

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Yhdyskuntatekniikka
Mia Nurmira

Opinnäytetyö

Esiännitetyt betonipaalin lyöntikokeet

Työn ohjaaja
Työn tilaaja
Tampere 4/2010

Lehtori, DI Hannele Kulmala
Skanska Infra Oy, Ohjaaja DI Tommi Hakanen

| | |
|-----------------|--------------------------------------------|
| Tekijä | Mia Nurmira |
| Työn nimi | Esijännitetyn betonipaalun lyöntikokeet |
| Sivumäärä | 46 sivua |
| Valmistumisaika | Huhtikuu 2010 |
| Työn ohjaaja | DI Hannele Kulmala |
| Työn tilaaja | Skanska Infra Oy, Ohjaaja DI Tommi Hakanen |

TIIVISTELMÄ

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin esijännitettyjen paalujen soveltuvuutta Suomen maaperäolosuhteisiin. Tämä työ tehtiin, koska haluttiin tutkia mahdollista vaihtoehtoa Suomessa tällä hetkellä käytössä oleville paaluille.

Työssä tutkittaville paaluille suoritettiin kaksi koepaalutusta. Koekohteissa oli erilaiset pohjaolosuhteet, jotta nähtäisiin, miten paalut käyttäytyivät erilaisissa maaperäolosuhteissa. Tärkeimpänä tutkimusmenetelmänä oli PDA-mittaus. Mittauksen avulla saatiin selville esimerkiksi paalun ehjyys, geotekninen murtokestävyys ja paaluun kohdistuvat lyöntijännitykset.

Tuloksina saatiin tietoa paaluihin kohdistuvista voimista, ja siitä miten hyvin paalut pysyivät ehjinä. Lisäksi saatiin paljon selville paalun ominaisuuksista. Se on esimerkiksi kevyempi rakenteeltaan kuin tavallinen teräsbetonipaalu, ja sen valmistuksessa tulee materiaalisäästöjä, kun betonia ja terästä ei tarvitse niin paljon. Myös paalun kuljetuskestävyys on hyvä. Esijännitetyllä paalulla on siis monia hyviä ominaisuuksia, joiden takia sen käyttöä tulevaisuudessa kannattaa harkita.

| | |
|----------------------|-----------------------------------------------------|
| Writer | Mia Nurmiranta |
| Thesis | Test piling of prestressed concrete piles |
| Pages | 46 pages |
| Graduation time | April 2010 |
| Thesis supervisor | Hannele Kulmala (M. Sc.) |
| Co-operating company | Skanska Infra Oy, Supervisor Tommi Hakanen (M. Sc.) |

ABSTRACT

The purpose of this study is to test how the prestressed pile reacts in Finnish soil conditions. This study was conducted because it is important to know, if there is another choice for piles that are currently used in Finland.

The piles in this study were test piled in two different places which had different soil conditions. The main research method was Pile Driving Analyser which gives information for example about the integrity of the pile and geotechnical failure resistance. The result was a lot of information about the forces exerted to the piles and also about the integrity of the piles.

In the future these results can be used if the use of prestressed pile is studied more. Based on the results you can for example examine to which soil conditions the prestressed pile is the most convenient, and what kind of work sites it can be used. The prestressed pile has other good features too, such as lighter structure compared to ordinary reinforced concrete pile. Also the manufacturing of prestressed pile uses less steel and concrete. All these good features make the prestressed pile a considerable choice for piles currently used in Finland.

Alkusanat

Haluaisin kiittää Skanska Infra Oy:tä, joka mahdollisti tämän opinnäytetyön tekemisen. Erityiskiitoksen ansaitsee Tommi Hakanen, joka jaksoi auttaa minua työni kanssa muiden kiireidensä ohella.

Tampereen ammattikorkeakoulusta haluan kiittää ohjaavaa opettajaani Hannele Kulmalaa, jolta sain hyödyllisiä vinkkejä työni tekemiseen.

Suurimmat kiitokset ansaitsee kuitenkin perheeni, joka on tukenut minua sekä henkisesti että rahallisesti koko opiskeluni ajan.

Tampereella 22.4.2010

Mia Nurmiranta

Sisällysluettelo

| | |
|------------------------------------------------------|----|
| 1 Johdanto | 7 |
| 1.1 Tausta | 7 |
| 1.2 Tavoitteet..... | 7 |
| 1.3 Rajaukset..... | 7 |
| 1.4 Työn suoritus..... | 8 |
| 2 Paalutus Suomessa | 9 |
| 2.1 Yleistä | 9 |
| 2.2 Betonipaalujen historia..... | 9 |
| 2.2 Suomessa yleisesti käytettävät paalutyypit | 10 |
| 2.2.1 Tukipaalut | 11 |
| 2.2.2 Kitkapaalut | 11 |
| 2.2.3 Koheesiopaalut..... | 12 |
| 2.3 Paalutusta käsittelevät ohjeet | 13 |
| 3 Lyöntikokeissa käytetty esijännitetty paalu | 14 |
| 3.1 Materiaali | 14 |
| 3.2 Valmistus | 14 |
| 3.3 Mitat | 15 |
| 3.4 Siirtäminen ja kuljetus | 16 |
| 3.5 Sallitut puristus- ja vetojännitykset..... | 16 |
| 4 Koepaalutuskohteet | 19 |
| 4.1 MAP-kirkko, Pellervonkatu, Tampere..... | 19 |
| 4.2 Skanskan varikko, Piikkiö..... | 21 |
| 5 Paaluille suoritettut mittaukset | 24 |
| 5.1 PDA-mittaus yleisesti | 24 |
| 5.2 PDA-mittausten tulokset | 26 |
| 5.2.1 MAP-kirkko, Pellervonkatu, Tampere..... | 26 |
| 5.2.2 Skanskan varikko, Piikkiö..... | 32 |
| 6 Johtopäätökset..... | 45 |
| 7 Lähteet..... | 46 |

PDA- Mittauksissa käytettävät lyhenteet

| | |
|-------------|------------------------------------------------------------------|
| BN | iskun numero |
| FMX | iskusta paaluun syntynyt maksimi puristusvoima |
| RMX | mobilisoitunut staattinen vastus RMX-estimaattia käyttäen |
| CSB | laskennallinen jännitys paalun kärjessä |
| CSX | paalun maksimi puristusjännitys koko poikkileikkauksessa |
| CSI | suurin hetkellinen puristusjännitys yksittäisen anturin kohdalla |
| VMX | iskusta paaluun syntynyt maksimi partikkelinopeus |
| EMX | paaluun siirtynyt maksimi energia |
| DMX | paalun yläpäähän maksimi siirtymä (= painuma + jousto) |
| FVP | mitatun voiman ja nopeuden yhtämittaisuus |
| LE | paalun mittauspituus antureista alapäin |
| AR | paalun poikkipinta-ala |
| EM | paalun kimmokerroin |
| SP | paalun tilavuuspaino |
| WS | iskuaallon nopeus |
| EA/C | impedanssi, dynaaminen jäykkyys |
| F1, F2, F3, | |
| F4 | Voima-anturit |
| A1, A2 | Kiihtyvyyssanturit |

1 Johdanto

1.1 Tausta

Rakennusala kehittyy jatkuvasti, ja uusien välineiden ja menetelmien kokeileminen on välttämätöntä. Olosuhteet muuttuvat koko ajan, ja näin ollen myös hyväksi havaittuja vanhoja tapoja täytyy päivittää tai muuttaa. Vaikka esijännitetty paalu ei olekaan uusi keksintö, se ei silti ole yleisesti käytössä tämänhetkisessä pohjarakentamisessa Suomessa.

Tässä opinnäytetyössä tutkittavat esijännitetyt paalut valmistetaan Virossa, josta ne kuljetetaan Suomeen. Paalujen käyttökelpoisuutta halutaan tutkia ja miettiä, soveltuisivatko paalut Suomen maaperään lyötäviksi. Esijännitetyllä paalulla on paljon hyviä ominaisuuksia, joiden vuoksi niiden testaaminen kannattaa.

1.2 Tavoitteet

Työn tavoitteena on selvittää, miten esijännitetyt paalut käyttäytyvät Suomen maaperäolosuhteissa ja ovatko ne käyttökelpoisia tulevaisuuden rakentamisessa. Tavoitteena on myös selvittää, millaisiin käyttökohteisiin paaluja mahdollisesti voitaisiin käyttää jatkossa.

1.3 Rajaukset

Työssä tutkitaan vain sitä, kestävätkö paalut Suomen olosuhteissa. Työ ei ota kantaa siihen ovatko esijännitetyt paalut edullisempia tai kannattavampia kuin muut käytössä olevat paalut. Taloudellinen puoli jätetään siis rajauksen ulkopuolelle.

1.4 Työn suoritus

Esijännitetyille paaluille suoritettiin syksyllä 2009 kaksi koepaalutusta: toinen Tampereella ja toinen Piikkiössä. Kohteissa on erilaiset maaperäolosuhteet. Paaluille tehtiin PDA-mittauksia, joilla saatiin selville paaluihin kohdistuvat lyöntijännitykset ja paalujen ehjyys.

2 Paalutus Suomessa

2.1 Yleistä

Paalutuksella tarkoitetaan maaperän kantavuuden parantamista lyömällä maahan paaluja, jotka siirtävät yläpuolella olevan kuorman paremmin kantaville maakerroksille (Jääskeläinen 2009, 52).

2.2 Betonipaalujen historia

Suomessa aiemmin käytetty puupaalu alkoi hiljalleen väistyä 50-luvulla betonipaalun tieltä. Ensimmäisiä betonipaaluja olivat esijännitetyt jännebetonipaalut, joihin otettiin mallia Ruotsista ja Tanskasta. Muita syitä esijännitetyn paalun käyttöön oli sen kilpailukykyinen rakenne sekä valmistajien tieto-taito paalun valmistuksessa. Pian huomattiin kuitenkin, että paalun murtokestävyys on heikko, ja paalu hajosi usein paalutettaessa. Teräsbetonipaalu sopi paljon paremmin Suomen maaperäolosuhteisiin, ja se syrjäyttikin jännebetonipaalun kokonaan 1960–1970-lukujen vaihteessa (Häkämies 2009.)

1960-luvun lopussa tulivat myös käsitteet normaalipaalu ja siltapaalu. Normaalipaaluja käytettiin muun muassa talonrakentamisessa ja siltapaalua esimerkiksi VR:n kohteissa. 1970-luvun alussa tarve yhteiselle ohjeistukselle alkoi olla suuri, ja siksi Suomen Geoteknillinen Yhdistys julkaisi vuonna 1972 Lyöntipaalutusohjeet (LPO). Lyöntipaalutusohjeet käsittivät kaiken paalun rakenteesta työn suorittamiseen. Uusimmat tällä hetkellä käytössä olevat Lyöntipaalutusohjeet on julkaistu vuonna 2005. Uudet ohjeet ilmestyvät vuoden 2010 aikana (Häkämies 2009.)

Paaluja on ollut käytössä monen kokoisia. Teräsbetonipaalut ovat yleisemmin kooltaan 250 x 250 mm tai 300 x 300 mm. 1990- luvulla kuitenkin suunnittelijoiden pyynnöstä alettiin valmistaa myös 350 x 350 mm:n paaluja. Pienempien paalujen (200 x 200 mm) valmistus loppui 1970- luvun alussa. Myös 1960- luvulla valmistetun niin kutsutun kiilapaalun (250 x 300 mm) valmistus lopetettiin 1980- luvun loppuun mennessä (Häkämies 2009.)

Koska paalujen pituudet ovat kuljetuksen ja paalutuskaluston takia rajalliset, paalujatkokset ovat kehittyneet paljon ajan myötä. 1960- luvun loppuun asti käytössä ollut jatkohylsy korvattiin ruotsalaisella momenttia kestäväällä jatkoksella. Nykyään markkinoita hallitsee ABB- ja Lohja III-jatkos (Häkämies 2009.)

Paalun valmistus on kehittynyt modernin teknologian mukana, ja valmistuksessa käytetyt koneet ja laitteet ovat yleensä paalun valmistajan itse kehittämiä. Kuitenkin paalut on lähes aina valmistettu kiinteillä ja pitkillä muoteilla. 1980- luvun lopussa paalun valmistusta tuli helpottamaan raudoituksen hitsausautomaatti. Nykyisin Suomessa on paljon eri valmistajia (Häkämies 2009.)

Paalujen käyttö on vaihdellut yleisten suhdanteiden mukana. Suhteellinen käyttö on kuitenkin kasvanut koko ajan, sillä nykyään rakennetaan myös huonommin kantaville maaperäolosuhteille. Rakennuspaikkaa ei enää valita maaperän mukaan, vaan pohjanvahvistusmenetelmä valitaan rakennuspaikan mukaan. 1990- luvun lopulla paaluja lyötiin maahan n. 2000 kilometriä vuodessa, mutta lama vähensi määrän jopa alle puoleen siitä. 2000- luvulla määrät ovat taas tasaisesti lisääntyneet (Häkämies 2009.)

2.2 Suomessa yleisesti käytettävät paalutyypit

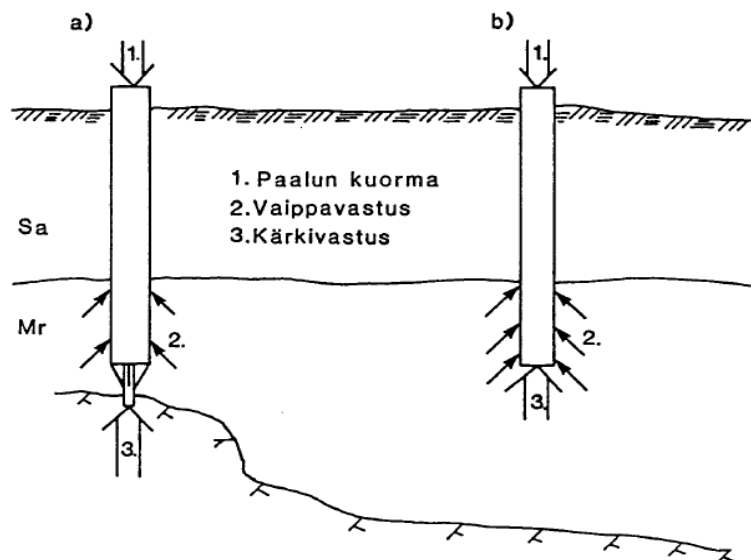
Suomessa käytettävät paalut voidaan jaotella paalujen toimintatavan perusteella kolmeen ryhmään: tukipaaluihin, kitkapaaluihin ja koheesiopaaluihin.

2.2.1 Tukipaalut

Tukipaalut siirtävät kuormat kärjen välityksellä kallioon tai muuhun tiivisrakenteiseen maakerrokseen. Kalliopinnan muodot selvitetään tarkasti kun:

- koheesiomaakerrokset (savi/siltti) ylettyvät kallionpintaan saakka.
- kaltevan kallionpinnan päällä on karkearakeinen kerros.
- kaltevan kallionpinnan päällä oleva karkearakeinen kerros on ohut.

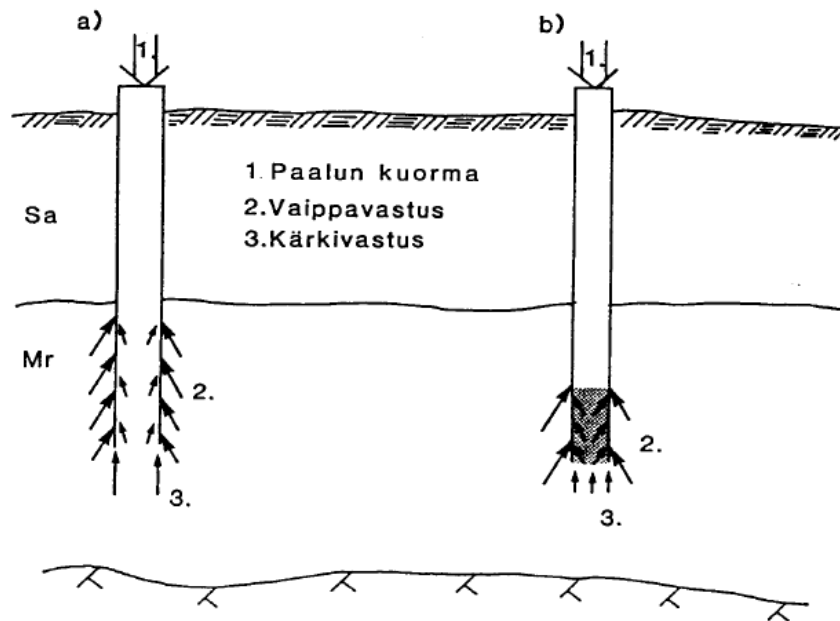
Jos kallion päällä oleva karkearakeinen kerros on niin tiivis, että se pystyy kantamaan paalut, voidaan tukipaalut lyödä myös siihen (Ks. kuva 1) (Teräspuutkipaalut 1999, 10-13.)



Kuva 1: Tukipaalun toimintatapa (Teräspuutkipaalut 1999,13)

2.2.2 Kitkapaalut

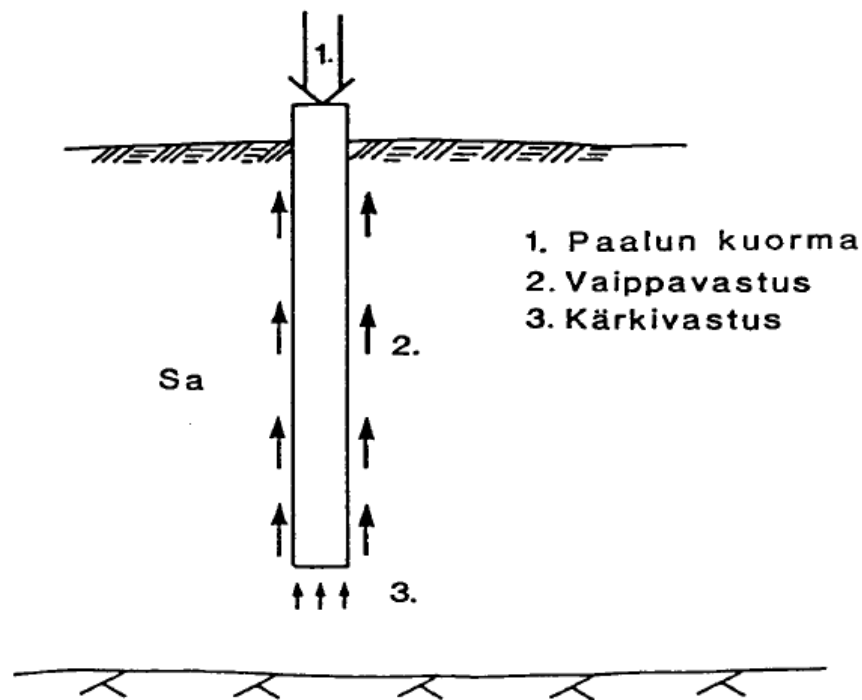
Kitkapaalujen kantavuus perustuu paalun ja maan väliseen kitkaan. Kitkapaalut tulevat yleensä silloin kyseeseen, jos kallio on erittäin syvällä ja tukipaalujen käyttö tulisi liian kalliiksi. Kun kitkapaaluja käytetään, selvitetään maakerrosten väliset rajat ja tiiviydet niistä kerroksista, jotka paalu läpäisee, sekä siitä kerroksesta, johon paalu tukeutuu (Ks. Kuva 2) (Teräspuutkipaalut 1999, 10,14.)



Kuva 2: Kitkapaalun toimintatapa (Teräspalkkipaalut 1999, 14)

2.2.3 Koheesiopaalut

Koheesiopaalut siirtävät yläpuoliset kuormat paalun vaippapinnalle syntyvän adheesion avulla koheesiomaakerroksille. Sen kantavuus perustuu siis saven ja paalun välillä olevaan tartuntaan (Ks. Kuva 3). Koheesiopaaluina käytetään yleisimmin puupaaluja, mutta niitä ei juurikaan käytetä pysyvissä rakenteissa (Jääskeläinen 2009, 72–73.)



Kuva 3: Koheesiopaalun toimintatapa (Teräsputkipaalut 1999, 15)

2.3 Paalutusta käsittelevät ohjeet

Tällä hetkellä paalutuksessa ovat käytössä Suurpaalutusohjeet 2001, Lyöntipaalutusohjeet 2005 sekä Pienpaalutusohjeet 2007. Nämä ohjeet kuitenkin korvautuvat lähiaikoina julkaistavalla Paalutusohjeet 2010-julkaisulla, jonka tavoitteena on uudistaa ohjeiden rakennetta ja sopeuttaa ne Eurokoodijärjestelmään. Eurokoodien ensimmäiset viralliset käytöt alkoivat syksyllä 2007, mutta niiden laajamittaisempi käyttö alkaa alkuvuodesta 2010 (Törnqvist 2009.)

Marraskuussa 2009 julkaistussa Paalutusohjeiden lausuntoversiossa ei ole juurikaan mainintoja esijännitetystä paalusta. Ainoastaan mainitaan, että lyöntikalustosta paaluun siirtyvää energiaa laskettaessa täytyy ottaa huomioon paalun mahdollinen esijännitys (Paalutusohjeet 2010 lausuntoversio, 33.)

3 Lyöntikokeissa käytetty esijännitetty paalu

3.1 Materiaali

Esijännitetyt paalut valmistetaan betonista, johon lisätään teräskuitua. Betonin lujuusluokan täytyy olla vähintään C45/55. Teräskuitua, Novocon HE 1050, sekoitetaan 20–40 kg/m³, riippuen siitä kuinka paljon valmiin materiaalin vaadittu kantavuus on (Valgur 2009, 2.)

Teräskuitua lisäämällä betoni kestää paremmin halkeilua, ja se on sitkeämpää. Lisäksi iskunkestävyys, väsytykestävyys ja leikkauslujuus ovat parempia. Kuituraudoituksen käyttäminen vähentää myös raudoituksesta syntyviä kustannuksia. Paaluihin käytettävä esijännitetty jännepunos on halkaisijaltaan 9,3 mm olevaa jännepunosta (Valgur 2009, 2.)

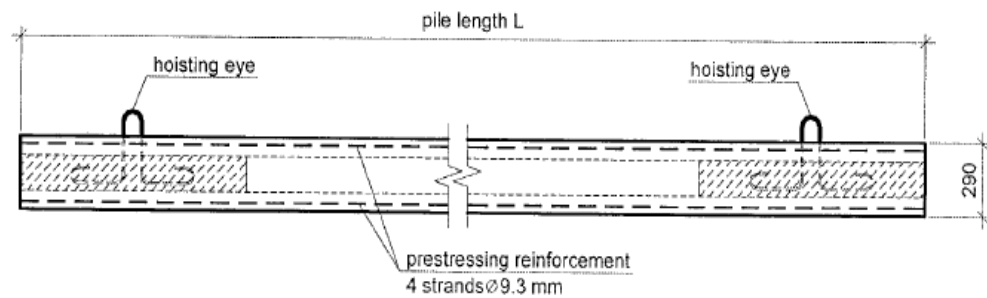
3.2 Valmistus

Valmistuspaikka tässä opinnäytetyössä tutkittaville esijännitetyille paaluille on Virossa sijaitseva AS Tartu Maja Betoontooded. Yritys on aloittanut toimintansa vuonna 1961 ja keskittää toimintaansa nykyisin betonielementtien valmistamiseen.

Esijännitetyt betonipaalut valmistetaan samalla tavalla kuin ontelolaatat. Paalut valetaan pitkillä valualustoilla käyttämällä liukuvalukoneita. Paalujen valmistuksessa ei tarvita muotteja. Betoni tiivistetään tärytiivistyksellä. Betonin jännityssiirtolujuuden täytyy olla vähintään 25 MPa (Valgur 2009, 3.)

Paaluissa käytetään symmetrisesti jokaisessa kulmassa jännepunosta (kuva 5), joka vahvistaa paalua pituussuunnassa. Teräskuidut, joita lisätään betoniin, vahvistavat paalua poikittaissuunnassa. Kun vaadittu jännityssiirtolujuus on saavutettu, leikataan betonista timanttisahalla halutun pituisia paaluja (Valgur 2009, 3.)

Paalujen sisällä on ontelo, jota täytetään betonilla metrin pituudelta molemmista päistä. Nostolenkit laitetaan paalun molempiin päihin. Jos paalut ovat pidempiä kuin 9 m, nostolenkit laitetaan $0,2 \times L$ (m) paalun päistä (L = Paalun pituus metreinä). Kuvassa 4 on esitetty paalun pituusleikkaus, jossa näkyy nostolenkkien paikat (Valgur 2009, 3.)

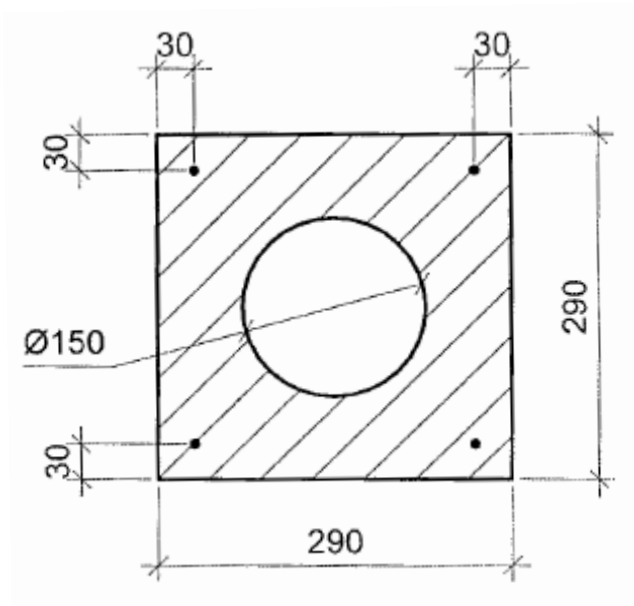


Kuva 4: Esijännitetyn paalun pituusleikkaus (Valgur 2009, 2)

3.3 Mitat

Paalujen poikkileikkaus on 290 x 290 mm ja pituus 3-15 m. Paaluja voidaan kuitenkin jatkaa teräsjatkoilla tai muilla liitosmenetelmillä. Paalujen keskellä oleva ontelo on halkaisijaltaan 150 mm. Paalun sisällä olevien esijännitettyjen jännepunosten paikat ja paalun muut mitat on esitetty kuvassa 5 (Valgur 2009, 3.)

Paalut, joita tässä opinnäytetyössä tutkittiin, olivat alkuperäisiltä mitoiltaan 15 000 x 290 x 290 (mm) ja 12 000 x 290 x 290 (mm).



Kuva 5: Esijännitetyn paalun poikkileikkaus (Valgur 2009, 3)

3.4 Siirtäminen ja kuljetus

Paaluja voidaan nostaa ja siirtää ainoastaan nostamalla nostolenkeistä, jotka sijaitsevat paalujen molemmissa päissä. Paalut kuljetetaan Virossa maita pitkin rekalla, jossa on paalujen nostamiseen soveltuva nosturi (Valgur 2009, 3.)

3.5 Sallitut puristus- ja vetojännitykset

Puristusjännitys

Sallittu puristusjännitys lasketaan Paalutusohjeet 2010 lausuntoversion mukaan seuraavalla tavalla:

$$0,8 \cdot f_{ck} \quad (1)$$

Jossa

f_{ck} = Betonin ominaispuristuslujuus

Näissä paaluissa käytetty betoni on C45/55, jolloin sen ominaispuristuslujuus on 45 N/mm². Koska paalussa oleva esijännitys on otettava huomioon, täytyy esijännityksestä aiheutuva voima vähentää betonin ominaispuristuslujuudesta. Näin paalun sallittu puristusvoima lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$0,8 \cdot f_{ck} - \text{esijännitys} \quad (2)$$

Yhdessä teräksessä esijännitys on 700 MPa eli 700 N/mm². Paalussa on yhteensä 4 terästä joiden kunkin pinta-ala on 52 mm²:

$$4 \cdot 700 \text{ N/mm}^2 \cdot 52 \text{ mm}^2 = 145\,600 \text{ N} \quad (3)$$

Paalun poikkileikkauksen pinta-ala on 66 429 mm². Näillä luvuilla voidaan laskea paalussa vaikuttava esijännitys.

$$\frac{145\,600 \text{ N}}{66\,429 \text{ mm}^2} = 2,19 \text{ MPa} \quad (4)$$

Saadut luvut sijoitetaan kaavaan 2. Tästä saadaan paalulle sallittu puristusjännitys:

$$0,8 \cdot 46 \text{ MPa} - 2,19 \text{ MPa} = 33,81 \text{ MPa}$$

Vetojännitys

Sallittu vetojännitys lasketaan Paalutusohjeet 2010 lausuntoversion mukaan kaavalla:

$$\frac{0,9 \cdot f \cdot A}{A_{Paalu}} \quad (5)$$

Jossa

f = Raudoituksen ominaismyötölujuus

A = Raudoituksen pinta-ala

A_{Paalu} = Paalun poikkileikkauksen pinta-ala

Tässä opinnäytetyössä tutkittavilla paaluilla arvot ovat seuraavat:

$$f = 1860 \text{ MPa}$$

$$A = 208 \text{ mm}^2$$

$$A_{Paalu} = 66\,429 \text{ mm}^2$$

Koska esijännitys on otettava jännityksiä laskettaessa huomioon, vähennetään raudoituksen ominaismyötölujuudesta paalun esijännitys 700 MPa. Sijoittamalla luvut kaavaan 3 saadaan paaluille sallittu vetojännitys:

$$\frac{0,9 \cdot (1860 \text{ MPa} - 700 \text{ MPa}) \cdot 208 \text{ mm}^2}{66\,429 \text{ mm}^2} \approx 3,27 \text{ MPa}$$

4 Koepaalutuskohteet

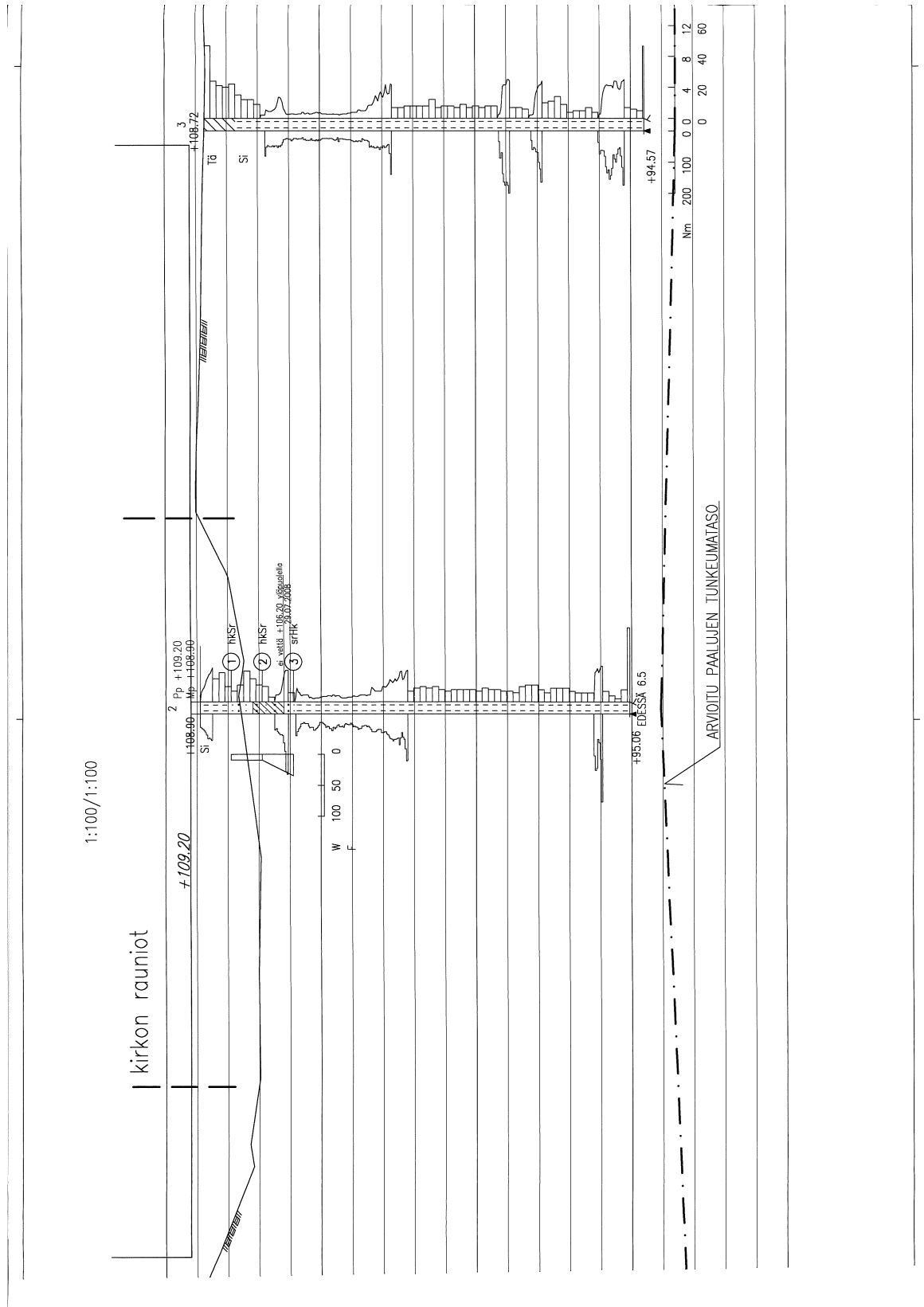
4.1 MAP-kirkko, Pellervonkatu, Tampere

Ensimmäinen koepaalutuskohte sijaitsee Tampereella Kalevassa. Koepaalutukset suoritettiin 15.9.2009. Kaiken kaikkiaan paaluja lyötiin maahan kolme kappaletta. Paalut olivat pituudeltaan 15 metriä. Paalutuksessa käytettiin Junttan PM 23 - paalutuskonetta, jossa on 4 tonnin vapaasti putoava hydraulijärkäle. Paalutuskone on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6: Paalutuskone Junttan PM 23

Geotesti on tehnyt kirkon työmaalle pohjatutkimussuunnitelman. Suunnitelma on tehty ennen rakennustöiden alkamista. Suunnitelmasta selviää, että täytemaakerroksen alla on 13,9–17,6 m paksu koheesiomaakerros. Paalut lyödään tämän maakerroksen läpi tiiviiseen moreeniin tai kallioon. Kuvassa 7 on esitetty kirkon maaperäkairauksen tulokset. Kairauspiste 2 edustaa hyvin työmaalla vallitsevia maaperäolosuhteita. Kuvassa 8 esijännitetyjä paaluja lyödään maahan kirkon työmaalla.



Kuva 7: Kairauskuva kirkon työmaalta.



Kuva 8: Esijännitetyn paalun lyönti kirkon työmaalla. Taustalla tavallisia raudoitettuja betonipaaluja.

4.2 Skanskan varikko, Piikkiö

Toinen paalutuskohte oli Skanskan varikolla Piikkiössä. Koepaalutukset tehtiin 30.10.2009. Paaluja lyötiin maahan kolme kappaletta. Paalujen pituudet olivat 6,0 m ja 6,35 m. Paalutuksessa käytettiin Junttan PM 20 -paalutuskonetta, jossa on 4 tonnin kiihdytetty pudotusjärkäle (HHK4AL). Kuvassa 9 on esitetty Junttan PM 20.



Kuva 9: Paalutuskone Junttan PM 20

Skanskan varikosta ei löytynyt tarkkaa pohjatietoa, mutta paaluja lyötiin piha-alueella murskeeseen tai kallioon. Paaluja ei lyöty kovin syväälle maahan. Tarkoituksena oli ainoastaan testata, kuinka paljon kuormitusta paalut kestävät. Paaluja ei siis jätetty maahan, vaan ne nostettiin pois heti testaamisen jälkeen. Kuvassa 10 näkyy paalun lyöntiä Piikkiössä. Kuvassa näkyy myös paalun vasemman alareunan halkeilut.



Kuva 10: Koepaalun 3 lyöntiä Piikkiössä.

5 Paaluille suoritettut mittaukset

5.1 PDA-mittaus yleisesti

PDA-mittauksella tarkoitetaan dynaamista koekuormitusta, jolla mitataan paalun geoteknistä murtokestävyyttä. PDA-mittauksella voidaan myös tutkia paalun ehjyyttä, paaluun siirtynyttä energiaa, sekä paaluun kohdistuvia lyöntijännityksiä. Mittaus ei kohdistu pelkästään paaluun, vaan lisäksi voidaan tutkia paalutuskaluston toimintaa ja tehokuutta (Hakanen 2008, 31.)

Paaluun kiinnitetään kiihtyvyyssantureita sekä venyvyyssantureita, joilla mitataan paaluun aiheutuvaa iskuaaltoa. Anturit kiinnitetään paalun vastakkaisille puolille pulteilla, joille on porattu reiät. Anturit täytyy kiinnittää lujasti ja huolellisesti kiinni paalun pituuden suuntaisesti, jotta mittaustulos on luotettava (Hakanen 2008, 31.)

Kuvassa 11 on esitetty paaluun kiinnitettävät mittausanturit.



Kuva 11: Paaluun kiinnitetyt mittausanturit.

Mittausanturit on kytketty kaapeleilla kiinni mittaustietokoneeseen, joka voidaan kuljettaa työmaalle esimerkiksi henkilöautolla. Mittauksen tiedot tallentuvat tietokoneelle, josta ne on helppo saada ulos myöhemmin (Hakanen 2008, 31.)
Kuvassa 12 on esitetty PDA- mittauksiin käytettävä tietokone.



Kuva 12: PDA- mittauksessa käytettävä tietokone.

5.2 PDA-mittausten tulokset

5.2.1 MAP-kirkko, Pellervonkatu, Tampere

PDA-mittaus suoritettiin MAP-kirkolla yhteensä kolmelle paalulle: 1A, 3A ja 4A. Mittauksissa käytettiin neljää voima-anturia ja kahta kiihtyvyyssanturia, jotka kiinnitettiin paaluihin. Paaluissa ei käytetty minkäänlaisia kärkiä. Tulokset mitattiin käyttäen Pile Driving Analyser® -laitetta ja PDA-W –analyysiohjelmaa (Hakanen 2010 a, 2.)

Koepaalu 1A

Koepaalulle 1A suoritettiin mittaus vasta upotuksen jälkeen, ja tavoitteena oli mitata geotekninen murtokestävyys ja paalun ehjyys. Paalun loppulyöntipainuma oli 19 mm / 10 lyöntiä. Lyöntienergia loppulyönneissä oli 10 kNm. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 1 (Hakanen 2010 a, 3.)

Taulukko 1: Mittaustulokset koepaalusta 1A (Hakanen 2010 a, 3)

| pl | L [m] | LE [m] | Koekuormitusisk u | | Geotekninen murtokestävyys | Huom. |
|------------------------|----------|-----------|----------------------|-----------|-------------------------------|-------|
| | | | EMX [kNm] | s [mm] | RMX [kN] | |
| Koepaalu 1A | 15 | 14,0 | 28,8 | 6 | 1767 | |

Kuvassa 13 on esitetty koepaalun 1A kuvaajat. Kuvaajien merkitykset ylhäältä alaspäin:

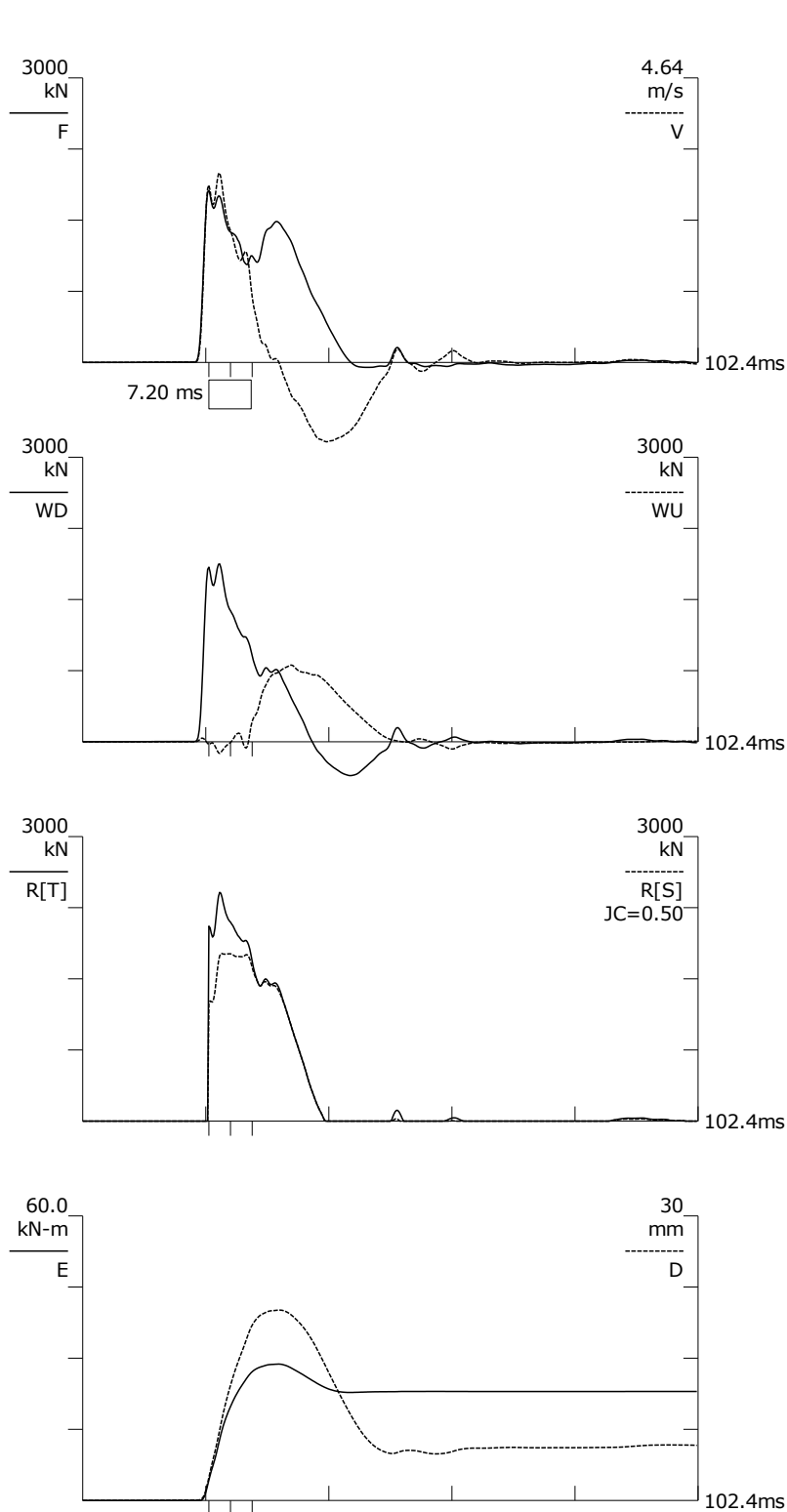
1. voimakäyrä F ja nopeuskäyrä V (x impedanssi Z)
2. iskuaaltokäyrä alas WD ja ylös WU
3. lyöntivastuskäyrä R vaimennuskertoimilla JC=0 ja JC=0,50
4. paaluun siirtyvä energia E ja paalun yläpään siirtymä D

(Hakanen 2010 a, 5).

Skanska Tekra OY

MAP kirkko
PDA OP: THa

PILE DRIVING ANALYZER ®
Version 2003.095.002
koepaalu 1A



BN 37
16.9.2009 13:11:20
FMX 1814 kN
RMX 1767 kN
CSB 33.1 MPa
CSX 27.3 MPa
CSI 29.6 MPa
VMX 3.09 m/s
EMX 28.8 kN-m
DMX 20 mm
FVP 1.0 []

LE 14.0 m
AR 664.29 cm²
EM 37999 MPa
SP 24.5 kN/m³
WS 3900.0 m/s
EA/C 647 kN-s/m

F1234 A12

F1: [A737] 93.7 (1)
F2: [D035] 95.4 (1)
F3: [D044] 92.6 (1)
F4: [D028] 94.6 (1)
A1: [10833] 1065 g's/v (1)
A2: [10832] 1020 g's/v (1)

Kuva 13: Koepaalun 1A kuvaajat (Hakanen 2010 a, 6)

Koepaalu 3A

Koepaalu 3A upotettaessa mitattiin lyöntijännityksiä koko ajan. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 2. Kun upotussyvyys oli noin 13 metriä, tuli paaluun vaurio, jonka paikka oli noin 3,0–3,5 metriä paalun alapäästä. Paalun vaurioitumisen jälkeiset kuvaajat on esitetty kuvassa 14. Kuvaajat ovat samassa järjestyksessä kuin koepaalu 1A:n kohdalla (Hakanen 2010 a, 3.)

Taulukko 2: Koepaalu 3A:n lyöntienergia ja lyöntijännitykset upotussyvyyden mukaan. (Hakanen 2010 a, 3)

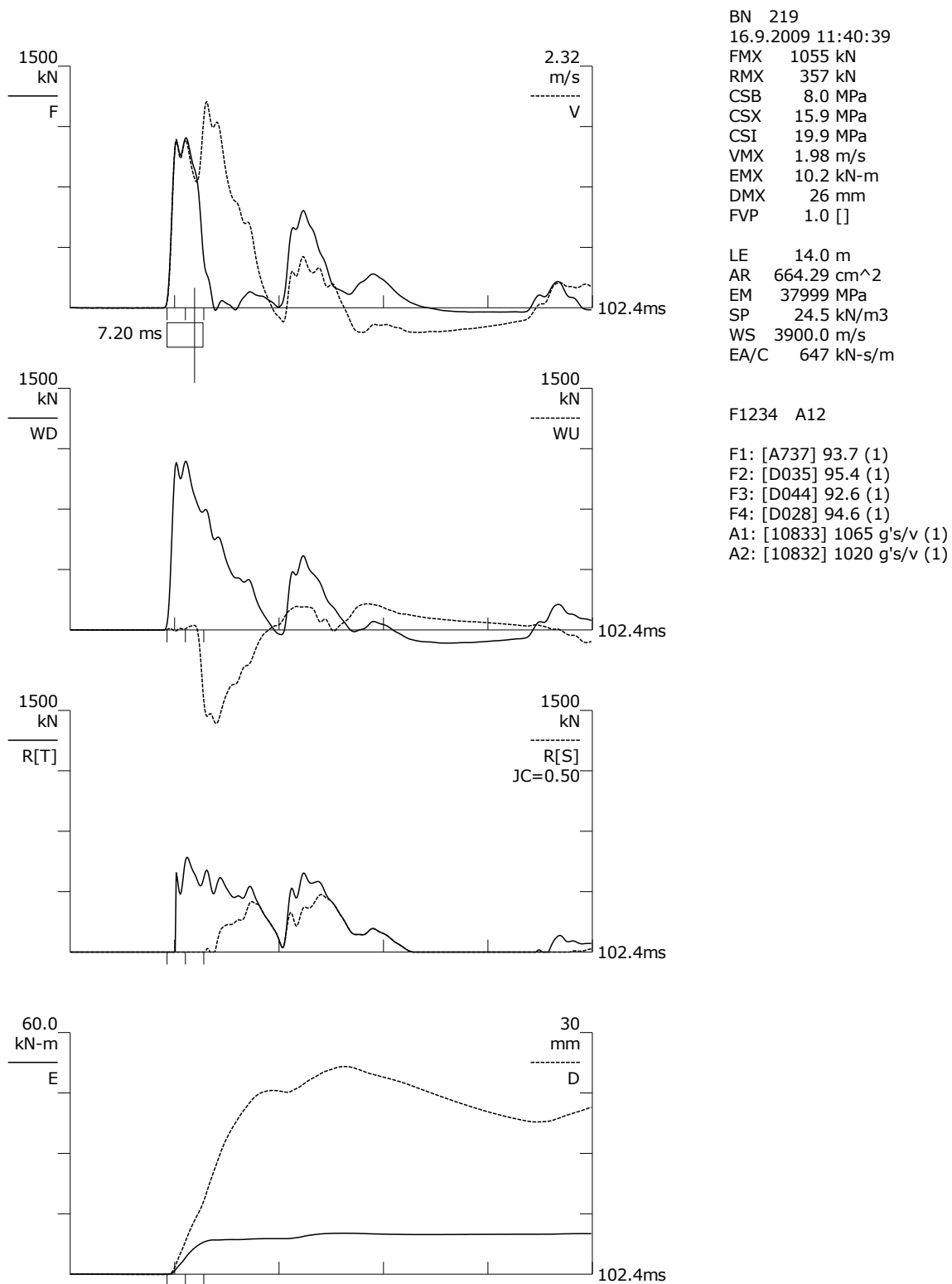
| Syvyys [m] | Lyöntiä / m [kpl] | Lyönti-energia [kJm] | Keskimääräiset lyöntijännitykset [MPa] | | | |
|------------|-------------------|----------------------|----------------------------------------|------|------|-----|
| | | | CSX | CSI | CSB | TSX |
| 0-4 | - | - | - | - | - | - |
| 4-5 | 2 | 9,6 | 15,7 | 22,0 | 4,7 | 2,9 |
| 5-6 | 20 | 9,9 | 15,8 | 21,2 | 5,2 | 1,7 |
| 6-7 | 45 | 10,0 | 16,0 | 19,6 | 4,6 | 2,0 |
| 7-8 | 40 | 10,2 | 15,9 | 19,8 | 4,6 | 1,2 |
| 8-9 | 55 | 10,0 | 15,8 | 19,3 | 5,5 | 1,0 |
| 9-10 | 50 | 10,0 | 15,9 | 19,7 | 5,4 | 1,1 |
| 10-11 | 50 | 10,1 | 15,8 | 19,6 | 4,3 | 1,2 |
| 11-12 | 27 | 10,5 | 16,0 | 19,9 | 4,5 | 1,0 |
| 12-13 | 86 | 10,0 | 15,5 | 19,9 | 12,0 | 0,6 |

Koepaalu 3A:n vaurioitumisesta ei ole tarkkaa syytä, mutta jos vertaa lyöntijännityksiä sallittuihin jännityksiin, huomataan että ne eivät ylittyneet. Sallittu puristusjännitys paalulle on 33,81 MPa ja vetojännitys 3,27 MPa. Paalu vaurioitui alapäästä juuri nostolenkin kohdalta eli mahdollista voisi olla esimerkiksi, että paalussa oli hieman heikompi kohta nostolenkin kohdalla.

Skanska Tekra OY

MAP kirkko
PDA OP: THa

PILE DRIVING ANALYZER ®
Version 2003.095.002
koepaalu 3A



Kuva 14: Koepaalun 3A kuvaajat vaurioitumisen jälkeen (Hakanen 2010

a, 7)

Koepaalu 4A

Koepaalun 4A kohdalla lyöntijännityksiä mitattiin koko upotuksen ajan. Tulokset on esitetty taulukossa 3. Paalun loppulyöntipainumaksi tuli noin 40 mm / 10 lyöntiä, ja lyöntienergia oli tällöin 15,5 kNm. Paalun geotekninen murtokestävyys mitattiin upotuksen jälkeen. Nämä tulokset on esitetty taulukossa 4. Kuvassa 15 on esitetty koepaalun 4A kuvaajat, jotka ovat samassa järjestyksessä kuin edellisissä kuvissa (Hakanen 2010 a, 4.) Tälläkään koepaalulla eivät sallitut puristus- ja vetojännitykset ylittyneet, eli kovempaakin olisi saanut vielä lyödä.

Taulukko 3: Koepaalu 4A:n lyöntienergia ja lyöntijännitykset upotussyvyyden mukaan. (Hakanen 2010 a, 4)

| Syvyys [m] | Lyöntiä / m [kpl] | Lyöntienergia [kNm] | Keskimääräiset lyöntijännitykset [MPa] | | | |
|------------|-------------------|---------------------|----------------------------------------|------|-----|-----|
| | | | CSX | CSI | CSB | TSX |
| 0-1 | 3 | - | - | - | - | - |
| 1-2 | 5 | - | - | - | - | - |
| 2-3 | 3 | 4,0 | 8,9 | 15,0 | 2,5 | 1,4 |
| 3-4 | 3 | 4,8 | 10,7 | 16,8 | 2,0 | 1,6 |
| 4-5 | 11 | 9,9 | 15,7 | 21,4 | 4,4 | 2,1 |
| 5-6 | 53 | 9,0 | 15,4 | 20,1 | 6,0 | 1,7 |
| 6-7 | 72 | 8,9 | 15,1 | 19,1 | 6,3 | 1,3 |
| 7-8 | 77 | 8,8 | 15,1 | 19,1 | 6,4 | 1,0 |
| 8-9 | 91 | 8,7 | 15,0 | 19,6 | 7,8 | 0,7 |
| 9-10 | 77 | 10,1 | 16,3 | 19,4 | 6,8 | 0,7 |
| 10-11 | 58 | 10,7 | 16,5 | 19,1 | 5,2 | 0,7 |
| 11-12 | 47 | 10,9 | 16,5 | 19,3 | 3,4 | 0,7 |
| 12-13 | 49 | 10,9 | 16,3 | 19,2 | 2,8 | 0,6 |

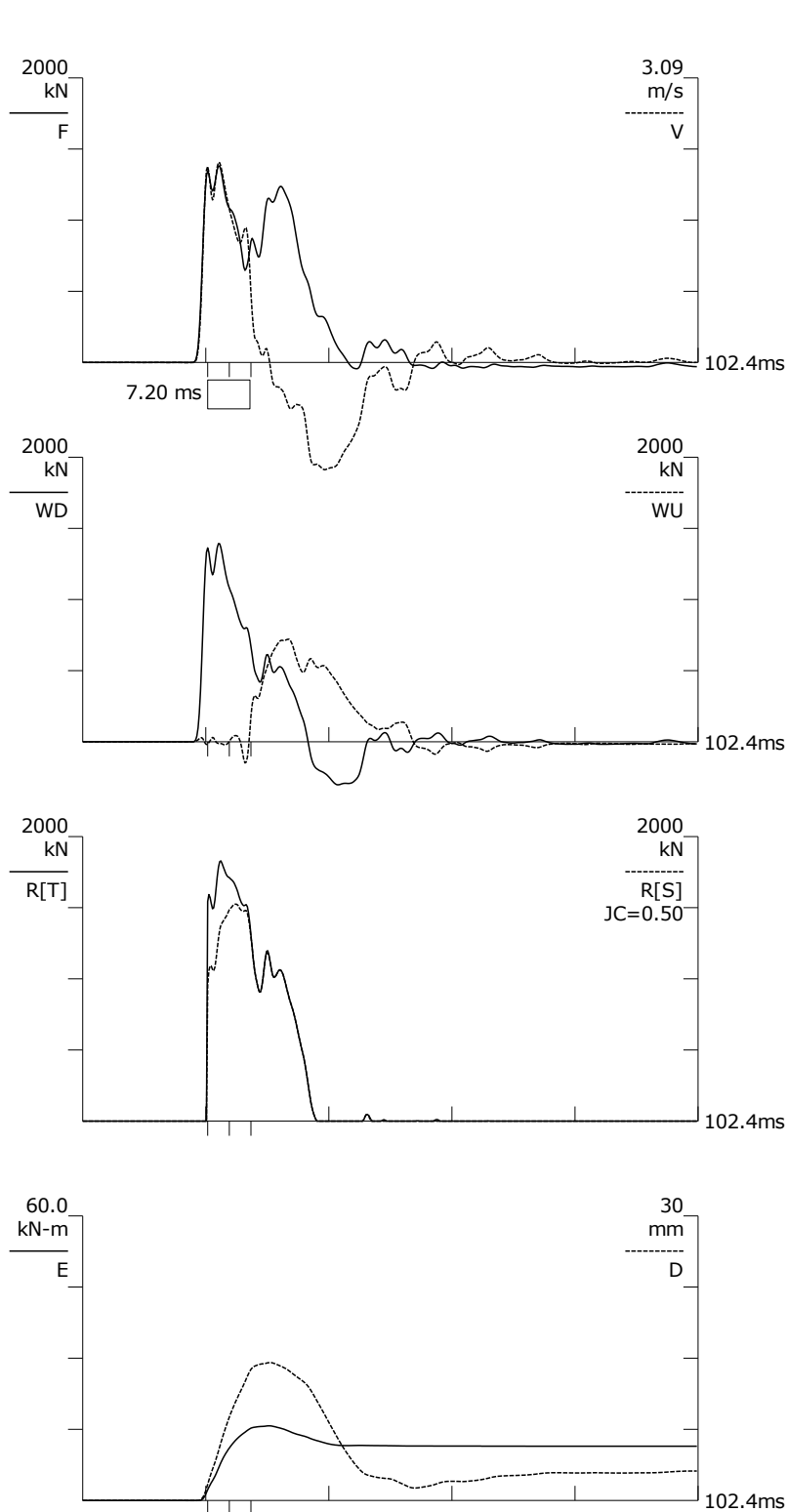
Taulukko 4: Mittaustulokset koepaalu 4A:sta. (Hakanen 2010 a, 4)

| pl | L [m] | LE [m] | Koekuormitusisku | | Geotekninen murtokestävyys | Huom. |
|--------------------|-------|--------|------------------|--------|----------------------------|-------|
| | | | EMX [kNm] | s [mm] | RMX [kN] | |
| Koepaalu 4A | 15 | 14,0 | 15,7 | 4 | 1525 | |

Skanska Tekra OY

MAP kirkko
PDA OP: THa

PILE DRIVING ANALYZER ®
Version 2003.095.002
koepaalu 4A



BN 355
16.9.2009 12:43:25
FMX 1381 kN
RMX 1525 kN
CSB 26.2 MPa
CSX 20.8 MPa
CSI 25.0 MPa
VMX 2.17 m/s
EMX 15.7 kN-m
DMX 15 mm
FVP 1.0 []

LE 14.0 m
AR 664.29 cm²
EM 37999 MPa
SP 24.5 kN/m³
WS 3900.0 m/s
EA/C 647 kN-s/m

F1234 A12

F1: [A737] 93.7 (1)
F2: [D035] 95.4 (1)
F3: [D044] 92.6 (1)
F4: [D028] 94.6 (1)
A1: [10833] 1065 g's/v (1)
A2: [10832] 1020 g's/v (1)

Kuva 15: Koepaalun 4A kuvaajat. (Hakanen 2010 a, 8)

5.2.2 Skanskan varikko, Piikkiö

Skanskan varikolla koelyönnit suoritettiin 30.10.2009. Tarkoituksena oli testata PDA- mittauksen avulla lyöntijännityksiä, lyöntienergiaa, geoteknistä murtokestävyyttä ja paalujen ehjyyttä. Kaiken kaikkiaan esijännitettyjä paaluja oli kolme kappaletta. Paalut olivat kuljetuksen aikana vaurioituneet päistä, ja vaurioituneet päät jouduttiin sahaamaan pois. Paalujen lopulliset pituudet olivat:

- Koepaalu 1: 6,35 m
- Koepaalu 2: 6,00 m
- Koepaalu 3: 6,00 m (Hakanen 2010 b, 2).

Mittauksissa käytettiin samaa mittauslaitteistoa kuin MAP- kirkon työmaalla. Tällä kertaa paalut varustettiin kärjillä, jotka tehtiin 6 mm vahvasta teräslevystä paitsi pohjalevy, joka oli 10 mm vahvaa. Koepaaluhihin 1 ja 2 kärkiä käytettiin ylä- ja alapäässä, koepaalussa 3 vain alapäässä oli kärki (Hakanen 2010 b, 2.) Kuvassa 16 on kuvattu Piikkiön lyöntikokeissa käytetty kärki.



Kuva 16: Piikkiön koepaalutuksissa käytetty laatikkokärki.

Paalutuskoneessa oli koelyöntien aikaan häiriö tallennusautomaattikassa ja tarkkoja lyöntimääriä ei saatu tallennettua (Hakanen 2010 b, 3).

Koepaalu 1

Taulukossa 5 on esitetty tulokset koepaalun 1 lyönneistä. Paalu alkoi vaurioitua yläpäästä pudotuskorkeuden ollessa noin 0,5 m (kuvio 18). Geotekniselle murtokestävyydelle saatiin seuraavat arvot:

- Pudotuskorkeus n. 0,15 m n. 1300 kN
- Pudotuskorkeus n. 0,40 m n. 2200 kN
- Pudotuskorkeus n. 0,50 m n. 2450 kN

(Hakanen 2010 b, 3.)

Kuvaajat koepaalusta 1 on esitetty kuvissa 18,19 ja 20. Kuvaajien merkitykset ylhäältä alaspäin:

1. voimakäyrä F ja nopeuskäyrä V (x impedanssi Z)
2. iskuaaltokäyrä alas WD ja ylös WU
3. lyöntivastuskäyrä R vaimennuskertoimilla JC=0 ja JC=0,50
4. paaluun siirtyvä energia E ja paalun yläpään siirtymä D

(Hakanen 2010 b, 5).

Taulukko 5: Koepaalu 1 lyöntijännitykset lyöntienergian mukaan.

(Hakanen 2010 b, 3)

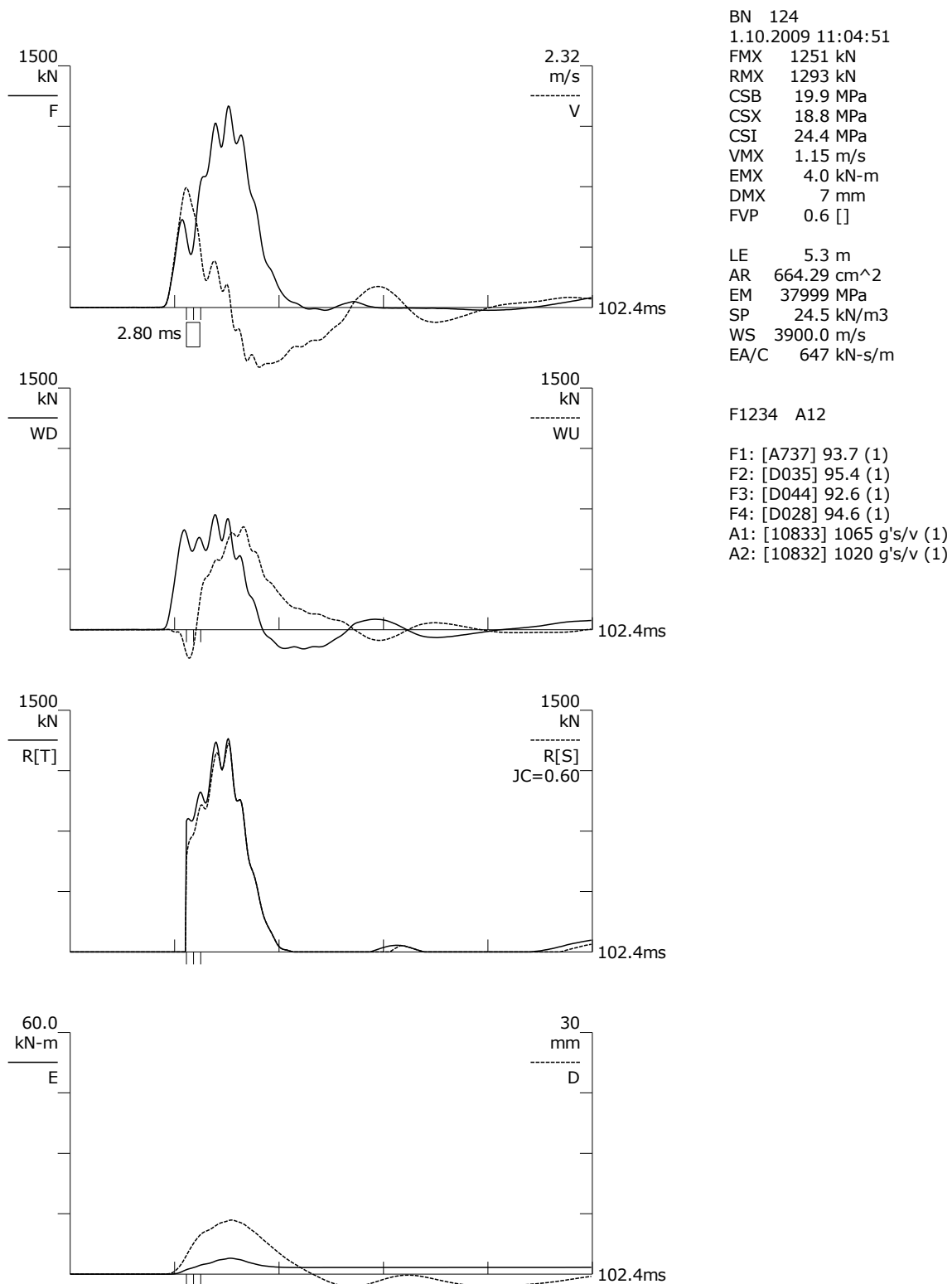
| Pudotuskorkeus [m] | Lyönti- energia [kJm] | Lyöntijännitykset [MPa] | | | |
|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------|-------------|-----------|
| | | CSX | CSI | CSB | TSX |
| n. 0,15 | 4,1...4,7 | 17,7...19,4 | 23,9...26,7 | 18,6...21,2 | 0,1...0,6 |
| n. 0,40 | 13,2...14,2 | 31,6...33,7 | 41,6...43,7 | 34,8...37,9 | 0,3...0,7 |
| n. 0,50 | 18,0...18,8 | 35,0...35,4 | 47,2...56,7 | 42,6...43,6 | 0,0...0,9 |

Taulukosta 5 huomataan, että sallittu puristusjännitys (33,81 MPa) ylittyy, heti kun pudotuskorkeus on 0,50 m. Yksittäisen anturin kohdalla sallittu puristusjännitys ylittyi jo pudotuskorkeuden ollessa 0,40 m. Vetojännitykset eivät sen sijaan ylittäneet sallittua rajaa missään vaiheessa. Toisaalta myös maaperä oli sellaista, jossa vetojännitystä ei juuri synny. Kuvassa 17 nähdään kuinka paalu vaurioitui yläpäätä.



Kuva 17: Koepaalu 1 vaurioituminen yläpäätä.

Skanska Tekra OY

Piikkion varikko
PDA OP: THaPILE DRIVING ANALYZER ®
Version 2003.095.002
koepaalu 1

Kuva 18: Koepaalun 1 kuvaajat, pudotuskorkeuden ollessa 0,15 m.

(Hakanen 2010 b, 6)

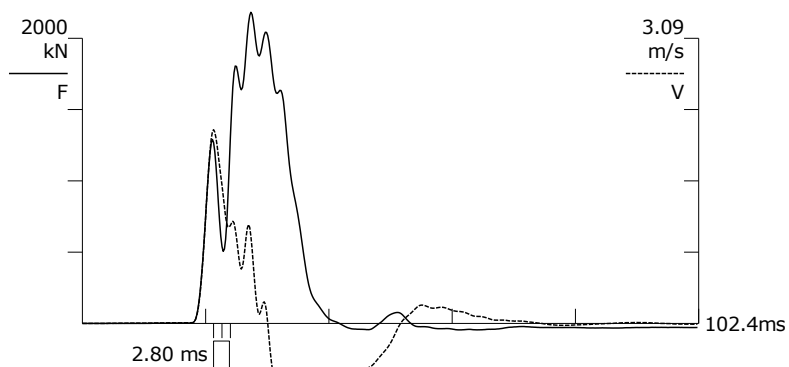
Skanska Tekra OY

Piikkion varikko
PDA OP: THa

PILE DRIVING ANALYZER ®

Version 2003.095.002

koepaalu 1

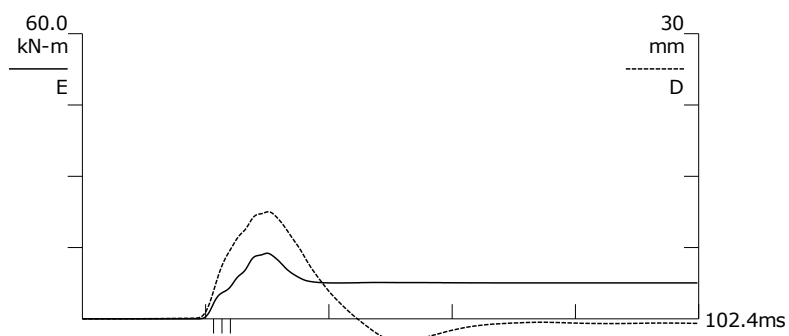
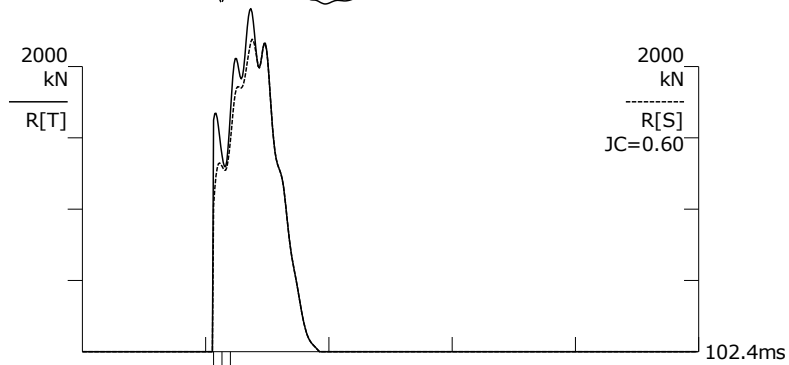
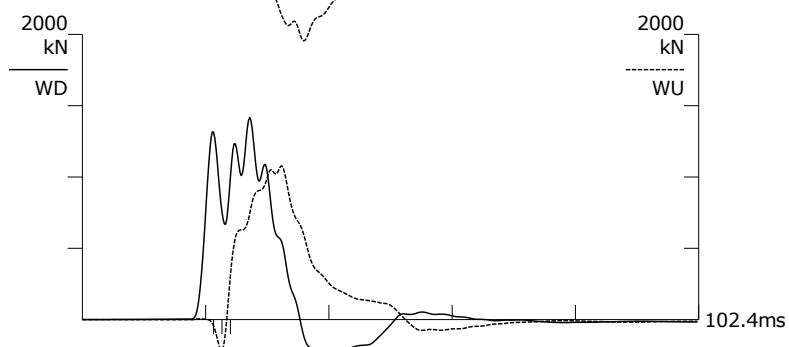


BN 243
1.10.2009 11:09:28
FMX 2182 kN
RMX 2192 kN
CSB 36.2 MPa
CSX 32.9 MPa
CSI 43.8 MPa
VMX 2.10 m/s
EMX 13.8 kN-m
DMX 11 mm
FVP 0.9 []

LE 5.3 m
AR 664.29 cm²
EM 37999 MPa
SP 24.5 kN/m³
WS 3900.0 m/s
EA/C 647 kN-s/m

F1234 A12

F1: [A737] 93.7 (1)
F2: [D035] 95.4 (1)
F3: [D044] 92.6 (1)
F4: [D028] 94.6 (1)
A1: [10833] 1065 g's/v (0.98)
A2: [10832] 1020 g's/v (0.98)



Kuva 19: Koepaalun 1 kuvaajat, pudotuskorkeuden ollessa 0,40 m
(Hakanen 2010 b, 7)

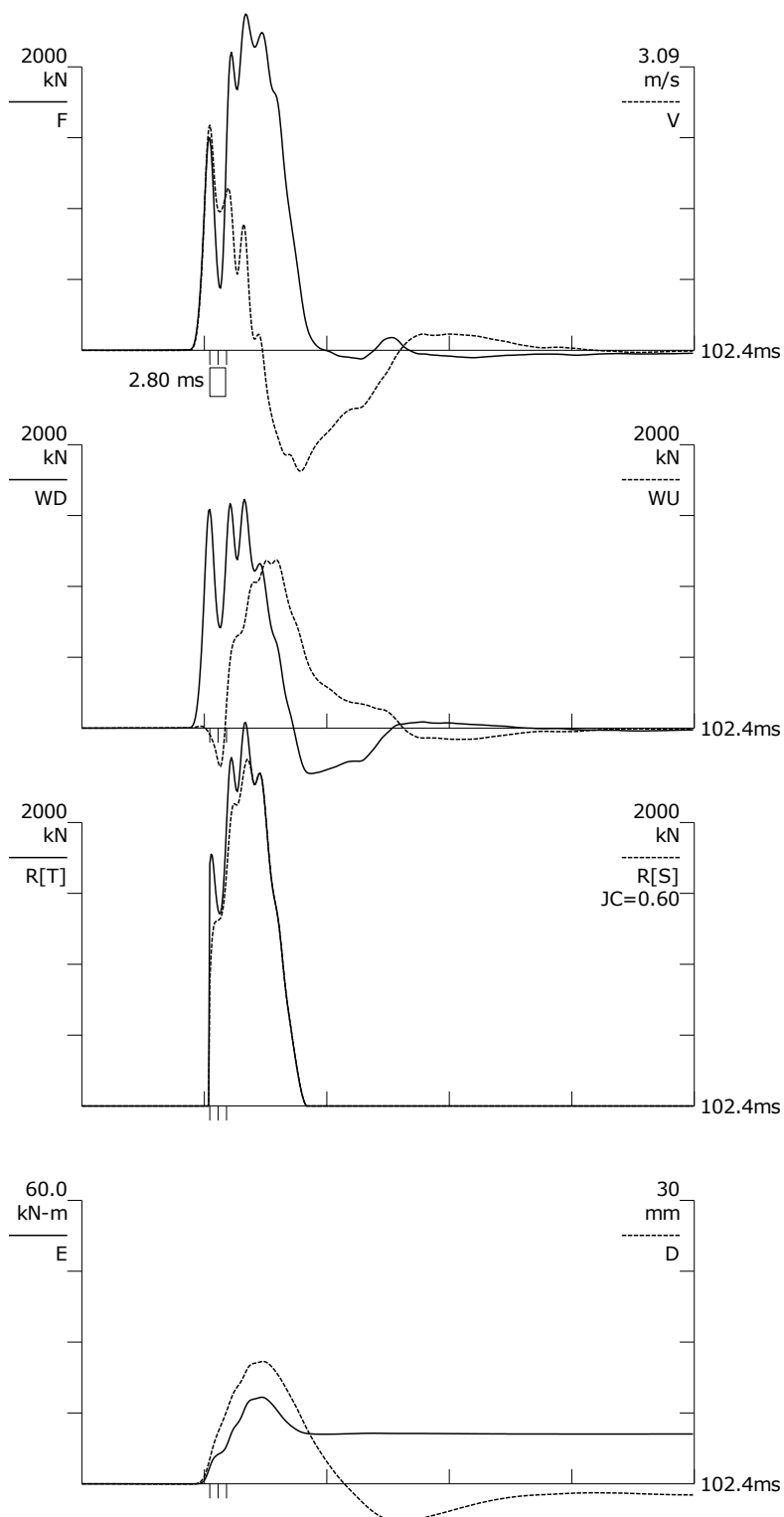
Skanska Tekra OY

Piikkion varikko
PDA OP: THa

PILE DRIVING ANALYZER ®

Version 2003.095.002

koepaalu 1



BN 259

1.10.2009 11:09:49

FMX 2373 kN

RMX 2446 kN

CSB 42.6 MPa

CSX 35.7 MPa

CSI 55.8 MPa

VMX 2.46 m/s

EMX 18.3 kN-m

DMX 13 mm

FVP 0.9 []

LE 5.3 m

AR 664.29 cm²

EM 37999 MPa

SP 24.5 kN/m³

WS 3900.0 m/s

EA/C 647 kN-s/m

F1234 A12

F1: [A737] 93.7 (1)

F2: [D035] 95.4 (1)

F3: [D044] 92.6 (1)

F4: [D028] 94.6 (1)

A1: [10833] 1065 g's/v (0.98)

A2: [10832] 1020 g's/v (0.98)

Kuva 20: Koepaalun 1 kuvaajat, pudotuskorkeuden ollessa 0,50 m
(Hakanen 2010 b, 8)

Koepaalu 2

Koepaalu 2 mittaustulokset on esitetty taulukossa 6. Koepaalu 2 alkoi vaurioitua yläpäästä, kun pudotuskorkeus oli 0,30 m. Koepaalulle 2 saatiin seuraavat geoteknisen murtokestävyyden arvot:

- Pudotuskorkeus n. 0,15 m n.1300 kN
- Pudotuskorkeus n. 0,30 m n. 2200 kN

(Hakanen 2010 b, 3.)

Kuvaajat koepaalusta 2 on esitetty kuvissa 21 ja 22. Kuvaajat ovat samassa järjestyksessä kuin aikaisemmissa koepaaluissa.

Taulukko 6: Koepaalu 2 lyöntijännitykset lyöntienergian mukaan

(Hakanen 2010 b, 3)

| Pudotuskorkeus [m] | Lyönti-energia [kNm] | Lyöntijännitykset [MPa] | | | |
|--------------------|----------------------|-------------------------|-------------|-------------|-----------|
| | | CSX | CSI | CSB | TSX |
| n. 0,15 | 4,0...4,6 | 15,5...20,1 | 19,2...24,6 | 19,2...24,8 | 0,0...0,5 |
| n. 0,30 | 10,2...12,1 | 30,5...34,0 | 33,6...44,5 | 30,1...39,5 | 0,0...0,4 |

Taulukosta 6 huomataan, että koepaaluun 2 kohdistuvat lyöntijännitykset eivät keskimääräisesti ylittäneet sallittua puristusjännitystä (33,81 MPa). Yksittäisten antureiden kohdalla sallittu puristus ylittyi, kun pudotuskorkeus oli 0,30 m.

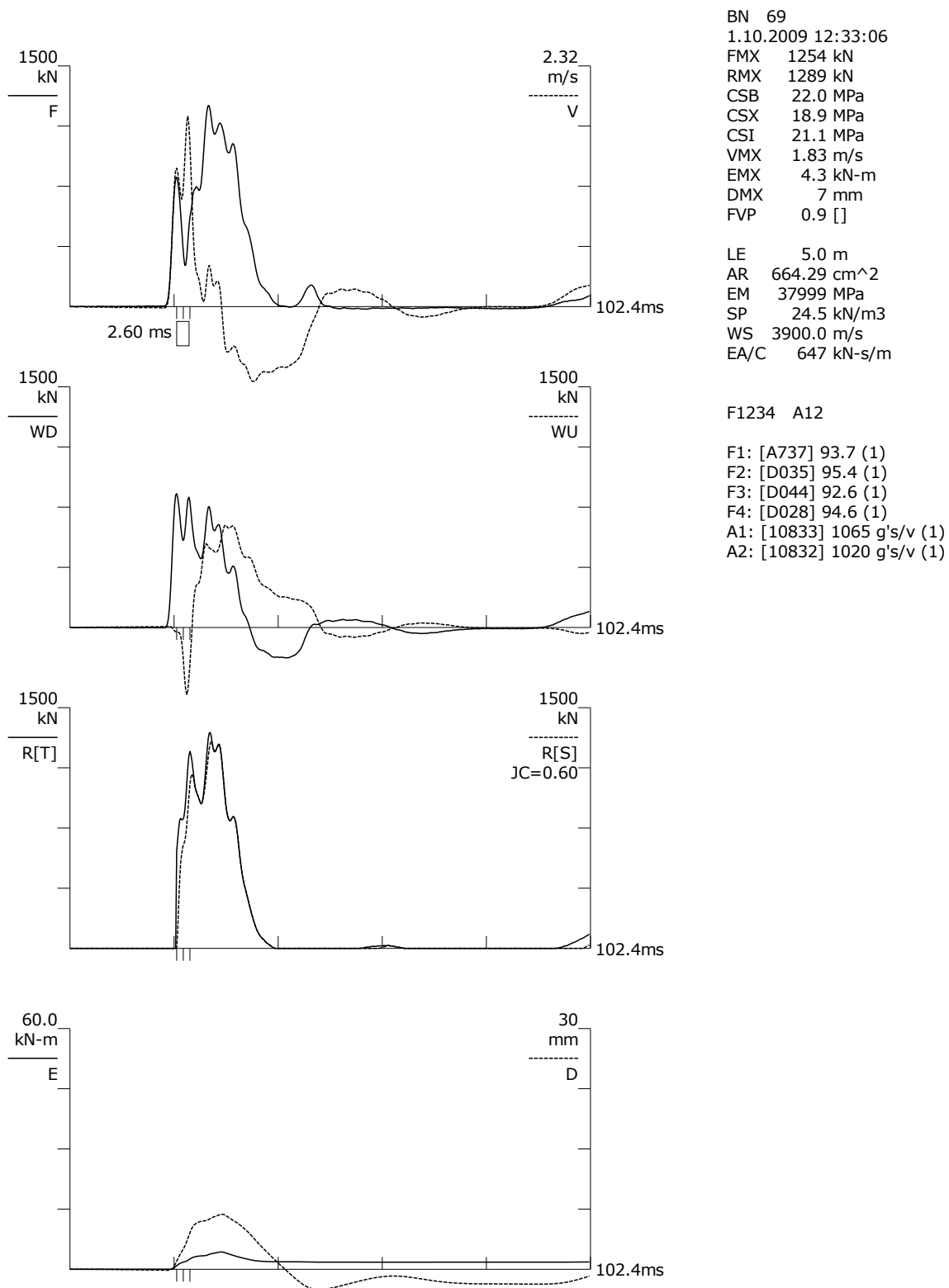
Vetojännitystä ei paaluun tullut juuri lainkaan.

Verrattuna koepaaluun 1, tämä koepaalu ei kestänyt yhtä hyvin. Koepaalu 1 alkoi vaurioitua vasta pudotuskorkeuden ollessa 0,50 m, kun taas koepaalu 2 vaurioitui jo kun pudotuskorkeus oli 0,3m. Paalut olivat muuten samanlaiset, mutta koepaalu 2 oli 0,35 m lyhyempi kuin koepaalu 1. Geotekniselle murtokestävyydelle saatiin lähes samat arvot.

Skanska Tekra OY

Piikkion varikko
PDA OP: THa

PILE DRIVING ANALYZER ®
Version 2003.095.002
Koepaalu2

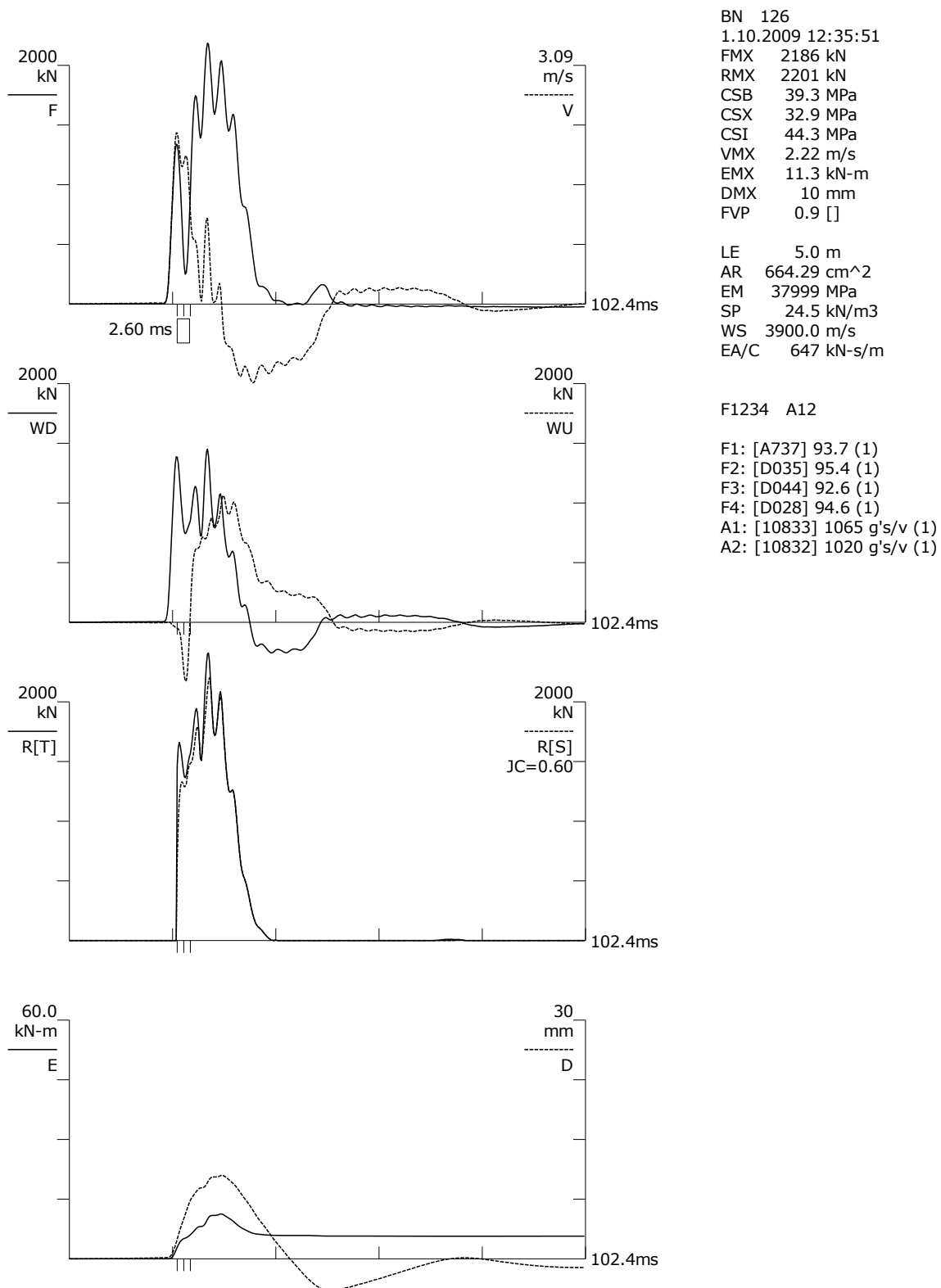


Kuva 21: Koepaalun 1 kuvaajat pudotuskorkeuden ollessa 0,15 m
(Hakanen 2010 b, 9)

Skanska Tekra OY

Piikkion varikko
PDA OP: THa

PILE DRIVING ANALYZER ®
Version 2003.095.002
Koepaalu2



Kuva 22: Koepaalu 2 kuvaajat pudotuskorkeuden ollessa 0,30 m
(Hakanen 2010 b, 10)

Koepaalu 3

Koepaalun 3 tulokset on esitetty taulukossa 7. Koepaalu 3 alkoi vaurioitua kärjestä, kun pudotuskorkeus oli 0,50 m. Tämä poikkeaa edellisistä koepaaluista siten, että ne alkoivat vaurioitua yläpäästä. Koepaalussa 3 ei käytetty laatikkokärkeä lainkaan yläpäässä. Koepaalulle 3 saatiin seuraavat geoteknisen murtokestävyyden arvot:

- Pudotuskorkeus n. 0,15 m n. 1650 kN
- Pudotuskorkeus n. 0,30 m n. 1900 kN
- Pudotuskorkeus n. 0,50 m n. 2200 kN

(Hakanen 2010 b, 4.)

Kuvaajat koepaalusta 3 on esitetty kuvissa 23, 24 ja 25. Kuvaajat ovat samassa järjestyksessä kuin aikaisemmissa koepaaluissa.

Taulukko 7: Koepaalun 3 lyöntijännitykset lyöntienergian mukaan

(Hakanen 2010 b, 4)

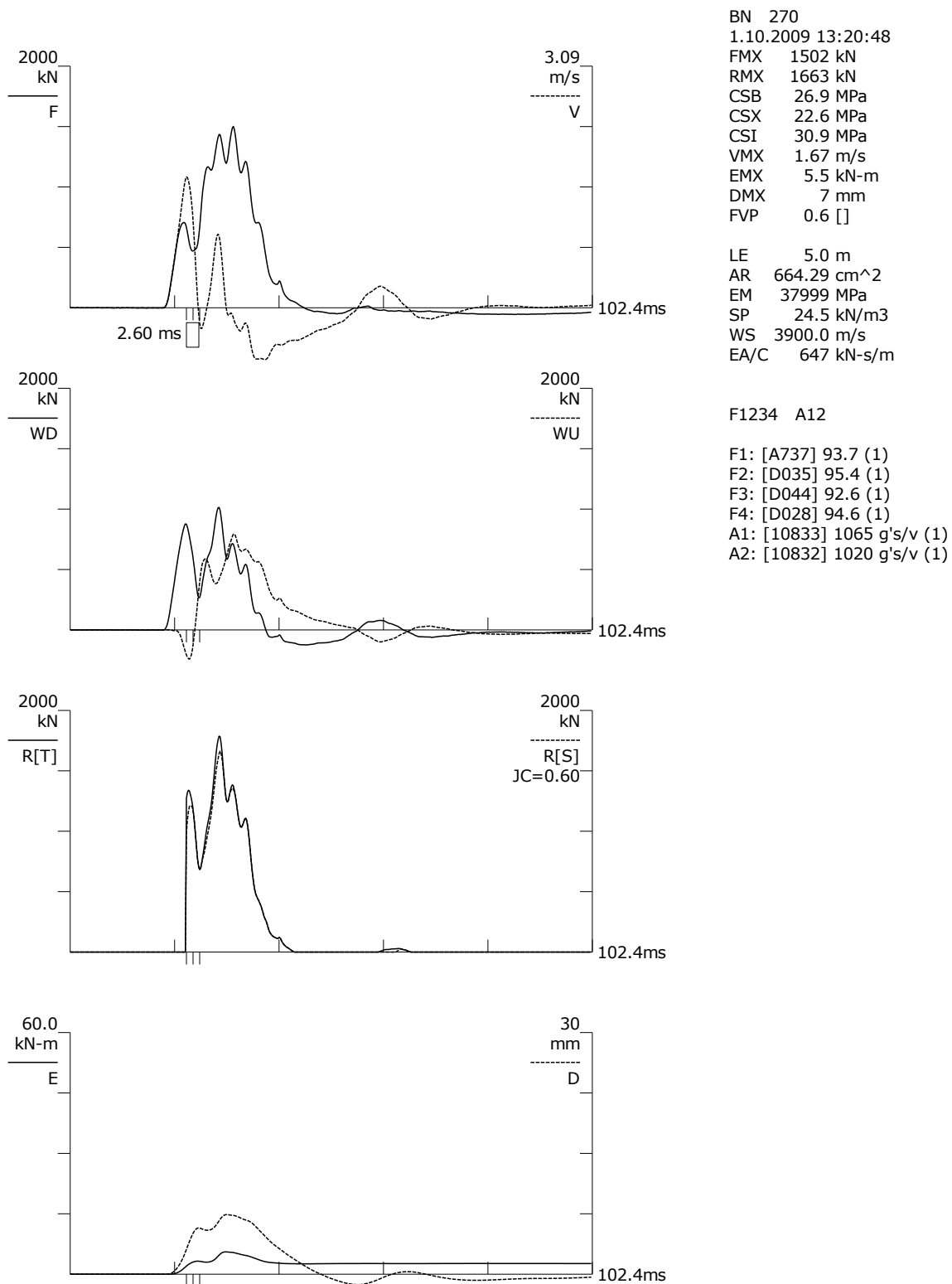
| Pudotuskorkeus [m] | Lyönti-energia [kJm] | Lyöntijännitykset [MPa] | | | |
|--------------------|----------------------|-------------------------|-------------|-------------|-----------|
| | | CSX | CSI | CSB | TSX |
| n. 0,15 | 4,7...5,7 | 21,1...23,1 | 29,9...31,1 | 24,4...27,2 | 0,0...0,7 |
| n. 0,30 | 9,6...10,4 | 28,1...29,4 | 36,2...38,3 | 32,1...33,9 | 0,4...0,7 |
| n. 0,50 | 18,2...19,6 | 34,8...36,3 | 42,6...43,7 | 35,7...37,1 | 1,0...1,6 |

Taulukosta 7 nähdään, että keskimääräisesti sallittu puristusjännitys (33,81 MPa) ylittyi hieman. Yksittäisten antureiden kohdalla ylitys oli huomattavasti enemmän. Poiketen aiemmista koepaaluista, tämä koepaalu rikkoutui kärjestä. Sivulla 23 on esitetty kuva koepaalusta 3, jossa näkyy selvästi paalun alareunan vaurioituminen.

Skanska Tekra OY

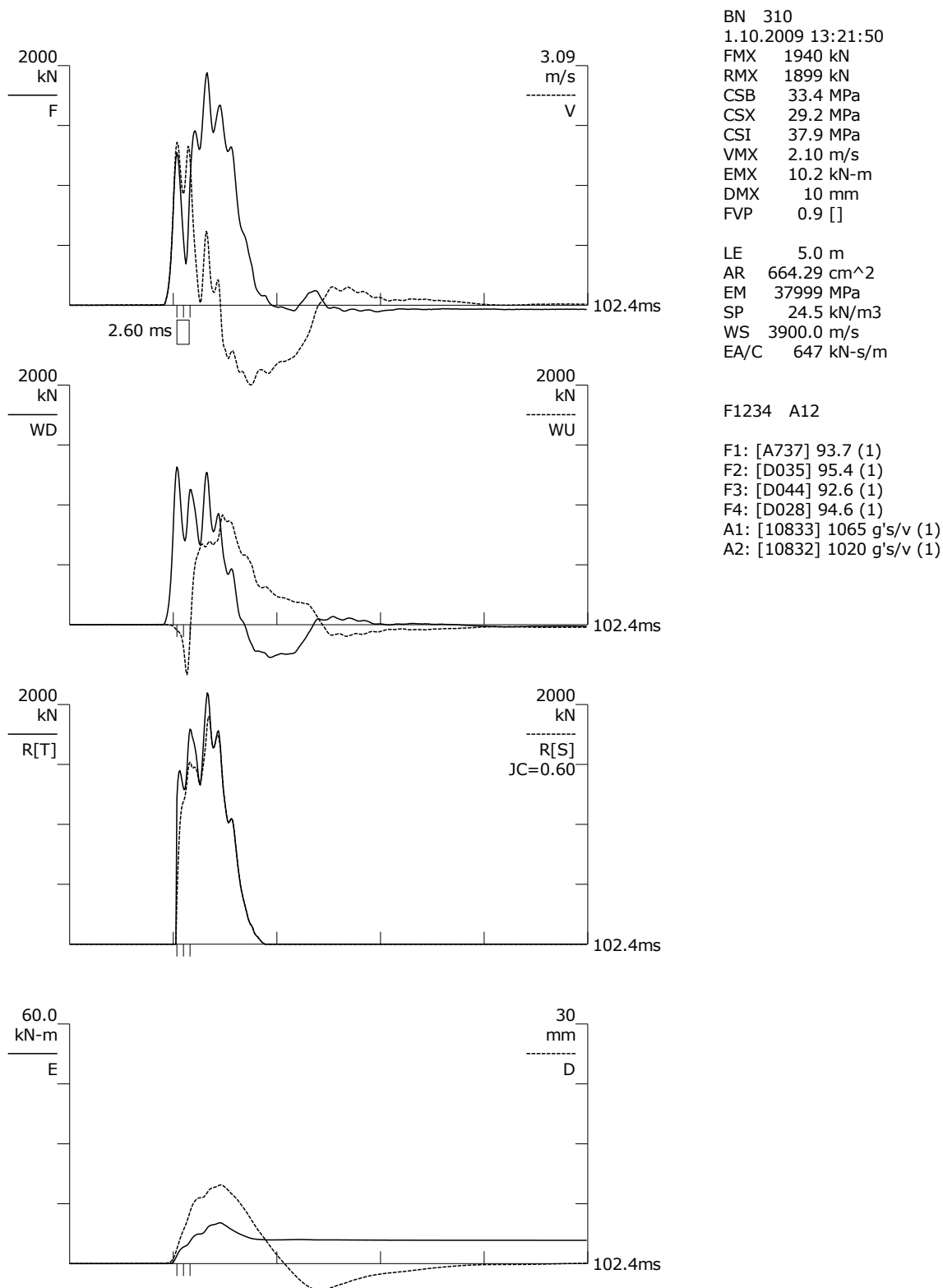
Piikkion varikko
PDA OP: THa

PILE DRIVING ANALYZER ®
Version 2003.095.002
Koepaalu 3



Kuva 23: Koepaalu 3 kuvaajat pudotuskorkeuden ollessa 0,15m
(Hakanen 2010 b, 11)

Skanska Tekra OY

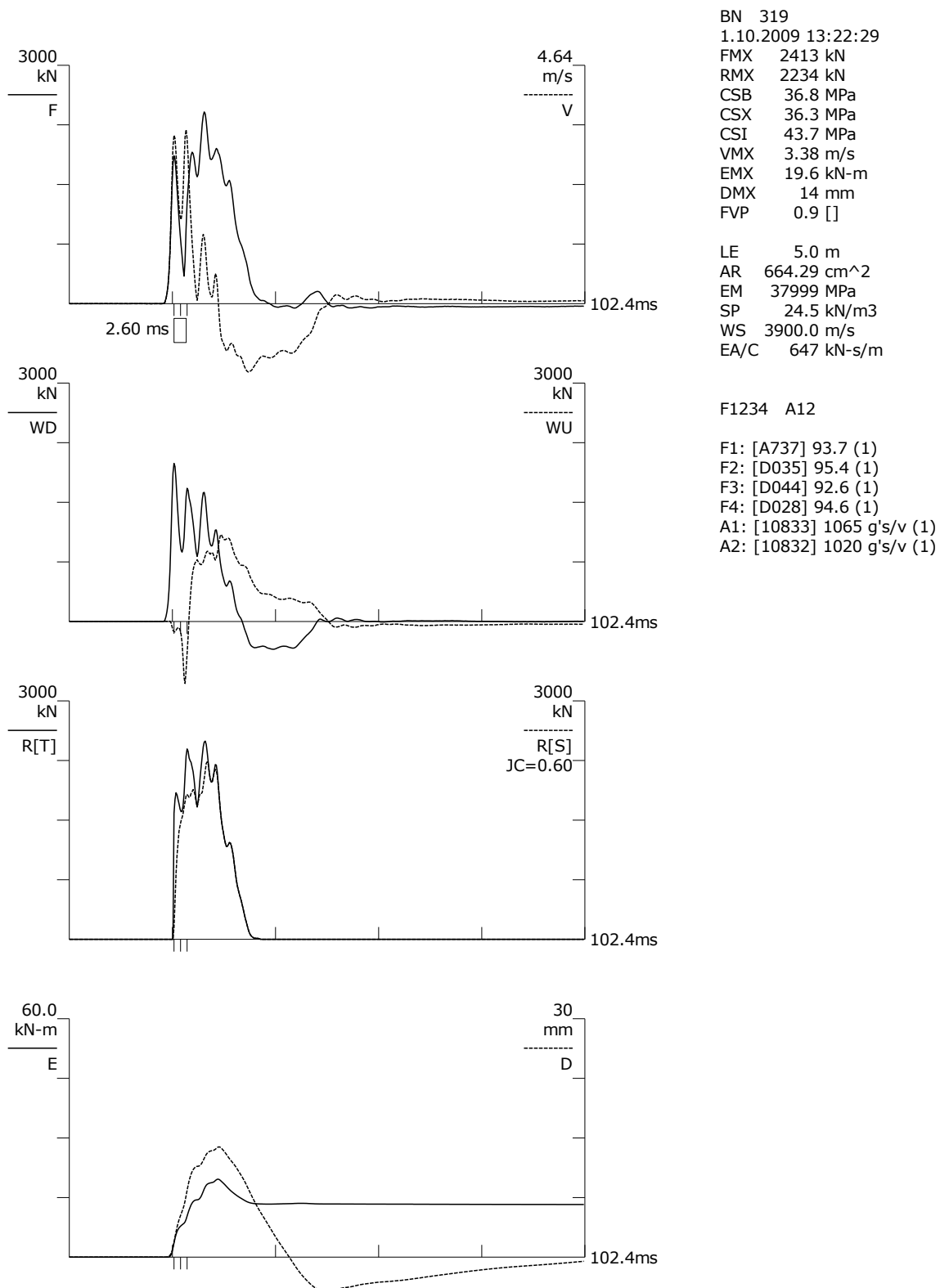
Piikkion varikko
PDA OP: THaPILE DRIVING ANALYZER ®
Version 2003.095.002
Koepaalu 3

Kuva 24: Koepaalun 3 kuvaajat pudotuskorkeuden ollessa 0,30 m
(Hakanen 2010 b, 12)

Skanska Tekra OY

Piikkion varikko
PDA OP: THa

PILE DRIVING ANALYZER ®
Version 2003.095.002
Koepaalu 3



Kuva 25: Koepaalun 3 kuvaajat pudotuskorkeuden ollessa 0,50 m
(Hakanen 2010 b, 13)

6 Johtopäätökset

Lyöntikokeissa saatiin tietoa työssä tutkittavan esijännitetyn paalun kestävydestä. Tampereen koelyönneissä paalun sallitut puristus- ja vetojännitykset eivät ylittyneet, eli kovempaakin niitä olisi voinut lyödä. Yksi koepaaluista kuitenkin vaurioitui paalutuksessa, ja tarkkaa syytä siihen ei tiedetä.

Piikkiön koelyönneissä tarkoitus oli ainoastaan testata missä vaiheessa paalut menevät rikki. Sallittu puristusjännitys ylitettiin jokaisen koepaalun kohdalla, ja jokainen paalu myös vaurioitui. Piikkiössä paaluille kokeiltiin myös laatikkokärkiä. Kaiken kaikkiaan paalut kestivät lyöntiä hyvin, ja lisäksi geotekniselle murtokestävyydelle mitattiin hyviä arvoja.

Lyöntikokeissa käytetyllä esijännitetyllä paalulla on kevyempi rakenne kuin tavallisella teräsbetonipaalulla. Lisäksi materiaalia säästyy niin raudoituksen kuin betoninkin osalta. Myös esijännitetyn paalun sisällä oleva ontelo lisää käyttömahdollisuuksia. Onteloon voisi esimerkiksi sijoittaa maalämpöputkia tai muita kaapeleita.

Tulevaisuudessa esijännitetyn paalun käyttö Suomessa luultavasti lisääntyy, ja Parma Oy onkin maaliskuussa 2010 tuonut markkinoille oman samankaltaisen kilpailevan tuotteen nimeltä Eco-paalu, jota markkinoidaan mm. kestävämpänä ja materiaalia säästävänä paaluna. Tämä varmasti innoittaa myös muita suunnittelemaan ja tutkimaan uusia vaihtoehtoja yleisimmin käytössä oleville teräsbetonipaaluille.

7 Lähteet

Hakanen, Tommi 2008. Teräsputkipaalujen koekuormitusmenetelmien vertailu. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennusosasto. Tampere.

Hakanen, Tommi 2010. MAP-Kirkon PDA-mittaus. Raportti. Skanska Infra Oy. Tampere

Hakanen, Tommi 2010. Skanska Infra Oy:n varikon PDA-mittaus. Raportti. Skanska Infra Oy. Tampere

Häkämies, Esa 2009. Teräsbetonipaalun historiaa. Esitelmä. Betoniteollisuuden paaluseminaari, Finlandia-talo 4.11.2009. Helsinki.

Jääskeläinen, Raimo 2009. Pohjarakennuksen perusteet. Tampere: Tammertekniikka/ Amk-kustannus Oy.

Paalutusohjeet 2010. Lausuntoversio. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

Pohjarakennesuunnitelma, MAP-kirkko.2009. Insinööritoimisto Geotesti Oy. Tampere.

Teräsputkipaalut 1999. Tielaitos. Helsinki: Tiehallinto.

Törnqvist, Jouko 2009. Paalutusohjeen uudistus. Esitelmä. Betoniteollisuuden paaluseminaari, Finlandia-talo 4.11.2009. Helsinki

Valgur, J. 2009. Prestressed concrete pile. Product description. Tartu.