroin	γ _c =	1,5	
Betoniteräksen myötöjännitys A500H	f _{yk} =	500	MN/m ²
betoniteräksen materiaosavarmuuskerroin	γ _{rs} =	1,2	
Rakenneteräksen myötöjännitys S440	f _{syd} =	440	MN/m ²
paaluteräksen materiaosavarmuuskerroin	γ _s =	1,1	
g on pitkäaikaisen kuorman osuus koko kuormasta q	g	0,85	
Kokonaiskuorma	q	1	1
Betonilla täytetty teräsosa : estetty sivusiirtyvyys	λ _{max} = 0,8/α _c	RR140, B54	
vapaa sivusiirtyvyys	λ _{max} = 0,5/α _c	RR140, B55	
suljettu leikkauslujuus	c _{uk} =	30	kPa
Alkukaarevuussäde	R ₀ =	180	m
Tavoite paalukuormalle	P _k =	990	kN

PAALUN PURISTUSKESTÄVYYDEN MITOITUS

2. POIKKILEIKKAUKSEN TYSSÄYTYMIS- JA MOMENTTIKAPASITEETTI

$$N_p = N_u = A_c f_{cd} + A_r f_{yd} + A_s f_{yd} =$$

$$N_u =$$

$$M_u =$$

betoniosakerroin $0.1 < \alpha_c < 0.8$

$$\alpha_c = A_c f_{cd} / N_p =$$

3. JÄYKKYYDET

Betonipoikkileikkaus	$E_{cd} I_c$	1150,0 kNm ²	$E_{cd} A_c$	537589,3349
Teräsydin	$E_{rd} I_r$	0,0 kNm ²	$E_{rd} A_r$	164,9
Teräsputki	$E_{sd} I_s$	784,3 kNm ²	$E_{sd} A_s$	175772,1
Yhteensä	EI=	1914,2 kNm²	EA	713526,4

4. NURJAHDUSKESTÄVYYS

Nurjahduspituus savikerroksessa

$$L_{cr} = \pi \sqrt{EI_1 / (k_{sd} D)} = 3,7 \text{ m}$$

$$\text{suoran paalun nurjahduskuorma } P_{cr} = 2(k_{sd} DEI_1)^{0,5} = 3572,3 \text{ kN}$$

POIKKILEIKKAUKSEN PURISTUSKESTÄVYYS ALKUKÄYRILLE PAALUILLE

$$\text{kriittinen kuorma maan murtuessa } P_d < P_{cr} / (1 + k_{sd} \sigma_o / P_M) = 2515 \text{ kN}$$

kun $\sigma_o = L_{cr}^2 / 8R_o$

$$\text{kriittinen kuorma paalun murtuessa } P_d / N_u + M_{tot} / N_u M_u \times (N_u - N_c) < 1 \quad (1)$$

$$N_c = f_{cd} A_c \quad (2)$$

$$M_{tot} = 0,5 P_d \sigma_o / (1 - P_d / P_{cr}) = M_o / (1 - P_d / P_{cr}) \quad (3)$$

$$M_o = 0,5 P_d \sigma_o \quad (4)$$

Ratkaisemalla (1)...(4) yhtälöt saadaan toisen asteen yhtälön ratkaisuna P_d

$$P_d^2 - P_d (P_{cr} + N_u + 0,5 \sigma_o P_{cr} (N_u - f_{cd} A_c) / M_u + P_{cr} N_u) = 0$$

jossa $A = P_{cr} + N_u + 0,5 P_{cr} \sigma_o (N_u - N_c) / M_u$
 $B = P_{cr} N_u$
 $P_d = A / 2 - 0,5 (A^2 - 4B)^{1/2} = 6014 \text{ kN}$
 $P_d = A / 2 + 0,5 (A^2 - 4B)^{1/2} = 507 \text{ kN}$

$$\text{Paalukuorma käyttörajatilassa } P_k = P_d / 1,3 = 390,06639 \text{ kN}$$

Paalun rakenteellinen kestävyys määrää paalun kapasiteetin

PDA-mittauskuvaajat paaluista 65, 163 ja 164

Merkinnät

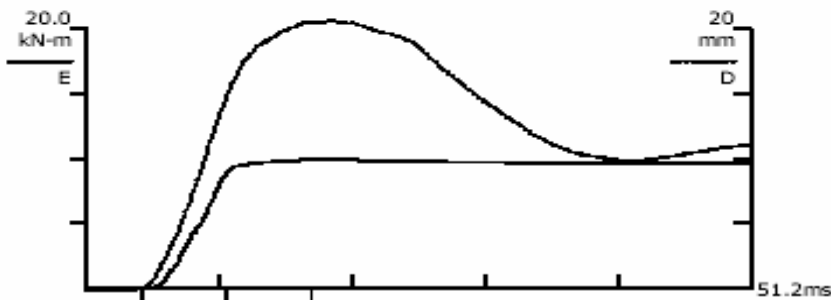
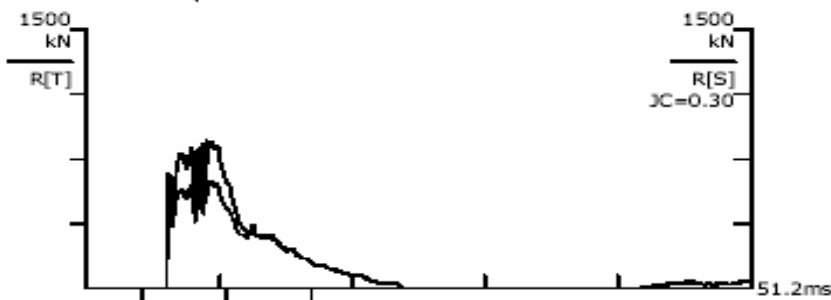
BN	iskun numero
FMX	iskusta paaluun syntynyt maksimi puristusvoima
VMX	iskusta paaluun syntynyt maksimi partikkelinopeus
DMX	paalun yläpään maksimi siirtymä
EMX	paaluun siirtynyt maksimi energia
RMX	staattinen murtokuorma
CSX	paalun maksimi puristusjännitys
TSX	paalun maksimi vetojännitys
BTA	paalun ehjyysarvo
LTD	pituus antureista vaurioon
LE	paalun mittauspituus antureista alapäin
AR	paalun poikkipinta-ala
EM	paalun kimmokerroin
SP	paalun tilavuuspaino
WS	iskuaallon nopeus
EA/C	impedanssi, dynaaminen jäykkyys

F3, F4, A3, A4
voima- ja kiihtyvyyssanturit

Kuvaajat

1. voimakäyrä F ja nopeuskäyrä V (x impedanssi Z)
2. iskuaaltokäyrä alas WD ja ylös WU
3. lyöntivastuskäyrä R vaimennuskertoimilla $JC = 0$ ja $JC = 0,3$
4. paaluun siirtyvä energia E ja paalun yläpään siirtymä D

BN 1
 25.10.2004 15:38:49
 FMX 868 kN
 VMX 3.22 m/s
 DMX 21 mm
 EMX 9.9 kN-m
 RMX 630 kN
 CSX 31.6 MPa
 TSX 3.2 MPa
 BTA 11.0 (%)
 LTD 6.9 m
 LE 24.3 m
 AR 274.65 cm²
 EM 37031 MPa
 SP 24.5 kN/m³
 WS 3850.0 m/s
 EA/C 264 kN-s/m



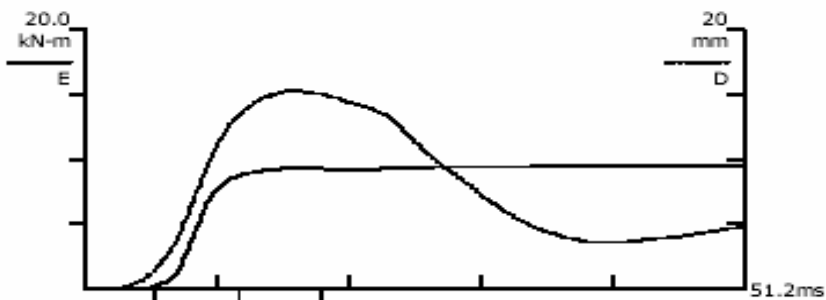
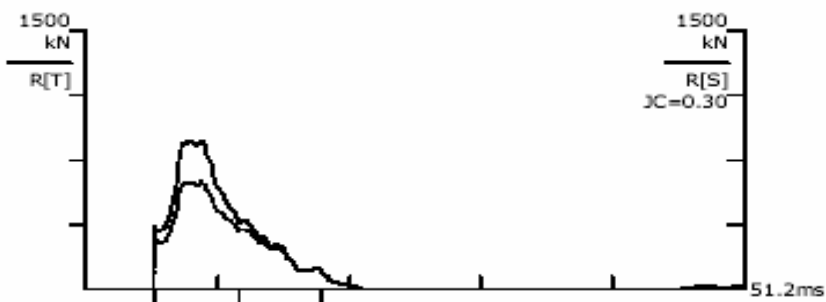
F4 A34

F4: [8087] 96.9 (1.1)
 A3: [2148] 325 mv/5000g's (1)
 A4: [2256] 310 mv/5000g's (1)

BN 2
 25.10.2004 14:29:34
 FMX 1016 kN
 VMX 2.49 m/s
 DMX 15 mm
 EMX 9.5 kN-m
 RMX 623 kN
 CSX 37.0 MPa
 TSX 4.8 MPa
 BTA 100.0 (%)
 LTD 0.0 m
 LE 24.3 m
 AR 274.65 cm²
 EM 37031 MPa
 SP 24.5 kN/m³
 WS 3850.0 m/s
 EA/C 264 kN-s/m

F3 A34

F3: [8059] 93.4 (1)
 A3: [2148] 325 mv/5000g's (1)
 A4: [2256] 310 mv/5000g's (1)

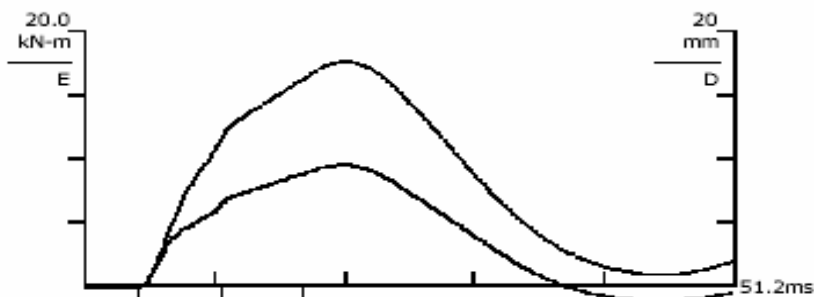
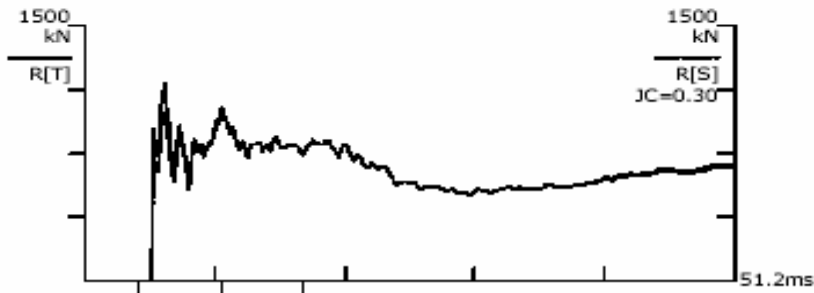
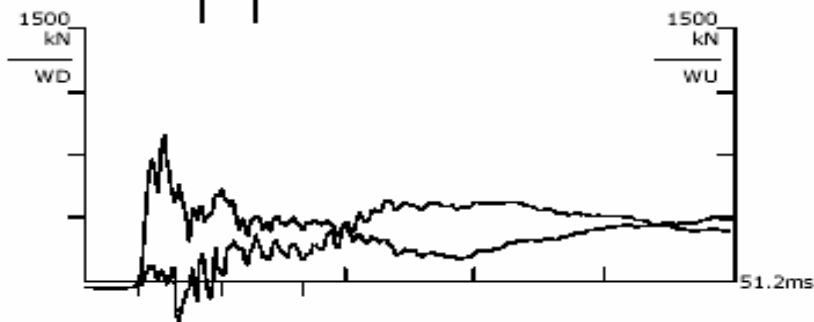
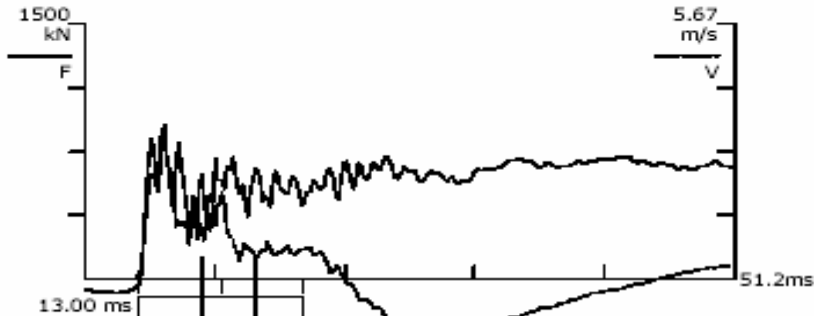


BN 5
 25.10.2004 11:49:07
 FMX 899 kN
 VMX 3.15 m/s
 DMX 18 mm
 EMX 9.5 kN-m
 RMX 999 kN
 CSX 32.7 MPa
 TSX 0.0 MPa
 BTA 6.0 (%)
 LTD 17.2 m

 LE 24.3 m
 AR 275.00 cm²
 EM 37031 MPa
 SP 24.5 kN/m³
 WS 3850.0 m/s
 EA/C 265 kN-s/m

F3 A34

F3: [8059] 93.4 (0.85)
 A3: [2148] 325 mv/5000g's (1.2)
 A4: [2256] 310 mv/5000g's (1.2)



PIT-mittauskuvaajat paaluista 38 ja 43

Skanska Tekra Oy

28.10.2004

AS OY ASEMAKATU 4, SALO

C:\data\Siirto\PIT-As Oy Asemakatu 4, Salo\PIT-As Oy Asemakatu 4, Salo.PIT

PIT-W™ 2003-1

