



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

VILLE UTRIAINEN

TERÄSBETONIPAALUN KALLIOKÄRJEN LAATUVAATIMUKSET

Diplomityö

Tarkastaja: professori Ralf Lindberg  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty:  
Tuotantotalouden ja rakentamisen  
tiedekuntaneuvoston kokouksessa  
5. marraskuuta 2013

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

**UTRIAINEN, VILLE:** Teräsbetonipaalun kalliokärjen laatuvaatimukset

Diplomityö, 65 sivua, 31 liitesivua

Tammikuu 2014

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Ralf Lindberg

Avainsanat: Kalliokärki, teräsbetonipaalu, laatuvaatimukset

Paalujen ja kalliokärkien käyttö Suomessa kasvaa, sillä rakennuksia joudutaan rakentamaan huonosti kantavaan maahan. Huonojen perustusolosuhteiden johdosta paalut lyödään usein peruskallioon asti, jotta ne saavuttavat rakenteellista kantavuutta vastaavan geoteknisen kantavuuden.

Tutkimus on tehty pääosin kirjallisuustutkimuksena, jossa on hyödynnetty kenttämittausten tuloksia ja keskusteluja alan toimijoiden kanssa. Kirjallisuustutkimus osassa on koottu vanhat ja nykyiset vaatimukset kalliokärjelle Suomessa, sekä nykyiset vaatimukset Ruotsissa ja Norjassa. Lisäksi tutkimukseen on koottu tietoa aikaisemmista kalliokärkitutkimuksista. Kenttämittaustentavoitteena on selvittää kalliokärkien laatuvaatimuksia taivutusmomentin, leikkausvoiman ja vetovoiman osalta, sekä pohtia testausmenetelmiä, joilla selvitetään edellä mainitut vaatimukset. Tavoitteena on tarkentaa ja selkeyttää Paalutusohjeen PO-2011 (RIL 254-2011 PO-2011) kalliokärjen momentti- ja leikkauskestävyys vaatimuksia. Tämä tutkimus on rajattu koskemaan teräsbetonipaaluissa käytettäviä kalliokärkiä.

Tutkimuksen kohteena oli kolme eri kalliokärkityyppiä, joille suoritettiin standardin SFS-EN 12794 mukaiset lyöntikokeet ja Paalutusohjeen PO-2011 mukaiset taivutuskokeet. Lyöntikokeissa paaluista ja kalliokärjen tartuntateräksistä mitattiin jännitykset venymäliuskoilla ja PDA-laitteistolla.

Tutkimuksen aikana huomattiin, että nykyinen taivutuskoe on tarpeellinen ja sillä voidaan selvittää kalliokärjen taivutus- ja leikkauskestävyys riittävän tarkasti. Diplomityössä on tehty malli kalliokärkeen kohdistuville rasiuksille kalliokärjen liukuessa vinolla kalliopinnalla. Tällöin paaluun syntyy sivuttaissuuntaisia rasiuksia, jotka aiheuttavat paaluun ja kalliokärkeen taivutus- ja leikkausrasiuksia. Diplomityössä esitetty malli on kuitenkin yksinkertaistettu. Malliin on huomioitu vain paaluun kohdistuvat sivusuuntaiset kuormat, joten esimerkiksi lyönnin epäkeskisyydestä aiheutuvaa momenttia ei ole mallissa huomioitu.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

**UTRIAINEN, VILLE:** Quality requirements of rock shoes for reinforced concrete piles.

Master of Science Thesis, 65 pages, 31 Appendix pages

January 2014

Major: Structural Design

Examiner: Professor Ralf Lindberg

Keywords: Rock shoe, reinforced concrete pile, quality requirements

The use of piles and rock shoes in Finland is increasing, because buildings are built in bad foundation conditions. Piles with large structural capacity are driven to bedrock so they would reach the sufficient geotechnical capacity.

Research was made as a literature study with field measurements. The literature study includes old and current quality requirements for rock shoes in Finland and current requirements in Sweden and Norway. Research also includes former rock shoe researches. The goal of the field measurements was to study the quality requirements (bending moment, shear force and tension) of rock shoes of reinforced concrete piles. Another goal was to inspect the testing methods which are used to determine said requirements. Goal was to specify and clarify the bending moment requirements stated in Finnish Piling Manual PO-2011. Research includes only reinforced concrete piles.

The research involves three different types of rock shoes. Pile driving tests were made according to standard SFS-EN 12794. Bending moments were tested according to Finnish Piling Manual PO-2011. Stresses during pile driving were measured with strain gauges and PDA-equipment.

Current bending test was realized necessary during the research. It is capable of determine the bending and sheer endurance of the rock shoe. There is a model for the loads caused by sliding of the rock shoe on the inclined rock surface. That causes bending moment and lateral loads to the pile and the rock shoe. Model shown in this Master's thesis only consists of lateral loads, so e.g. the bending moment of eccentric application of force is not included.

## ALKUSANAT

Tämä työ on tehty diplomityötutkintoa varten Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella Leimet Oy:n ja Emeca Oy:n rahoituksella.

Työn ohjaamisesta haluan kiittää Laboratorioinsinööri Jukka Rantalaa, projektitutkija Jukka Haavistoa ja diplomi-insinööri Teemu Riihimäkeä. Käyttöinsinööri Tomi Stranderille kiitokset opastuksesta venymäliuskamittauksissa. PDA-mittauksien tekemisestä haluan kiittää diplomi-insinööri Teemu Riihimäkeä ja diplomi-insinööri Teemu Repoa. Diplomityöhön liittyvistä kommentteista kiitokset Mikael Anttilalle Emeca Oy:stä ja Esko Virtaselle Leimet Oy:stä. Työn tarkastamisesta, ohjaamisesta sekä arvokkaista neuvoista kiitän professori Ralf Lindbergiä.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni saamastani tuesta opiskeluissa ja elämässä. Viimeisenä iso kiitos ystäväilleni, jotka tekivät opiskelujastani ikimuistoisen.

Tampereella 11.1.2014

Ville Utriainen



# SISÄLLYS

|   |     |
|---|-----|
| Tiivistelmä .....   | ii  |
| Abstract .....  | iii |
| Termit ja niiden määritelmät .....                          | vii |
| 1 Johdanto .....  | 1   |
| 2 Teoreettinen tausta .....                                 | 2   |
| 2.1 Vanhat ja nykyiset vaatimukset Suomessa .....           | 2   |
| 2.2 Vaatimukset Ruotsissa ja Norjassa .....                 | 5   |
| 2.2.1 Vaatimukset Ruotsissa .....                           | 5   |
| 2.2.2 Vaatimukset Norjassa .....                            | 5   |
| 2.3 Aiemmat kalliokärkitutkimukset .....                    | 6   |
| 2.4 PDA-Mittaus .....                                       | 7   |
| 2.5 Kalliokärkien rakenteellisten vaatimusten teoria .....  | 10  |
| 3 Tutkimusmenetelmät ja aineisto .....                      | 18  |
| 3.1 Koekappaleet ja laatuvaatimukset .....                  | 18  |
| 3.2 Lyöntikoe .....   | 19  |
| 3.3 Taivutuskoe .....                                       | 23  |
| 4 Koesarjan tulokset .....                                  | 25  |
| 4.1 Lyöntikokeet .....                                      | 25  |
| 4.1.1 Kimmomoduuli .....                                    | 25  |
| 4.1.2 Venymä ja jännitys .....                              | 26  |
| 4.1.3 Kokeen aikaiset havainnot .....                       | 36  |
| 4.2 Taivutuskokeet .....                                    | 38  |
| 4.2.1 Paalujen poikkileikkausarvot .....                    | 38  |
| 4.2.2 Tulokset .....  | 39  |
| 4.2.3 Momentti- ja leikkauskestävyys .....                  | 51  |
| 4.2.4 Siirtymät .....                                       | 52  |
| 4.2.5 Halkeamatarkastelut .....                             | 52  |
| 4.2.6 Murtumistavat .....                                   | 52  |
| 4.3 Yhteenveto .....  | 53  |
| 5 Tulosten tarkastelu .....                                 | 55  |
| 5.1 Jännitysten mallintaminen koetulosten perusteella ..... | 55  |
| 5.2 Arvio kokeiden tuloksista ja koejärjestelyistä .....    | 58  |
| 5.3 Uusien laatuvaatimusten määrittäminen .....             | 60  |
| 6 Johtopäätökset .....                                      | 62  |
| 6.1 Arvio testausmenetelmistä ja laatuvaatimuksista .....   | 62  |
| 6.2 Suositus laatuvaatimuksista .....                       | 62  |
| 6.3 Jatkotutkimustarpeet .....                              | 62  |
| Lähteet .....   | 64  |
| Liitteet .....  | 66  |
| Liite I .....   | 66  |

|                 |    |
|-----------------|----|
| Liite II .....  | 68 |
| Liite III ..... | 76 |
| Liite IV .....  | 87 |
| Liite V .....   | 91 |

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Paalu                      | Paalu on hoikka kantava rakenne, joka ottaa vastaan lähinnä puristusrasituksia ja siirtää kuormia kallioon tai kantavaan maakerrokseen.   |
| Lyöntipaalu                | Lyöntipaalu on maata syrjäyttävä paalu, joka asennetaan maahan lyömällä sitä jollakin iskevällä laitteella, kuten järkäleellä.  |
| Dynaaminen koekuormitus    | Dynaamisessa koekuormituskokeessa paalua lyömällä aikaansaatu iskuaalto mitataan muun muassa paalun geoteknisen kestävyuden, asennusaikaisten jännitysten ja ehjyyden selvittämiseksi. [1 s. 16]  |
| Kalliokärki                | Rakenne, jonka tarkoituksena on kallioon luotettavasti ja keskeisesti tukeutumalla estää paalun kärjen liukuminen sivusuunnassa ja keskittää paalun kärkivastus.  |
| Portaittainen kuormituskoe | Staattinen kuormituskoe, jossa kuormituspaalun kuormaa lisätään vaiheittain niin, että jokaista kuormitusporrasta pidetään vakiona tietty aika tai niin kauan, että paalun liike on käytännössä lakannut tai se on saavuttanut asetetun rajan (ML-koe) [1 s.20].                                |
| Hydraulijärkäle            | Lyöntilaitte, jossa järkäleen liikkuva osa nostetaan hydraulisesti ja pudotus on vapaa pois lukien öljyn virtauksen aiheuttama vastus tai laitteet voivat olla myös kiihdytettyjä. Liikkuvan osan massat voivat vaihdella 500-20000 kg. Iskuluvut vaihtelevat yleensä välillä 30-200 iskua/min. |
| Iskuaalto                  | Lyöntilaitteen iskun paaluun aiheuttama pitkittäinen aaltoliike, joka etenee paalussa sen materiaalin ominaisuuksista riippuvalla nopeudella.   |
| Geotekninen kantavuus      | Mitoitusarvo, joka on saatu huomioimalla sekä varmuus murtumista vastaan että painumat. [PRO-2004]  |
| Loppulyönnit               | Paalun lyönnin viimeiset iskusarjat, joiden painuma-arvojen perusteella tukipaalun asennustyö lopetetaan. [1 s.141]   |

|                  |   |
|------------------|---|
| $A_b$            | Paalun pohjan ala   |
| $A_c$            | Betonin pinta-ala paalussa  |
| $A_{sc}$         | Puristuserästen pinta-ala   |
| $A_{st}$         | Vetoterästen pinta-ala  |
| $A_s$            | Teräksen pinta-ala paalussa   |
| $A_p$            | Paalun poikkileikkauksen pinta-ala  |
| $B$              | Leveys  |
| $c_u$            | Maan suljettu leikkauslujuus  |
| $d_{eff}$        | Paalun tehokas pinta-ala nurjahdusmitoituksessa                               |
| $d_{kärkitappi}$ | Kalliokärjen kärkitapin halkaisija  |
| $d_{paalu}$      | Paalun halkaisija   |
| $D$              | Syvyys  |
| $E_i$            | Kimmomoduuli  |
| $EA$             | Paalun aksiaalijäykkyys   |
| $EI$             | Paalun taivutusjäykkyys   |
| $f_{ck}$         | Betonin puristuslujuuden ominaisarvo  |
| $f_{c;lyönti}$   | Suurin lyöntijännitys asennuksessa (puristusrasitus)                          |
| $f_{ctk}$        | Betonin vetolujuuden ominaisarvo  |
| $f_{cd}$         | Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo   |
| $f_{cm}$         | Puristuslujuuksien keskiarvo  |
| $f_{t;lyönti}$   | Suurin lyöntijännitys asennuksessa (vetorasitus)                              |
| $f_{yk}$         | Teräksen puristuslujuuden ominaisarvo   |
| $f_{yd}$         | Teräksen puristuslujuuden mitoitusarvo  |
| $f_{PDA}$        | Paalumateriaalille suurin sallittu jännitys PDA-mittauksessa                  |
| $F_{koe}$        | Taivutuskokeen ulkoinen kuorma  |
| $F_g$            | Koekappaleen oma paino  |
| $F_{max}$        | Maksimivoima  |
| $F_{c;u}$        | Paalun poikkileikkauksen puristusrasitus                                      |
| $F_{c;d}$        | Paaluun tai paaluryhmään kohdistuvan aksiaalisen puristuskuorman mitoitusarvo |
| $F_{c;lyönti}$   | Suurin lyöntivoima asennuksessa (puristusrasitus)                             |
| $F_{t;lyönti}$   | Suurin lyöntivoima asennuksessa (vetorasitus)                                 |
| $F_d$            | Kuorman mitoitusarvo  |
| $F_k$            | Kuorman ominaisarvo   |
| $i_{red}$        | Redusoitu pintahitaussäde   |
| $I$              | Pintahitausmomentti   |
| $I_c$            | Poikkileikkauksen betonin jäyhyysmomentti                                     |
| $k_{red}$        | Redusointikerroin   |
| $k_s$            | Mittaustason poikkileikkauksen raudoitustasoa huomioiva kerroin               |

|                 |  |
|-----------------|--|
| $K_p$           | Passiivinen maanpainekerroin   |
| $K_{FI}$        | Luotettavuusluokasta riippuva kuormakerroin  |
| $L_{cr}$        | Nurjahduspituus  |
| $L_p$           | Paalun pituus  |
| $M_g$           | Koekappaleen omasta painosta aiheutuva taivutusmomentti  |
| $M_k$           | Rakenteen momentinkestävyyden ominaisarvo  |
| $M_{koe}$       | Taivutuskokeen ulkoisen kuorman aiheuttama momentti  |
| $M_{max}$       | Maksimimomentti  |
| $M_{suositus}$  | Taivutusmomenttivaatimuksen suositusarvo   |
| $M_u$           | Paalun poikkileikkauksen taivutuskestävyys murtorajatilassa  |
| $M_{vaatimus}$  | Paalutusohjeen mukainen taivutusmomenttikestävyysvaatimus  |
| $n$             | Lukumäärä  |
| $p_m$           | Maan sivuvastuksen arvo murtorajatilassa   |
| $q$             | Tasainen pintakuorma   |
| $Q_g$           | Koekappaleen omasta painosta aiheutuva leikkausvoima   |
| $Q_{koe}$       | Taivutuskokeen ulkoisen kuorman aiheuttama leikkausvoima   |
| $Q_{max}$       | Maksimileikkausvoima   |
| $Q_{suositus}$  | Leikkausvoimavaatimuksen suositusarvo  |
| $Q_{vaatimus}$  | Paalutusohjeen mukainen leikkausvoimavaatimus  |
| $R_c$           | Paalun geotekninen puristuskestävyys murtorajatilassa  |
| $R_{c;d}$       | $R_c$ :n mitoitusarvo  |
| $R_{c;k}$       | $R_c$ :n ominaisarvo   |
| $R_{c;m}$       | $R_c$ :n mitattu arvo yhden tai useamman paalun kuormituksessa   |
| $R_d$           | Paalun geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo  |
| $R_{k;geo}$     | Geoteknisen kestävyuden ominaisarvo  |
| $R_{k;geo;max}$ | Geoteknisen kestävyuden yläraja  |
| $R_{d;max}$     | Paalun suurin lyömällä osoitettavissa oleva murtorajatilassa puristuskestävyys   |
| $s$             | Painuma  |
| $\alpha_{cc}$   | Puristuslujuuteen vaikuttavien pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät huomioiva kerroin. |
| $\gamma$        | Tehokas tilavuuspaino  |
| $\gamma_c$      | Betonin osavarmuusluku   |
| $\gamma_t$      | Teräsbetonipaalun varmuuskerroin   |
| $\varepsilon$   | Venymä   |
| $\xi$           | Korrelaatiokerroin   |
| $\rho_c$        | on betonin tiheys (2500 kg/m <sup>3</sup> )  |
| $\rho_s$        | on teräksen tiheys (7850 kg/m <sup>3</sup> )   |
| $\sigma$        | Jännitys   |

# 1 JOHDANTO

Suomen peruskallion yläpuoliset maakerrokset ovat muodostuneet jääkaudella. Kerrokset ovat pääosin savia, silttejä ja moreeneja. Sen sijaan kallioperä on yleensä hyvin lujaa. Paalun rakenteellisen kapasiteetin ollessa suuri, paalut joudutaan yleensä lyömään kallioon asti ennen kuin ne saavuttavat rakenteellista kantavuutta vastaavan geoteknisen kantavuuden. Tästä johtuen Suomessa käytetään paljon kalliokärjellisiä paaluja.

Kalliokärkiä on tutkittu pääosin Ruotsissa ja Norjassa. Suomessa niitä on tutkittu melko vähän. Tämän tutkimuksen tavoitteena on tarkastella kalliokärkien laatuvaatimuksia taivutusmomentin, leikkausvoiman ja vetovoiman osalta, sekä pohtia testausmenetelmiä, joilla selvitetään edellä mainitut vaatimukset. Paalutusohjeessa PO-2011 kalliokärjen momenttikestävyysvaatimukset eivät ole yksiselitteisiä. Epäselvää on esimerkiksi se, tarkoitetaanko momenttikestävyysvaatimuksilla kuorman kohdalle muodostuvaa momenttia vai paalun ja kalliokärjen liitokseen tulevaa momenttia?

Tämä tutkimus on rajattu koskemaan teräsbetonipaaluissa käytettäviä kalliokärkiä. Tutkimuksessa hyödynnetään kalliokärjille aiemmin suoritettuja tutkimuksia Suomesta ja maailmalta. Tutkimuksessa tarkastellaan kalliokärjelle asennusvaiheessa syntyviä rasituksia (momentti, leikkaus, veto) esim. lyötäessä paalua vinoon kalliopintaan. Tutkimuksessa pohditaan paalujen leikkausraudoitusmitoitusta sekä mahdollisuutta lisätä paalun pää- ja leikkausteräksiä kalliokärjen laatuvaatimuksia tutkittaessa.

Johdannossa määritellään työn aihepiiri ja mitä tutkimus sisältää. Toisessa luvussa käsitellään vanhoja ja nykyisiä kalliokärkien vaatimuksia Suomessa sekä nykyisiä vaatimuksia Ruotsissa ja Norjassa. Lisäksi toinen kappale sisältää aiempia kalliokärkitutkimuksia Suomesta ja maailmalta. Luvussa kolme esitellään työssä käytetyt tutkimusmenetelmät, koejärjestelyt sekä kalliokärkeen syntyvien jännitysten mallintaminen. Tulokset esitellään luvussa neljä ja tuloksia tarkastellaan luvussa viisi. Työn lopussa on yhteenveto kalliokärkien laatuvaatimuksista, koejärjestelyistä sekä pohditaan mahdollisia lisätutkimuksia.

## 2 TEOREETTINEN TAUSTA

### 2.1 Vanhat ja nykyiset vaatimukset Suomessa

Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry julkaisi ensimmäiset lyöntipaalutusohjeet (LPO-72) vuonna 1972. Lyöntipaalutusohjeiden ensimmäisenä tehtävänä oli lyöntipaalutustöiden yleisten suunnittelu- ja suoritusohjeiden laatiminen. Lyöntipaalutusohjeiden 1972 mukaan paalun kärki on suojattava valun yhteydessä paalun pituusakselin suhteen symmetrisellä paalukengällä. Kengän rakenne määritetään rakennuspaikan pohjasuhteiden mukaan. Jos paalun kärki tukeutuu kalliopintaan tai lohkaraiseen pohjamaakerrokseen ja liukumisvaara on olemassa, varustetaan paalu geoteknisen suunnittelijan harkinnan mukaan kalliokärjellä. [2 s.37]

Kalliokärjen tulee olla varustettu erillisellä karkaistusta kromiteräksestä valmistetulla kärkitapilla, jota ei saa hitsata kiinni. Tapin pintaosan tulee olla karkaistu kovuuteen 490-575 HB; sisäosan tulee kuitenkin pysyä sitkeänä. Kärkitapin ja paalun betonin välissä tulee olla riittävän paksu (50 mm) painetta jakava teräslevy ettei kärkitappi vahingoita paalua lyönnin aikana. Kalliokärjellä varustetun paalun betonin tulee olla lujuusluokkaa K50. [2 s.37-40] Vuoden 1972 lyöntipaalutusohjeissa ei kuitenkaan ole annettu vaatimuksia kalliokärjen taivutusmomentti-, leikkaus- tai vetokestävyydelle.

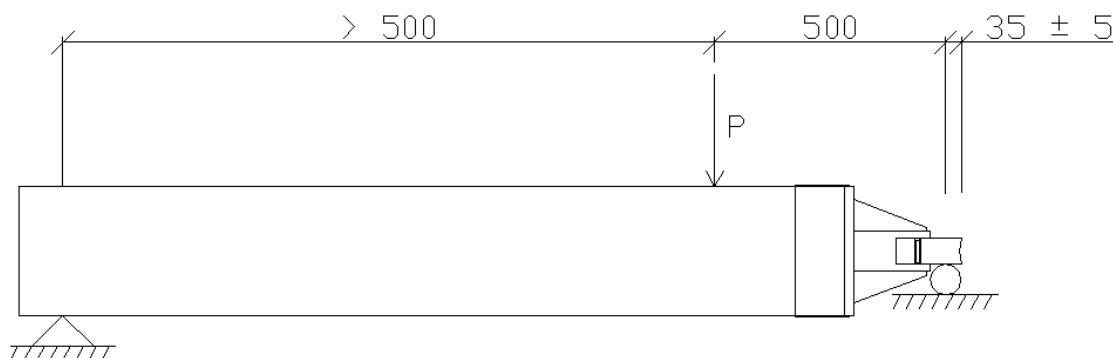
Lyöntipaalutusohjeissa 1979 on tarkennettu vuoden 1972 ohjeita. Jos paalutustyön aikana ilmenee tarvetta kalliokärjelle, voidaan ne tällöin liittää paaluihin jäykkäjatkoksia käyttäen. Poikkeuksellisesti voidaan suunnittelijan harkinnan mukaan käyttää irrallisia, holkilla varustettuja kalliokärkiä. Uuden kalliokärkityypin tulee olla käyttöön hyväksytty. [3 s.51-52]

Lyöntipaalutusohjeissa 1979 asetettiin kalliokärjen taivutus-, leikkaus- ja vetokestävyydelle vaatimukset. Kalliokärjen tulee kestää jatkoksen lyöntikoe ilman, että kalliokärkeen tulee toimintaa haittaavia muodonmuutoksia. Kalliokärjen tulee lyöntikokeen jälkeen pystyä siirtämään taulukossa 2.1 esitetyt momentit sekä veto- ja leikkausvoimat. Voimien ei tarvitse vaikuttaa samanaikaisesti. [3 s.52]

**Taulukko 2.1** Kalliokärjen laatuvaatimuksia, LPO-1979. [3 s. 52]

| Paalutusluokka      | Paalun koko               | Momentti [kNm] | Vetovoima [kN] | Leikkausvoima [kN] |
|---------------------|---------------------------|----------------|----------------|--------------------|
| II<br>Betonipaalut  | 250 x 250 mm <sup>2</sup> | 20             | 150            | 40                 |
|                     | 300 x 300 mm <sup>2</sup> | 25             | 200            | 50                 |
| III<br>Betonipaalut | 250 x 250 mm <sup>2</sup> | 15             | 150            | 30                 |
|                     | 300 x 300 mm <sup>2</sup> | 25             | 200            | 50                 |

Kalliokärjen mitoitus voidaan tarkistaa kuvan 2.1 mukaisella taivutuskokeella. Kuormaa lisätään portaittain murtoon saakka. [3 s.52]



**Kuva 2.1** Kalliokärjellä varustetun paalun taivutuskoe LPO-79. [3 s. 53]

LPO-87 Lyöntipaalutusohjeissa ei ole merkittäviä muutoksia vuoden 1979 Lyöntipaalutusohjeisiin. Vaatimukset ja kuormitusjärjestelyt ovat samat kuin vanhoissa ohjeissa. Esimerkkikalliokärjen mittoja on tarkennettu. [4]

Koepaaluille suoritettiin lyönti- ja taivutuskestävyyskokeet. Lyöntikoe suoritettiin harmonisoidun tuotestandardin SFS-EN 12794 mukaisella lyöntikoemenettelyllä. Kalliokärki täyttää puristuskestävyysvaatimukset, jos se kestää lyöntikokeen ilman toimintaa haittaavia muodonmuutoksia. Lyöntikokeen jälkeen kalliokärjen on täytettävä seuraavaksi esitetyt momentti-, leikkausvoima ja vetovoimavaatimukset. [1 s.164]

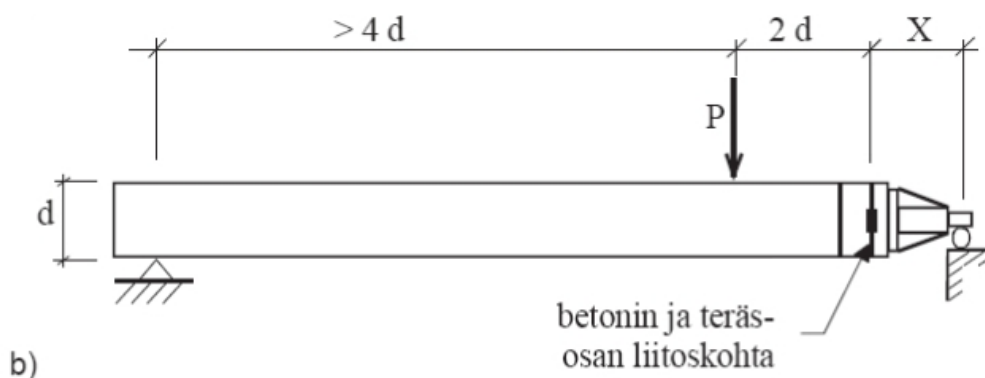
Lyöntipaalutusohjeen LPO-2005 mukaan teräsbetonipaalu tulee suojata kalliokärjellä, jos paalun kärki tukeutuu kallioon tai kiviseen tai lohkaraiseen maapohjaan. Geotekninen suunnittelija päättää kohteen kalliokärjen käytöstä. Lyöntipaalutusohjeessa 2005 annetut kalliokärjen laatuvaatimukset on esitetty taulukossa 2.2.

**Taulukko 2.2** Kalliokärjen laatuvaatimuksia, LPO-2005. [5 s. 37]

| Paalutusluokka | Paalun koko<br>mm <sup>2</sup> | Momentti<br>[kNm] | Leikkausvoima<br>[kN] | Vetovoima<br>[kN] |
|----------------|--------------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| IB             | 250 x 250                      | 25                | 50                    | 150               |
|                | 300 x 300                      | 35                | 65                    | 200               |
|                | 350 x 350                      | 50                | 85                    | 300               |
| II             | 250 x 250                      | 20                | 40                    | 120               |
|                | 300 x 300                      | 25                | 50                    | 150               |
|                | 350 x 350                      | 35                | 75                    | 210               |

Taivutuskoejärjestely on pysynyt muutoin samanlaisena kuin aikaisemmissa paalutusohjeissa, mutta lyöntipaalutusohjeessa LPO-2005 on taivutuskoejärjestelyn mitat annettu paalun halkaisijan avulla. Lyöntipaalutusohjeen 2005 mukainen taivutuskoejärjestely on esitetty kuvassa 2.2.





**Kuva 2.2** Kalliokärjellä varustetun teräsbetonipaalun taivutuskoejärjestelyt. Mitat valitaan siten, että taulukon 2.2 mukaiset arvot ovat määritettävissä. [5 s.37]

Paalutusohjeessa PO-2011 on annettu uudet vaatimukset teräsbetonipaalun kalliokärjen taivutus-, leikkaus-, ja vetokestävyyksivaatimuksille. Paalutusohjeen PO-2011 mukaan teräsbetonipaalun kalliokärjen momenttikestävyys määritetään kuvan 2.2 mukaisella koejärjestelyllä. Paalun momenttikestävyys on suurempi arvoista [1 s.164]:

$$\frac{R_{k;geo} \cdot d_{kärkitappi}}{10}$$

$$\frac{R_{k;geo} \cdot d_{paalu}}{20}$$

Leikkauskestävyyden tulee täyttää ehto:

$$\geq 0,04 \cdot R_{k;geo}$$

Vetokestävyyden tulee täyttää ehto:

$$\geq 0,15 \cdot R_{k;geo} \tag{2.4}$$

, missä  $R_{k;geo}$  on paalun geotekninen kantavuus.

Kuvan 2.2 mukaisessa kuormitusjärjestelyssä kuorman sijainti kalliokärjen puoleisesta tuesta voidaan harkita siten, että momentti ja leikkausvoima voidaan määrittää kalliokärjen ja paalun liitokohdassa yksiselitteisesti. Vetokestävyyksivaatimus katsotaan täyttyneeksi, jos kalliokärki lyönnin aikana pysyy kaikissa olosuhteissa paalun kärjessä siten, että se kykenee asennuksen jälkeen välittämään taivutusmomentti- ja leikkausvoimavaatimukset. [1 s.165]

## 2.2 Vaatimukset Ruotsissa ja Norjassa

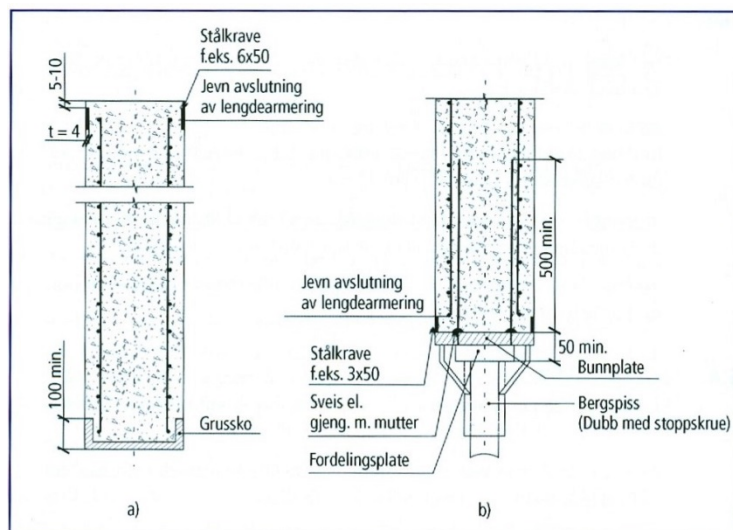
### 2.2.1 Vaatimukset Ruotsissa

Ruotsissa teräsbetonipaalujen kalliokärjet tehdään tällä hetkellä standardin SS811196 mukaan, joka käsittelee neliönmuotoisen teräsbetonipaalun kalliokärkiä. [6 s.1-4] Kalliokärjen kärkitapille on Ruotsissa oma standardi SS811192 [7 s.1]. Ruotsissa on kehitteillä uusi standardi, joka käsittelee betonipaalujen kalliokärkiä (Ny standard för bergskor för betongpålar SS81200). Uusi standardi tulee voimaan lähitulevaisuudessa.

### 2.2.2 Vaatimukset Norjassa

Paalun geoteknisen kestävyuden laskennassa ei norjalaisen paalutuskäsikirjan Peleveiledningen 2012 ja Paalutusohjeen PO-2011 välillä ole merkittäviä eroavaisuuksia. Peleveiledningen 2012 mukaan teräsbetonipaaluissa tulee käyttää kalliokärkiä, kun paalua lyödään kallioon, kiviseen tai lohkaraiseen maakerrokseen. Teräsbetonipaalun kärkitappi on tavallisimmin halkaisijaltaan 60-80 mm. Kalliokärjen tulee kestää lyönnin ja käytön aikaiset kuormat. Kalliokärjen dimensiot tulee valita siten, että kärkitappi osuu ensimmäisenä kovaan kerrokseen. Kärkitappin ja paalun alapään reunan tulee muodostaa vähintään 40 asteen kulma vaakatasoon nähden. [8 s.120]

Norjassa ei ole käytössä standardikalliokärkeä, vaan yrityksillä on omat kalliokärkityypit. [8 s.121] Kuvassa 2.3 on esitetty esimerkki norjalaisesta kalliokärjestä. Pohjalevyn tulee olla vähintään 50 mm paksu ja tartuntatateräksiä tulee olla vähintään neljä ja niiden tulee olla vähintään 500 mm pitkiä. [8 s.120]



Kuva 2.3 Esimerkki norjalaisesta teräsbetonipaalun maakärjestä ja kalliokärjestä [27, s.120]

## 2.3 Aiemmat kalliokärkitutkimukset

Aikaisemmat paalujen kalliokärkiä koskevat tutkimukset on tehty pääasiassa Ruotsissa ja Norjassa. Suomessa kalliokärkiä on tutkittu vain vähän. Hannu Jokiniemen teräspalkkipaalujen kalliokärkiä koskevassa diplomityössä on esitelty aiempia kalliokärkiä koskevia tutkimustuloksia sekä aiheeseen liittyviä ohjeita ja suosituksia. Hannu Jokiniemen diplomityössä on kehitetty kärkityyppiä, joka täyttää kalliokärjelle asetetut vaatimukset ja analysoitu teoreettisesti kalliokärjen käyttäytymistä kalliopinnalla. [10]

Teräbetonin iskunkestävyys on tärkeä ominaisuus paalutuksessa. On tärkeää, että betoni kestää toistuvat iskut ja säilyttää kestävyytensä iskujen jälkeen. Greenen [11] mukaan betonin iskunkestävyys on suurempi kuin betonin staattisessa kuormituksessa. Tämä johtuu luultavasti betonin heikommista kohdista, jotka löytyvät pitkäaikaisissa kuormituksissa, kun taas iskukokeessa iskun aiheuttama voima ei ehdi jakautua joka puolelle lyhyen vaikutusaikansa johdosta. Betonin iskunkestävyys kasvaa betonin puristuskestävyyden kasvaessa, mutta betonin staattisen puristuskestävyyden kasvaessa absorboituu vähemmän energiaa lyöntiä kohden ennen halkeilua.

Greenen [11] tekemän tutkimuksen mukaan betonin iskunkestävyys on riippuvainen käytetystä sideaineesta sekä betonin puristuslujuudesta. Betonin puristuskestävyyden pysyessä samana suuri ja karkeapintainen kiviaines kasvattaa betonin iskunkestävyyttä. Betonin iskunkestävyys saattaa kuitenkin olla enemmän sidoksissa betonin vetokestävyyteen. Betonin säilytysolosuhteet vaikuttavat betonin iskunkestävyyteen. Vedessä säilytetyn betonin iskunkestävyys on huonompi kuin kuivassa säilytetyn betonin, vaikka ensin mainittu voi kestää enemmän iskuja ennen halkeilua. Betonin iskunkestävyyttä ei voida tarkastella ilman mainintaa säilytysolosuhteista.

Yhdenmukaisesti suoritetuissa iskukokeissa (vaikea toteuttaa käytännössä) on havaittu, että betonin iskunkestävyys on selvästi suurempi kuin puristuskestävyys. Iskunkestävyyden kasvaminen selittää betonin kyvyn absorboida energiaa yhdenmukaisissa iskuissa. Iskunkestävyys kasvaa suuresti kun kuormitusnopeus on noin 500 GPa/s, jolloin iskunkestävyys voi olla jopa kaksinkertainen puristuskestävyyteen verrattuna. [12]

J.A.T Ruigrokin tutkimuksessa *Laterally Loaded Piles – Models and Measurements* on tutkittu erilaisia malleja ja laskentamenetelmiä sivukuormitetuille paaluille. Tutkimuksessa verrataan erilaisten laskentamallien tarkkuutta ja soveltuvuutta eritapauksiin. Tutkimukseen sisältyi kahdeksan erilaista laskentamallia: Blum, Brinch Hansen, Broms, Characteristic Load Method (CLM), Nondimensional Method (NDM), MSheet, p-y Curves ja Plaxis 3DFoundation. [26]

## 2.4 PDA-Mittaus

PDA-mittaus on iskualloteoriaan perustuva paalujen dynaaminen koekuormitusmenetelmä. Mittauksesta saatavaa tietoa voidaan käyttää apuna sekä suunnitteluvaiheessa, että paalutustyönvalvonnassa. [13 s.2] Paalutusohjeen PO-2011 mukaan paalutustyöluokassa 3 lyöntipaalujen geoteknisen kestävyuden ja loppulyöntiohjeen varmistamiseen käytetään aina dynaamista koekuormitusta tai vaihtoehtoisesti staattista koekuormitusta [1 s.57]. Lyöntipaalutusohjeen LPO-2005 mukaan paalutusluokissa Ia ja Ib edellytetään koekuormitusten tekemistä paalun kantavuuden varmistamiseksi [5 s.45-46]. PDA-mittauksella varmistetaan paalujen geotekninen kantavuus ja rakenteellinen kelpoisuus.

Koekuormitus PDA-mittauksella on nopeaa eikä se häiritse varsinaista paalutustyötä. PDA-mittauksessa selvitetään paalun geotekninen kantavuus. Kantavuuden avulla voidaan varmistaa suunnitelmien toteutettavuus, sekä mahdollisuuden mukaan lyhentää tarvittavaa paalupituutta ja sallia suurempia paalukuormia. PDA-mittaustuloksista voidaan tehdä SIGNAL-MATCHING -analyysi, jonka avulla voidaan selvittää paalun vaippa- ja kärkivastus, mikä mahdollistaa paalun tarkemman geoteknisen mitoituksen, koska vaippa- ja kärkivastukselle voidaan tällöin käyttää eri suuria varmuuskertoimia. Koepaalutuksen yhteydessä voidaan selvittää paalutyypin soveltuvuus kyseessä olevalle alueelle sekä optimoida paalupituuden vaikutus paalun kantavuuden suhteen. [13 s.3]

Ennen mittausten aloittamista mittaustensuorittajalla tulee olla tiedot mitattavan paalun dimensioista, sallitusta kuormasta, varmuuskertoimesta, paalutuskoneen teoreettisesta iskuenergiasta sekä paalun tavoitetasosta. Lisäksi mittaajalla tulee olla tiedot mitattavien paalujen läheisistä pohjatutkimuksista. Mitattavat paalut lyödään ennen PDA-mittausta tasoon tai lähelle tasoa, jossa oletetaan saavuttavan murtokuorman. [13 s.4]

PDA-mittauksessa lyöntienergia ei saa ylittää paalun rakenteellista kestävyyttä. Betonipaaluissa on varottava vetoaaltojen syntymistä, joiden seurauksena paalun yläpää voi rikkoutua. Lyönnin tulee olla keskitetty, sillä epäkeskinen lyönti aiheuttaa mittaussignaalien huonon yhteensopivuuden. Paalun kantavuutta ei voida huolellisesti mitata, jos mittaussignaalit sopivat huonosti yhteen. Keskeinen lyönti pienentää paalun yläpään rikkoutumisriskiä. [13 s.4-5].

Paalun toimintatapa on huomioitava PDA-mittausta suunniteltaessa. Kitka- ja koheesiopaalujen koekuormitus on syytä tehdä jälkilyönneistä, jos halutaan mitata paalujen maksimikantavuus. Paalun vaipan ja maanvälinen adheesio vaikuttaa paalun kantavuuteen. Kalliokärjelliset paalut kuitenkin kantavat suurimman osan kuormasta kärjellään, joten adheesio on pieni verrattuna kärkikantavuuteen. Kalliokärjelliset paalut voidaan kuormittaa varsinaisen paalun lyönnin yhteydessä. Parin päivän odotus voi kuitenkin parantaa kantavuutta kymmeniä prosentteja varsinkin, jos paalun kärki on häiriintymisherkässä moreenissa. [13 s.5]

PDA-mittauslaitteisto mittaa kaksi voimasignaali kuvaajaa. Kuvaajista voidaan päätellä signaalien yhteensopivuus ja sen perusteella mittauksen luotettavuus. Maksimivoima ja kärjestä heijastuneen voiman suuruus saadaan määritettyä kuvaajien keskiarvon avulla. Laitteisto määrittää keskiarvokäyrän automaattisesti. [13 s.18]

Nopeussignaali kuvaajasta voidaan päätellä alkunopeuden maksimiarvo ja arvio lyöntivastuksesta [13 s.19]. Paaluun siirtyneen energian kuvaajasta saadaan tieto paaluun siirtyneestä energiasta ajan funktiona, siirtyneen energian maksimiarvo ja ajanhetki. Energia-arvon avulla voidaan laskea lyöntikaluston tehokkuus, kun pudotuskorkeus ja järkäleen paino tunnetaan. [13 s.19] Siirtymäkuvaajasta saadaan paalun yläpään siirtymä ajan funktiona. Paalun yläpään siirtymä koostuu pysyvästä painumasta ja joustosta. Kiihtyvyyssignaali kuvaajasta saadaan selville kiihtyvyyden maksimiarvo ja ajanhetki. Lyöntivastuskuvaajassa kuvataan kokonaislyöntivastus ja valitun menetelmän ja vaimennuksen mukaan laskettu staattinen vastus ajan funktiona. [13 s. 20-21]

Mittauksen tärkeimmän ja käytetyimmän informaation sisältävät voimapartikkelinopeuskäyrät sekä ylös- ja alaspäin kulkevien iskuaaltojen käyrät. Voima- ja nopeuskuvaajien avulla saadaan ylös- ja alaspäin kulkevien iskuaaltojen kuvaajat. [13 s. 22]

Maaperä vaikuttaa PDA-mittauksesta saataviin kuvaajiin. Kärkivastuksen ollessa suuri paalun pysyvä painuma on pieni ja paalussa vaikuttaa puristusjäännitys. Tällöin ylöspäin kulkeva iskuaalto on puristusaalto. Paalun kärkivastuksen ollessa pieni paaluun syntyvä painuma on suuri ja paalussa vaikuttaa vetojäännitys. Kärkivastuksen ollessa pieni ylöspäin kulkeva iskuaalto on vetoaalto. [13 s. 22-24]

Maan ja paalun vaippapinnan välinen kitkavoima aiheuttaa paalun siirtyessä ylöspäin kulkevan puristusvoimaimpulssin ja alaspäin kulkevan vetovoimaimpulssin, joka summautuu alaspäin kulkevaan iskuaaltoon. Vaippavastus heikentää kärkiheijastusta. [13 s. 25]

Paalun kärjen ulottuessa kallioon asti on kärjen kärkiheijastus erittäin voimakas. Tällöin heijastuva voima on lähempänä iskuaaltoteorian tulosta  $F_{heij} = 2F_0$  (2.18) kuin suuren kärkivastuksen tapauksessa. [13 s.26]

PDA-mittauksen avulla voidaan arvioida paalun kuntoa. PDA-mittauksella voidaan selvittää onko paalu rikkoutunut lyöntitilanteessa. Paalun vauriokohdassa oleva rako aiheuttaa iskuaallon heijastumista ennen raon sulkeutumista kyseisestä kohdasta ylöspäin kulkevaksi vetoallokseksi. Nopeus- ja voimakäyrien avulla saadaan selvitettyä onko paalu ehjä vai poikki. Paalussa olevat jatkokset aiheuttavat vetoaaltoja, kuten vauriokohta. Jatkoksen ja vauriokohdan erottaa kuitenkin siitä, että nopeus-impedanssikäyrä on vain hetken voimakäyrän yläpuolella. [13 s.27]

Paalun käyristymisen suuruutta ei PDA-mittauslaitteistolla voida mitata, mutta signaaleista voidaan havaita käyristyminen. Paalun käyristyessä yhtälö  $t = 2L/c$  (2.19) ei täsmää ja kärkiheijastus on epäselvä. [13 s.27]

Avoimen putkipaalun tulppaantuminen voidaan selvittää PDA-mittauksella. Tällöin putkipaalun kuvaaja  $F-Z_v$  -kuvaaja alkaa käyttäytyä kuten suljetun paalun kuvaaja ja kärkiheijastus voimistuu. [13 s.28]

PDA-mittauksessa käytetty FPDS-2 -laitteisto laskee automaattisesti paalun kantavuuden Case-, Impedanssi- tai TNO-menetelmällä. Yhdysvalloissa 1970-luvulla kehitetty Case-menetelmä on yleisimmin käytetty menetelmä laskettaessa paalun kantavuutta PDA-mittausten perusteella. Case-menetelmän mukainen kantavuuden laskenta perustuu kokonaislyöntivastuksen ( $R_T$ ) määrittämiseen voima- ja nopeus-impedanssikäyrän avulla. Paalun staattinen kantokyky saadaan vähentämällä kokonaislyöntivastuksen lyhyestä vaikutusajasta aiheutuvan dynaamisen lyöntivastuksen ( $R_d$ ) osuus vaimennuskerrointa ( $J_c$ ) hyväksi käyttäen ja jakamalla tulos varmuuskertoimella. Suositeltava varmuuskerroin on olosuhteista riippuen  $F = 2,0 - 2,5$ . (2.20) [13 s.30]

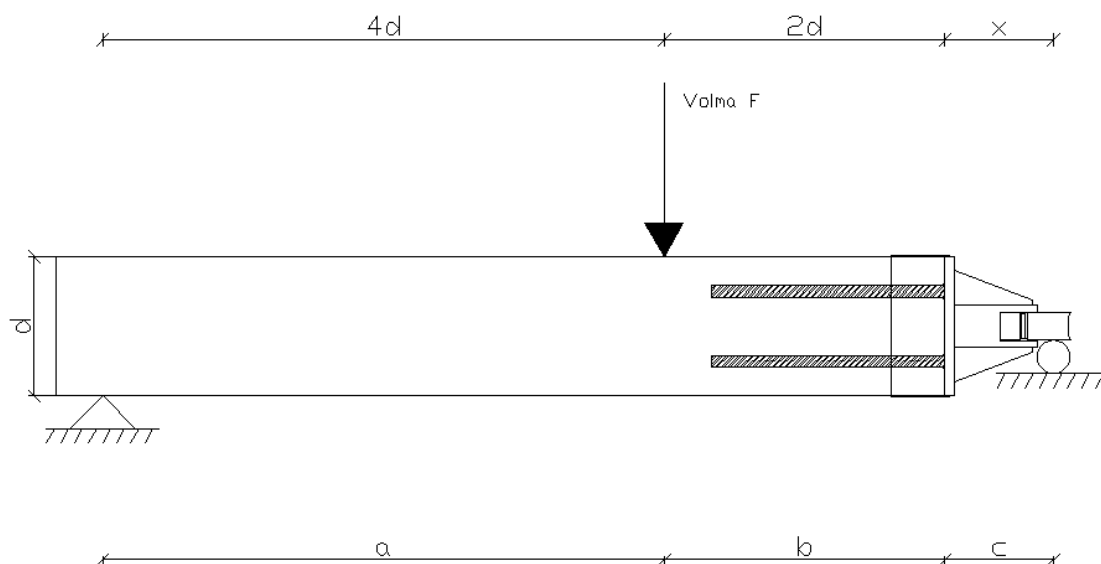
PDA-mittausta voidaan jatkoanalysoida TNOWAVE-menetelmällä, jonka tuloksena saadaan muun muassa paalun kantavuus, paalun toimintatapa, kuormasiirtymäkäyrä ja lyöntijännitykset eritasoilla. TNOWAVE-analyysi perustuu signal-matching -tekniikkaan eli paalun ja maan muodostaman systeemin mallintamiseen. Analyysillä voidaan vähentää hitaiden staattisten kuormitusten tarvetta. Ohjelmistoa voidaan käyttää myös kitka- ja koheesiopaalujen riittävän paalupituuden ja staattisen murtokuorman määrittämiseen. Paalun vaippa- ja kärkivastuksen osuus sekä paalun toimintatapa voidaan selvittää TNOWAVE-laskennan avulla. TNOWAVE-analyysiä tarvitaan, kun PDA-mittausten perusteella laskettu kantavuus on epäluotettava esimerkiksi, kun kitka- ja koheesiopaalujen dynaamista vaimennusta on vaikea arvioida luotettavasti. Analyysiä käytetään myös silloin, kun halutaan lisätä suunnittelijan varmuutta ja saada mahdollisimman paljon tietoa paalusta. Analyysin luotettavuus riippuu mitattujen signaalien yhteensopivuudesta, eikä sitä voida tehdä huonosti yhteensopivien signaalien avulla. Mitattujen ja laskettujen iskuaaltokäyrien yhteensopivuus vaikuttaa analyysin luotettavuuteen. Hyvää yhteensopivuutta ei yleensä saavuteta paalun vaurioituessa tai käyristyessä lyönnin aikana. [13 s.40-42]

PDA-mittauksen luotettavuutta kuvaa hyvin signaaliparien, kahden voima-signaalikäyrän ja kahden nopeussignaalikäyrän, yhteensopivuus. Yhteensopivuutta voidaan tarkkailla mittauksen aikana, jolloin esimerkiksi lyönnin epäkeskisyydestä aiheutuva voimasignaalien huono yhteensopivuus voidaan korjata. Mittaussignaalien tulee olla yksiselitteisesti tulkittavissa, muuten tuloksia ei voida luotettavasti käyttää kantavuuden määrittämiseen. Lisäksi mittaustentekijän ja analysoijan tulee olla riittävän ammattitaitoisia. [13 s.42]

Karkearakeiseen maakerrokseen tai kallioon ulottuvien paalujen kantavuutta määritettäessä on dynaaminen koekuormitus luotettavimmillaan. Karkearakeisessa maalajissa dynaamisen vaimennuksen osuus on pieni eli vaimennuskerroin on pieni, jolloin staattinen kantavuus on likimain yhtä suuri tai vain vähän pienempi kuin kokonaislyöntivastus. Pehmeistä maalajeista saatuihin tuloksiin pitää suhtautua hieman varovaisemmin. Dynaamisten koekuormitusten luotettavuutta voidaan parantaa TNOWAVE-analyysillä. [13 s.42]

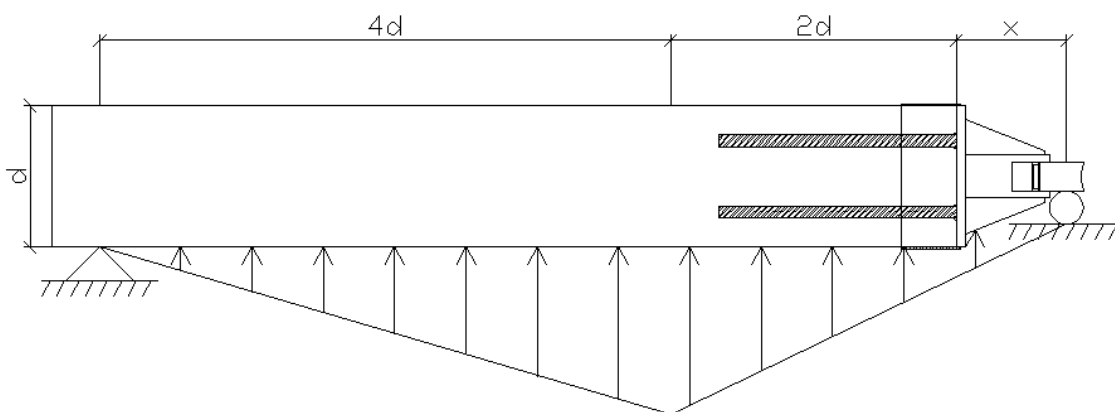
## 2.5 Kalliokärkien rakenteellisten vaatimusten teoria

Kalliokärjellä varustettujen paalujen taivutuskokeet suoritettiin Paalutusohje 2011:n (RIL254-2011) mukaisesti TTY:n rakennuslaboratoriossa 25.3.2013 ja 26.3.2013. Kuormitus toteutettiin 270 kN:n hydraulisella työsylinterillä. Työsylinteriltä tuleva kuorma siirrettiin kalliokärjelliselle paalulle pistekuormana. Taivutuskokeet suoritettiin kuvan 2.4 mukaisella koejärjestelyllä.



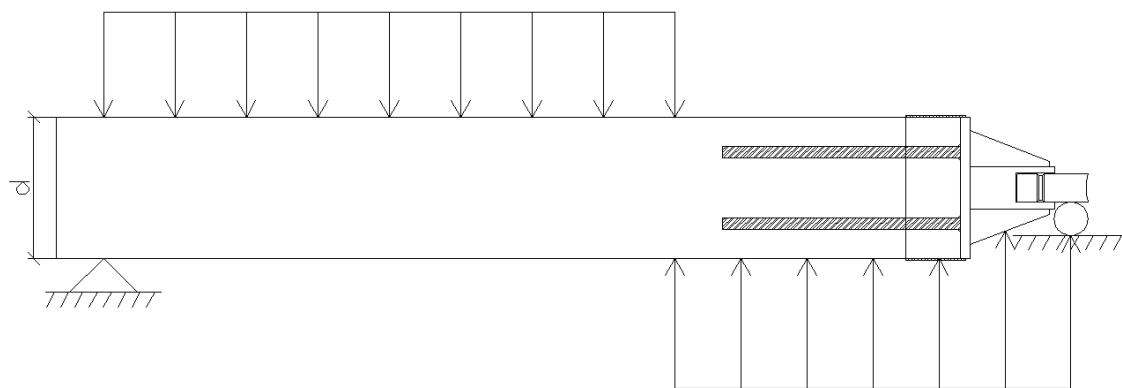
**Kuva 2.4** Kalliokärjellä varustetun teräsbetonipaalun taivutuskoejärjestely.

Taivutuskokeessa paaluun aiheutuva taivutusmomentti on esitetty kuvassa 2.5. Taivutusmomentin maksimi muodostuu kuormapisteen kohdalle.



**Kuva 2.5** Taivutuskokeen aiheuttama taivutusmomenttijakauma. Taivutusmomentinmaksimi muodostuu kuormapisteen kohdalle.

Taivutuskokeessa paaluun aiheutuva leikkausvoimajakauma on esitetty kuvassa 2.6. Leikkausvoiman maksimi muodostuu kalliokärjen ja kuormapisteen välille. Tällöin leikkausvoima on suurimmillaan kalliokärjen ja paalun liitoskohdassa.



**Kuva 2.6** Taivutuskokeen aiheuttama leikkausvoimajakauma. Leikkausvoimanmaksimi muodostuu kalliokärjen ja kuormapisteen välille.

Teräsbetonipaalujen kalliokärjille asetetut vaatimukset on esitetty Paalutusohjeessa PO-2011. Teräsbetonipaalu on varustettava kalliokärjellä, kun paalu lyödään kallioon, todennäköiseen kallioon, vinoon kalliopintaan tai kiviseen tai lohkaraiseen maakerrokseen. Kalliokärjen käytöstä päättää kohteen vastaava pohjarakennesuunnittelija. [1 s.162-163].

Kalliokärki mitoitetaan siten, että kärkikappale ja -tappi kestävät siihen kohdistuvat puristusrasitukset. Kärkitapin ja kärkikappaleen kiinnitys mitoitetaan siten, että lyönnin aiheuttamat vetoaallot eivät irrota kärkitappia tai -kappaletta. Kalliokärkeen kohdistuu taivutusrasitusta, kun paalua lyötäessä lohkaraisen tai kivisen maakerroksen läpi sekä kärjen kohdatessa vinon kalliopinnan. Kalliokärjen taivutusrasitus ennen kärkitapin tunkeutumista kallioon riippuu lyöntivoimasta ja kalliopinnan kaltevuudesta.

J.A.T Ruigrokin tutkimuksessa Laterally Loaded Piles – Models and Measurements on tutkittu erilaisia malleja ja laskentamenetelmiä sivukuormitetuille paaluille. Tutkimuksessa verrataan erilaisten laskentamallien tarkkuutta ja soveltuvuutta eritapauksiin. Tutkimukseen sisältyi kahdeksan erilaista laskentamallia: Blum, Brinch Hansen, Broms, Characteristic Load Method (CLM), Nondimensional Method (NDM), MSheet, p-y Curves ja Plaxis 3DFoundation. [15] Lähimpänä Paalutusohjeessa 2011 esitettyä mallia on Bromsin malli [15 s.7-8].

Bromsin malli on käytössä monissa maissa. Bromsin malli soveltuu etenkin koheesiomaahan asennettuihin lyhyihin paaluihin, mutta sen käyttöä on laajennettu myös pitkiin, kiinnitettyihin ja kitkamaahan asennettuihin paaluihin. [15 s.103]

Tässä työssä on käytetty Paalutusohjeen 2011 mukaista mallia. Mallia on kuitenkin sovellettu siinä määrin, että kalliokärjen liukuessa kaltevalla kalliopinnalla sivukuormitus kohdistuu paalun yläpäähän sijasta paalun juureen.

Paalun kestävyuden kannalta kriittisin tilanne on sellainen, missä kalliokärki pääsee liukumaan kalliopintaa pitkin, jolloin kärkeen muodostuu vaakaturkireaktio, joka aiheuttaa kärkeen leikkausvoima- ja taivutusmomenttirasituksen. Vaakatukireaktion vastavoimana toimii tällöin paalua ympäröivän maa-aineksen paalun varteen kohdistama tukipaine. Sivuvastuksen murtoarvot  $P_m$  (ominaisarvot) lasketaan jäykälle paalulle karkearakeisessa maassa seuraavalla kaavalla [1 s.91]:



$$P_m = 3,0 \dots 4,4 \cdot \gamma \cdot d \cdot K_p \quad (2.5)$$

, missä  $P_m$  on sivuvastuksen murtoarvo;  
 $\gamma$  on tehokas tilavuuspaino [ $\text{kN/m}^3$ ];  
 $d$  on paalun halkaisija tai sivun pituus [m];  
 $K_p$  on passiivinen maanpainekerroin.

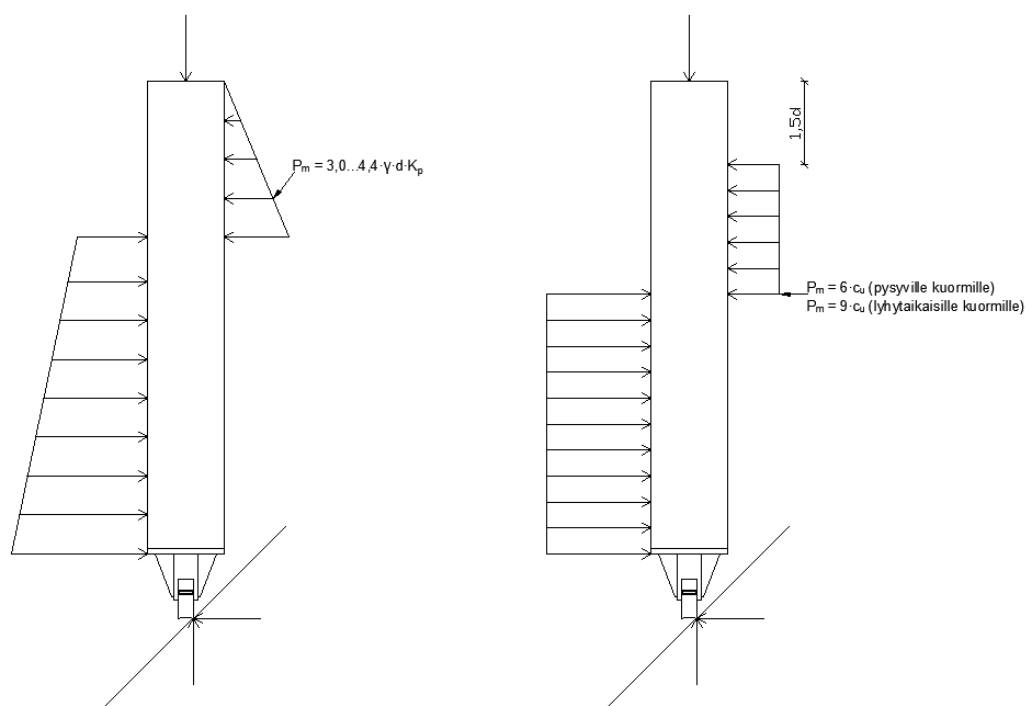
Hienorakeisessa maassa sivuvastuksen murtoarvot lasketaan kaavoilla [1 s.91]:

$$P_m = 6 \cdot c_u \quad \text{Pysyville kuormille} \quad (2.6)$$

$$P_m = 9 \cdot c_u \quad \text{Lyhytaikaisille kuormille} \quad (2.7)$$

, missä  $P_m$  on sivuvastuksen murtoarvo;  
 $c_u$  on suljettu leikkauslujuus [ $\text{kN/m}^2$ ].

Kuvassa 2.7 on esitetty periaate paaluun muodostuvista voimista, kun paalua lyödään vinoon kallioon. Kalliokärjen kestävyyttä kuvan 2.7 tapauksen aiheuttamia kuormia kohtaan tutkitaan kuvan 2.4 mukaisella taivutuskokeella.



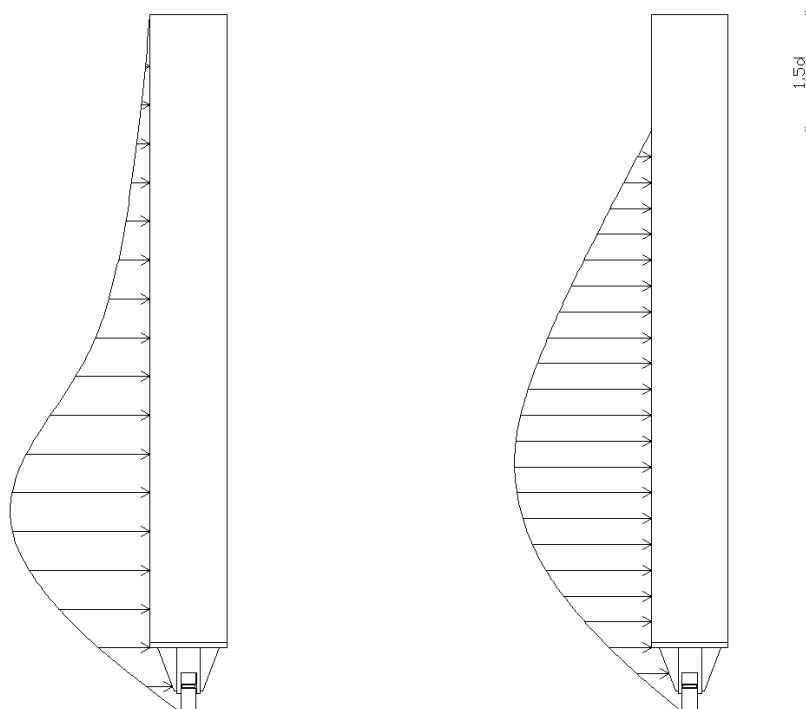
**Kuva 2.7** Paalun kohdistuvat rasitukset kalliokärjen liukuessa kallion pinnalla. Vasemman puoleisessa kuvassa on esitetty tapaus karkearakeisessa maassa ja oikealla kuormat on esitetty hienorakeisessa maassa. Sivuvastuksen murtoarvot  $P_m$  (ominaisarvot) jäykälle paalulle karkearakeisessa ja hienorakeisessa maassa.

Taivutuskokeen tukien ja kuorman paikat muodostuvat maahan asennettuun paaluun syntyvien sivusuuntaisten voimien sekä kalliokärkeen muodostuvan vaakasuuntaisen kuorman mukaan. Maan aiheuttama maanpaine muodostaa paalun varteen kuorman, jonka resultantti muodostuu noin kolmasosapisteeseen paalun alapinnasta. Resultantin muodostumiskohta on riippuvainen maasta, johon paalua

asennetaan, joten yksiselitteisiä ja tarkkoja mittoja ei resultantin paikasta voida antaa. Tästä johtuen taivutuskokeen mitat tulisi valita siten, että kalliokärjelle asetetut vaatimukset ovat määritettävissä.

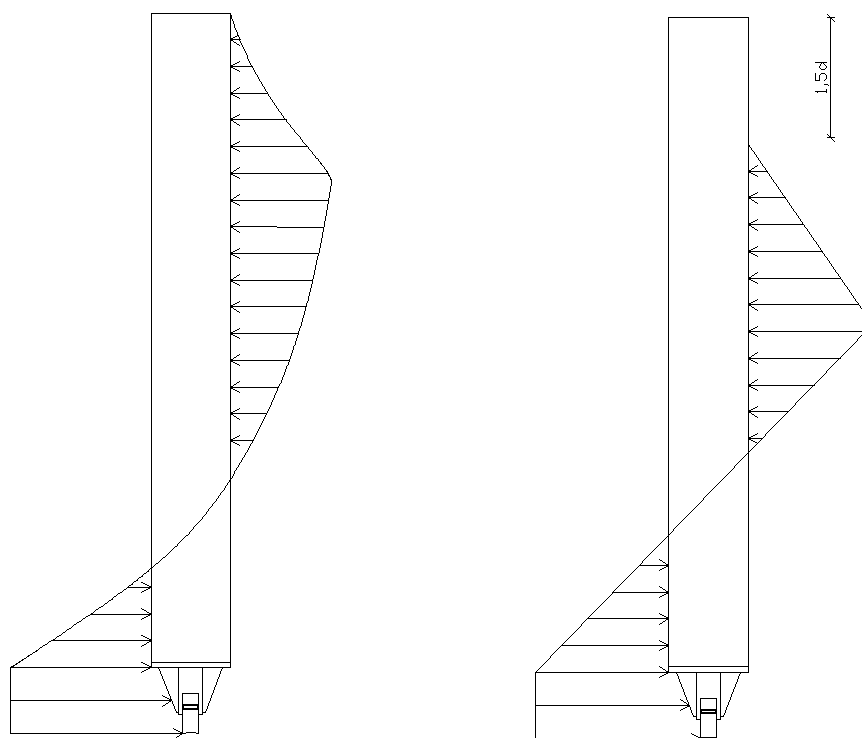
Taivutuskokeen mitat on annettu paalun halkaisijan avulla, jolloin paalun koko ei muuta mittasuhteita. Paalun kuorman etäisyys kalliokärjestä saadaan, kun kuvan 2.4 mukainen mitta  $X$  ja paalun kaksinkertainen halkaisija lasketaan yhteen. Kuorman sijainti paalun yläpäästä on puolestaan vähintään neljä kertaa paalun halkaisija. Tällöin kuormituskokeen tukien- ja kuorman paikka muodostuu lähelle kolmasosapistettä, johon maanpaineesta aiheutuvan kuorman resultantti likimain muodostuu. Tällöin momentin maksimi kohta muodostuu kuormapisteen kohdalle, joten paalutusohjeen PO-2011 mukaiset taivutusmomenttivaatimukset tulisi tulkita kuormapisteen kohdalla eikä kalliokärjen ja paalun liitoskohdassa. Tätä tukee myös se, että taivutusmomentin suuruus kuormapisteenkohdalla on moninkertainen liitoskohtaan verrattuna.

Paalun liukuessa vinolla kalliopinnalla muodostuu paaluun taivutus ja leikkausrasituksia. Paalun asennuksen aikaiset vinon kalliopinnan aiheuttamat taivutusmomentit on esitetty kuvassa 2.8. Muodostuvat taivutusmomentit riippuvat maan ominaisuuksista, joten kuvaajat muuttuvat maan mukaan. Tässä on esitetty esimerkkikuvaajat karkea- ja hienorakeisessa maassa.



**Kuva 2.8** Paalun muodostuvat taivutusrasitukset kalliokärjen liukuessa kallion pinnalla. Vasemman puoleisessa kuvassa on esitetty tapaus karkearakeisessa maassa ja oikealla hienorakeisessa maassa.

Paalun liukuessa vinolla kalliopinnalla paaluun syntyy kuvan 2.9 mukaiset leikkausvoimat. Kalliokärjen ja paalun liitoskohdassa leikkausvoima muodostuu kriittisemmäksi. Paalun varressa puolestaan taivutusmomenttikestävyys on tärkeämpää. Taivutusmomentin tavoin myös leikkausvoimat ovat riippuvaisia maaperästä.



**Kuva 2.9** Paalun muodostuvat leikkausrasitukset kalliokärjen liukuessa kallion pinnalla. Vasemman puoleisessa kuvassa on esitetty tapaus karkearakeisessa maassa ja oikealla hienorakeisessa maassa.

Sivukuormituksessa kiertokeskuksen paikka lasketaan momenttitasapainoehdon perusteella. Homogeenisessa maassa kiertokeskus sijaitsee likimain syvyydellä, joka on 70 % paalun asennussyvyydestä [1 s.90]. Homogeenisessa hienorakenteisessa maassa sivuvastuksen arvo voidaan olettaa vakioksi syvyydestä riippumatta, joten vaakasuuntaisen kuorman kohdistuessa paalun juureen voidaan kiertokeskuksen paikan ajatella olevan likimain 30 % syvyydellä asennussyvyydestä. Karkearakeisessa maassa sivuvastuksen murtoarvon voidaan olettaa kasvavan lineaarisesti syvyyden kasvaessa, joten kiertokeskuksen paikka on aina laskettava momenttitasapainoehdon mukaan.

Paaluun kohdistuvien sivuvastuksien ja -kuormitusten suuruus on riippuvainen asennusmaaperästä ja asennussyvyydestä. Lyhyillä asennuspituuksilla voi maa murtua ennen paalua.

Paalun sivukapasiteetin ja -siirtymien laskemisessa tarvittavat alustaluvut ja maaparametrit valitaan siten, että niiden epäedullisin vaikutus rakenteen kuormitukseen tulee eri suunnittelutilanteissa huomioitua. Paalua mitoitettaessa sivukuormaa vastaavalle taivutukselle ja siirtymälle valitaan vaakasuora alustaluku vaihteluvälin alarajan mukaan. Paalun rakenteellista kestävyyttä mitoitettaessa kutistuman tai lämpötilan aiheuttamille pakkovoimille valitaan vaakasuora alustaluku sivuvastuksen laskentaan vaihteluvälin ylärajan mukaan. [5 s.63]

Maan alustaluku ja moduuli ovat muodonmuutosominaisuuksia, joina käytetään ominaisarvoja. Varmuus kohdistetaan maan ja paalun lujuusominaisuuksiin. Alustaluvut eivät ole maan materiaaliparametreja vaan myös rakenteen mitat vaikuttavat niihin. [5 s.63]

Rakennusteollisuuden tuotelehden PO-2011 mukaiseen paalutustyöhön mukaisten paalujen momentti-, leikkaus- ja vetokestävyysvaatimukset on koottu taulukoihin 2.3-2.7. Vaatimukset on laskettu Paalutusohjeen PO-2011 mukaisilla kaavoilla ja  $R_{k,geo}$  -arvo on määritetty tuotelehden  $R_{d,max}$  -arvon avulla.

**Taulukko 2.3** Paalun 250a kalliokärjen vaatimukset eri paalutustyöluokissa. Geoteknisen kestävyuden arvona on laskuissa käytetty  $R_{k,geo}$  -arvoa.

| <b>Paalu 250a</b><br><b>Kärkitappi d=59,5 mm</b> | Momenttikestävyys<br>[kNm] | Leikkauskestävyys<br>[kN] | Vetokestävyys<br>[kN] | $R_{k,geo}$ [kN] |
|--|----------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|
| PTL1   | 10,9                       | 34,9                      | 131,0                 | 873              |
| PTL2   | 12,0                       | 38,4                      | 144,0                 | 960              |
| PTL3   | 13,3                       | 42,7                      | 160,1                 | 1067             |

**Taulukko 2.4** Paalun 250b kalliokärjen vaatimukset eri paalutustyöluokissa. Geoteknisen kestävyuden arvona on laskuissa käytetty  $R_{k,geo}$  -arvoa.

| <b>Paalu 250b</b><br><b>Kärkitappi d=59,5 mm</b> | Momenttikestävyys<br>[kNm] | Leikkauskestävyys<br>[kN] | Vetokestävyys<br>[kN] | $R_{k,geo}$ [kN] |
|--|----------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|
| PTL1   | 12,3                       | 39,4                      | 147,6                 | 984              |
| PTL2   | 13,5                       | 43,3                      | 162,5                 | 1083             |
| PTL3   | 15,0                       | 48,1                      | 180,5                 | 1203             |

**Taulukko 2.5** Paalun 300b kalliokärjen vaatimukset eri paalutustyöluokissa. Geoteknisen kestävyuden arvona on laskuissa käytetty  $R_{k,geo}$  -arvoa.

| <b>Paalu 300b</b><br><b>Kärkitappi d = 59,5 mm</b> | Momenttikestävyys<br>[kNm] | Leikkauskestävyys<br>[kN] | Vetokestävyys<br>[kN] | $R_{k,geo}$ [kN] |
|--|----------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|
| PTL1   | 21,0                       | 56,1                      | 210,3                 | 1402             |
| PTL2   | 23,1                       | 61,7                      | 231,3                 | 1542             |
| PTL3   | 25,7                       | 68,6                      | 257,3                 | 1715             |

**Taulukko 2.6** Paalun 300c kalliokärjen vaatimukset eri paalutustyöluokissa. Geoteknisen kestävyuden arvona on laskuissa käytetty  $R_{k,geo}$  -arvoa.

| <b>Paalu 300c</b><br><b>Kärkitappi d = 59,5 mm</b> | Momenttikestävyys<br>[kNm] | Leikkauskestävyys<br>[kN] | Vetokestävyys<br>[kN] | $R_{k,geo}$ [kN] |
|--|----------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|
| PTL1   | 24,3                       | 64,9                      | 243,5                 | 1623             |
| PTL2   | 26,8                       | 71,4                      | 267,8                 | 1785             |
| PTL3   | 29,7                       | 79,3                      | 297,5                 | 1983             |

**Taulukko 2.7** Paalun 350a kalliokärjen vaatimukset eri paalutustyöluokissa. Geoteknisen kestävyuden arvona on laskuissa käytetty  $R_{k,geo}$ -arvoa.

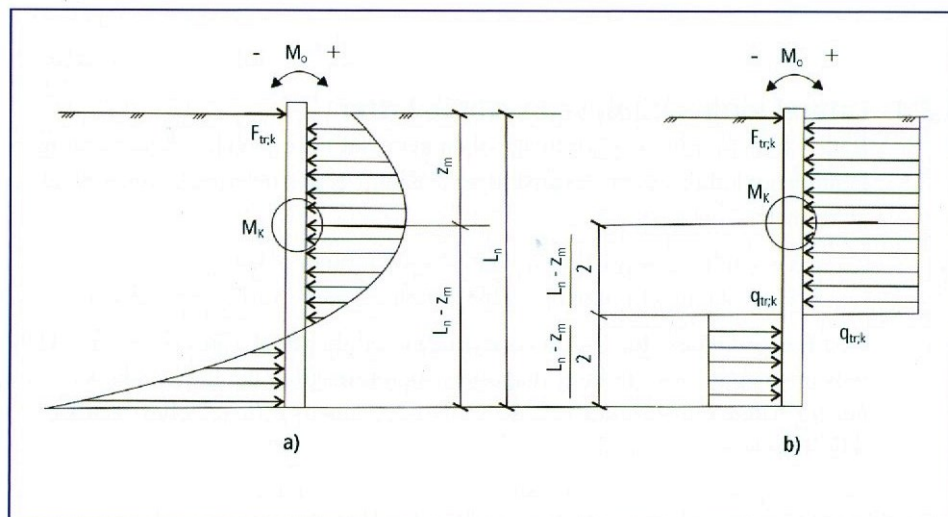
| <b>Paalu 350a<br/>Kärkitappi d = 79,5 mm</b> | Momenttikestävyys<br>[kNm] | Leikkauskestävyys<br>[kN] | Vetokestävyys<br>[kN] | $R_{k,geo}$ [kN] |
|--|----------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|
| PTL1   | 38,1                       | 87,1                      | 326,6                 | 2177             |
| PTL2   | 41,9                       | 95,8                      | 359,4                 | 2396             |
| PTL3   | 46,6                       | 106,5                     | 399,3                 | 2662             |

Vetokestävyys ei näytä muodostuvan ongelmaksi, sillä paalun lyöntikokeessa muodostuvat heijastusaallot eivät ole suuruudeltaan lähelläkään lyönnin aiheuttamia puristusvoimia. Lyöntikokeessa syntyvien vetojännitysten suuruudet on esitetty kohdassa 4.

Paalun kestävyuden kannalta kriittisempi tapaus on sellainen, jossa paalun alareuna ottaa kiinni kallioon, jolloin paalun taivutusmomentti kasvaa. Kärkitappin liukuessa kallion pinnalla muodostuu leikkausvoima kriittisemmäksi paalun kestävyuden kannalta kuin taivutusmomentti. Nykyinen taivutuskoejärjestely on hyvä tapa varmistaa paalun riittävä taivutus- ja leikkauskestävyys.

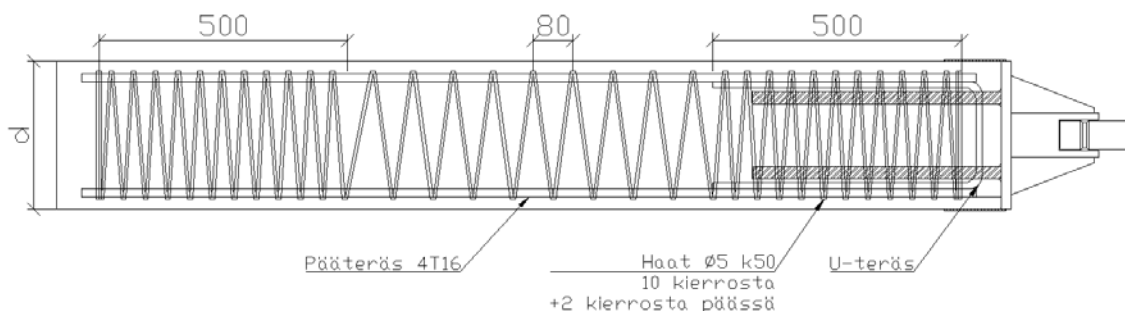
Kalliokärkeen ja paalun varteen kohdistuu taivutusrasituksia, kun paalua lyödään vinoon kallioon tai kiviseen ja lohkareiseen maakerrokseen. Vino kallio aiheuttaa kuvan 2.7 mukaiset voimat paaluun. Kalliokärjen ja paalun liitoskohdassa leikkausvoimakestävyys vaikuttaisi olevan kriittisempi kuin taivutuskestävyys. Paalun varressa myös taivutusmomentti voi murtaa paalun varren. Nykyinen taivutuskoe on varsin hyvä tapa selvittää paalun kestävyyttä, kun sitä lyödään vinoon kallioon. Kalliokärjen liukuessa vinoa kalliopintaa pitkin, alkaa paaluun syntyä epäkeskisyyttä sekä sivuttaissuuntaisia voimia. Vino kalliopinta aiheuttaa kalliokärkeen sivuttaissuuntaisen voiman. Maanpaine aiheuttaa paaluun sivusuuntaisen kuorman koko paalun varren matkalle.

Norjalaisessa paalutuskäsikirjassa Peleveledningen 2012 on esitetty hieman erilainen teoria vaakakuormitetun paalun kuormien muodostumiseen ja laskemiseen. Norjalaisessa laskutavassa paalun yläpään ajatellaan kohdistuvan vaakavoima  $F_{tr,k}$  ja momentti  $M_0$ . Kuvassa 2.10 on esitetty paaluun kohdistuvat todelliset kuormat ja yksinkertaistetut laskentakuormat. [8 s.100-102]



**Kuva 2.10** Peleveiledningen 2012 mukainen vaakakuormien muodostuminen, kun paalun yläpäähän vaikuttaa voima  $F_{tr,k}$  ja momentti  $M_0$ . Kohdassa a) on esitetty todelliset kuormat ja kohdassa b) on esitetty kuormat yksinkertaistettuna.

Kalliokärjellisen teräsbetonipaalun voidaan ajatella taivutustilanteessa toimivan leukapalkin tavoin. Tästä johtuen paalun ja kalliokärjen liitoskohdasta saataisiin kestävämpi, jos paaluun asennettaisiin kuvan 2.11 mukaiset leikkausteräkset. Tällöin liitoskohdan leikkauskestävyys paranee ja kalliokärjen liitoksesta tulee kestävämpi. Koestettujen paalujen liitos kuitenkin kesti kuormat hyvin ilman erillisiä leikkausteräksiä.



**Kuva 2.11** Rakenneratkaaisu, jolla voitaisiin parantaa kalliokärjen ja paalun liitoskohdan leikkauskestävyyttä.

Kalliokärjellisen teräsbetonipaalun taivutuskestävyys on mahdollista määrittää paalun varren kestävyden avulla, koska kalliokärkiä tutkittaessa paalu näyttäisi tavallisimmin murtuvan paalun varresta tai leikkausmurtona kalliokärjen ja paalun liitoskohdan läheisyydestä. Kalliokärkipaalut ovat käytännössä kaikki rakennusteollisuuden julkaiseman tuotelehden PO-2011 mukaiseen paalutustyöhön [16] mukaisia. Tällöin paalun varren momenttikestävyysvaatimukset ovat paalutyypeittäin samoja riippumatta siitä millainen kalliokärki niihin on kiinnitetty. Tästä johtuen kalliokärkipaalujen momenttikestävyysvaatimus on mahdollista antaa paalutyypeittäin paalun varren taivutuskestävyyden avulla.

## 3 TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

### 3.1 Koekappaleet ja laatuvaatimukset

Tutkittavaan koesarjaan kuului viisi kalliokärjellistä teräsbetonipaalua. Koepaalut olivat rakennusteollisuuden julkaiseman tuotelehden mukaisia paaluja. Paalut olivat tyypiltään 250a, 250b, 300b, 300c ja 350a. Koepaalujen kalliokärjet olivat Leimet Oy:n valmistamia ja ne eroavat jonkin verran Suomessa käytössä olevista kalliokärkityypeistä.

Paalut valettiin HTM-Yhtiöt Oy:n toimesta 4.2.2013 Hausjärven Ryttylässä. Paaluissa käytetyn betonin nimellislujuus oli C40/50 (EN 206). Pääterästen betonipeitteen nimellisarvo oli 30 mm. Koekappaleiden todelliset betonipeitepaksuudet ja raudoituksen sijainnit on esitetty liitteessä I.

Lyöntikokeet suoritettiin kaikille koepaaluille. Lyöntikokeiden jälkeen teräsbetonipaalut toimitettiin TTY:lle 22.2.2013. Taivutuskokeet suoritettiin kaikille koepaaluille. Lyöntikokeiden aikainen betonin puristuslujuus testattiin 20.2.2013 koekappaleista, jotka valettiin paalujen valun yhteydessä. Koekappaleet olivat 150 mm x 150 mm suuruisia kuutioita. Taivutuskokeiden aikainen betonin puristuslujuus testattiin paalujen valun yhteydessä valetuista koekappaleista kuormituspäivänä 25.3.2013. Lyöntikokeen aikaisen betonin puristuslujuudet on esitetty taulukossa 3.1. ja taivutuskokeen aikainen betonin puristuslujuus on esitetty taulukossa 3.2.

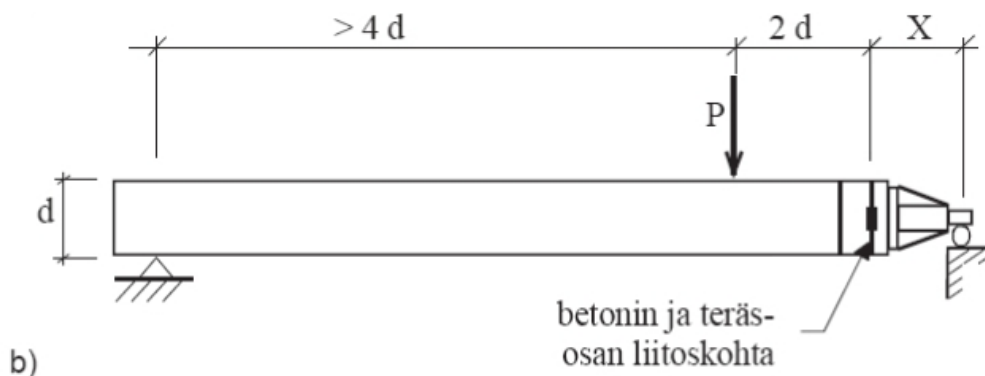
**Taulukko 3.1** Lyöntikokeen aikaisen betonin puristuslujuustulokset.

| Testaus päivämäärä | Lujuus- ja rakenneluokka | Ikä [d] | Puristuslujuus [MPa] | Keskiarvo [MPa] | Keskihajonta [MPa] | Murtokuorma [kN] | Massa [g] |
|--------------------|--------------------------|---------|----------------------|-----------------|--------------------|------------------|-----------|
| 20.2.2013          | C40/50 (K50)             | 16      | 58,8                 | 58,2            | 1,0                | 1323             | 7878      |
|                    | C40/50 (K50)             | 16      | 58,7                 |                 |                    | 1321             | 7880      |
|                    | C40/50 (K50)             | 16      | 57,1                 |                 |                    | 1284             | 7863      |

**Taulukko 3.2** Taivutuskokeen aikaisen betonin puristuslujuustulokset

| Testaus päivämäärä | Lujuus- ja rakenneluokka | Ikä [d] | Puristuslujuus [MPa] | Keskiarvo [MPa] | Keskihajonta [MPa] | Murtokuorma [kN] | Massa [g] |
|--------------------|--------------------------|---------|----------------------|-----------------|--------------------|------------------|-----------|
| 25.3.2013          | C40/50 (K50)             | 65      | 64,0                 | 62,0            | 1,9                | 1440             | 7831      |
|                    | C40/50 (K50)             | 65      | 60,2                 |                 |                    | 1354             | 7793      |
|                    | C40/50 (K50)             | 65      | 61,9                 |                 |                    | 1394             | 7816      |

Koepaaluille suoritettiin lyönti- ja taivutuskestävyyskokeet. Lyöntikoe suoritettiin standardin SFS-EN 12794 mukaisella lyöntikoemenettelyllä. Lyöntikokeessa paaluun kohdistetaan useita iskuja, jotka aiheuttavat paaluun ja kalliokärkeen huomattavia jännityksiä. Kalliokärki täyttää puristuskestävyysvaatimukset, jos se kestää lyöntikokeen ilman toimintaa haittaavia muodonmuutoksia. Lyöntikokeen jälkeen kalliokärjen on täytettävä Paalutusohje PO-2011:n mukaiset momentti-, leikkausvoima ja vetovoimavaatimukset. [1 s. 164]



**Kuva 3.1** Kalliokärjellä varustetun teräsbetonipaalun taivutuskoejärjestelyt [1 s.164]

Vetokestävyysvaatimus täyttyy, jos kalliokärki lyönnin aikana pysyy kaikissa olosuhteissa paalun kalliokärjessä siten, että se kykenee asennuksen jälkeen välittämään momentin ja leikkausvoiman osalta asetetut vaatimukset. [1 s.165]

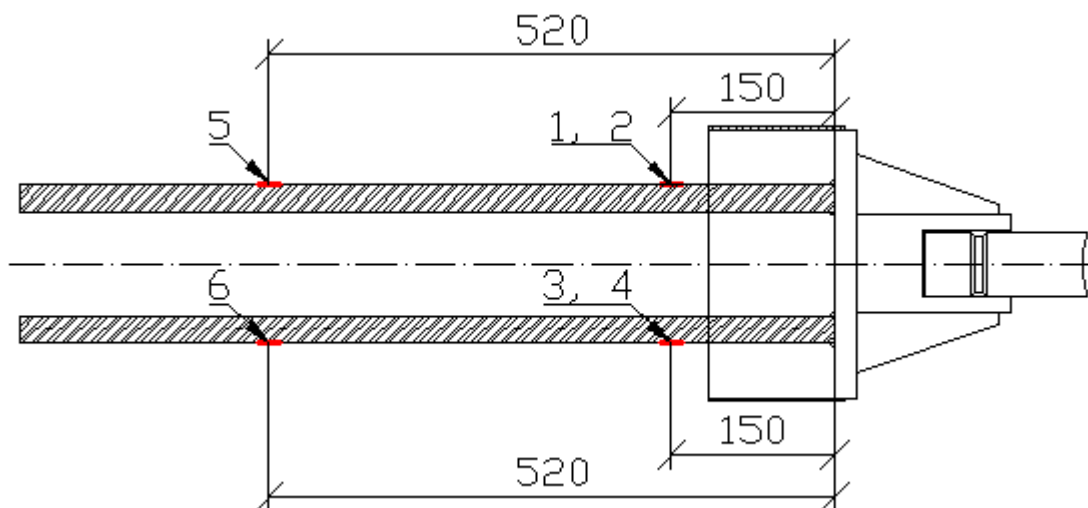
Kuvan 3.1 koejärjestelyssä kuorman sijainti kalliokärjen puoleisesta tuesta voidaan tarvittaessa määrittää siten, että momentti ja leikkausvoima voidaan määrittää kalliokärjen ja paaluvarren liitoskohdassa yksiselitteisesti. [1 s.165]

Kuvan 3.1 koemenettelyä voidaan käyttää vain sellaisille paaluille, joiden varren momentinkestävyys on oltava suurempi kuin paalun ja kalliokärjen välisen liitoksen momentinkestävyys. Pelkästään kalliokärjen kelpoisuutta tutkittaessa voidaan teräsbetonipaaluilla kasvattaa paalun varren lujuutta lisäämällä paaluun leikkaus- ja pääteräksiä. [1 s.165]

### 3.2 Lyöntikoe

Lyöntikoe suoritettiin standardin SFS-EN 12794 [14] mukaisesti. Lyöntikoea varten koestettavien kalliokärkien tartuntateräksiin liimattiin 6 venymäliuskaa, joilla mitattiin lyönnin aikaisia venymiä ja jännityksiä. Venymäliuskat liimattiin kuvan 3.2 mukaisesti.





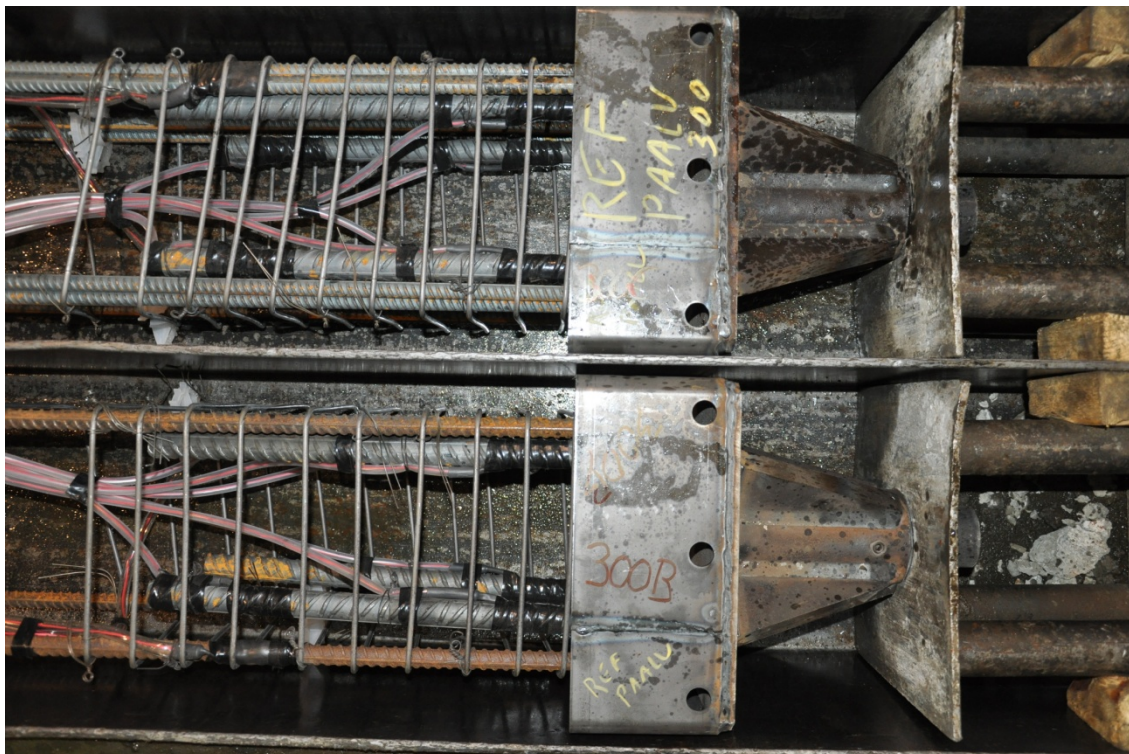
**Kuva 3.2** Paalun 250a kalliokärjen tartuntateräksiin liimattujen venymäliuskojen paikat.

Paalun pääteräksiin liimattiin kaksi venymäliuskaa (7, 8), suunnilleen samoille kohdille kuin kalliokärjen tartuntateräksiin ristikkäin liimatut venymäliuskat (5, 6). Liimaamisen jälkeen venymäliuskat suojattiin kuvan 3.3 mukaisesti sikaflexilla sekä teipillä tai kutistesukalla.



**Kuva 3.3** Venymäliuskan liimausta paalun pääteräksiin ja valmis kutistesukalla suojattu venymäliuska.

Venymäliuskojen liimaamisen jälkeen kalliokärjet asennettiin paikoilleen ennen valua. Tämän jälkeen paalut olivat valmiita valua varten.



*Kuva 3.4 Paalujen 300b ja 300c kalliokärkien venymäliuskat ennen valua.*

Lyöntikokeet suoritettiin Ryttylässä 18.2.2013 ja 20.2.2013. Ensimmäisenä lyöntikoepäivänä lyötiin paalut 300c, 300b, 250b ja 250a. Jälkimmäisenä päivänä lyötiin paalu 350a. Kaikki lyöntikoetta varten liimatut venymäliuskat toimivat kuormituspäivänä. Paalut lyötiin betonilaatan päälle perustetun teräslaatikon sisään. Teräslaatikko oli täytetty noin kahden metrin paksuisella sorakerroksella. Paalut lyötiin laatikon pohjassa ollutta teräslevyä vasten. Lyöntikokeessa paaluun lyötiin vähintään 1000 lyöntiä 28 MPa jännitystasolla. Lyöntikokeen aikaiset jännitykset ja laskettu lyöntienergia on esitetty kohdassa 4.



*Kuva 3.5 Paalut lyötiin soralla täytetyn teräslaatikon sisään.*

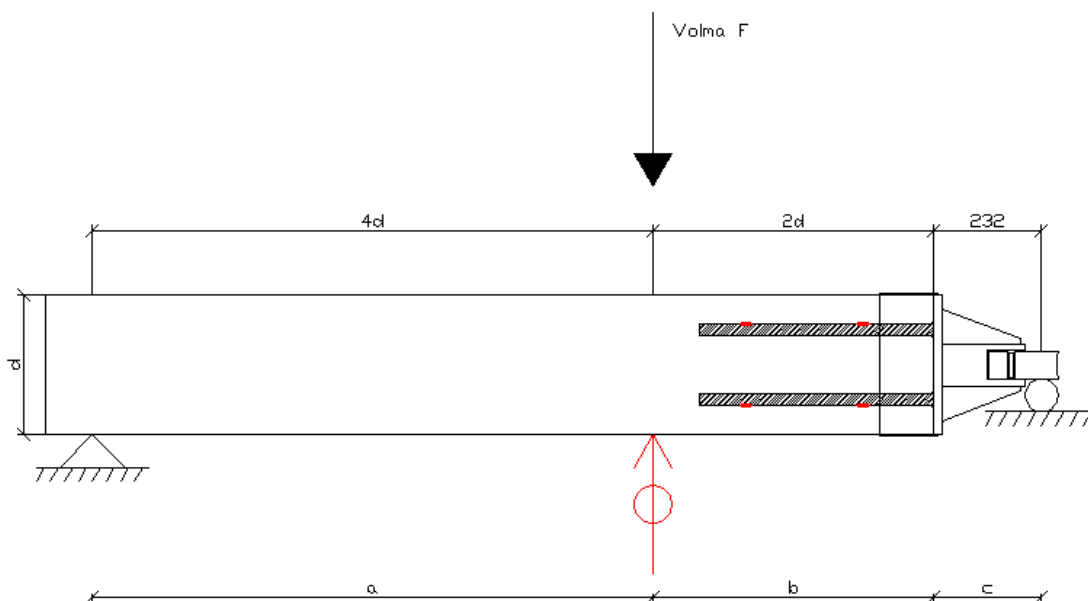
Jännitystasoa tarkkailtiin PDA-mittauslaitteella koko kokeen ajan. Mittauksissa käytettiin neljää venymäanturia ja kahta kiihtyvyyssanturia. Mittauksissa käytetyn laitteiston kaupan nimi oli Pile Driving Analyzer® -Model PAK (sarjanumero 1630).

Lyöntikokeiden valvojina toimivat Teemu Riihimäki ja Teemu Repo Tampereen teknillisestä yliopistosta. Lyöntikokeessa käytettiin Pirkan Rakentajapalvelu Oy:n Junttan PM 20L paalutuskonetta varustettuna Junttan SHK 5 hydraulijärkälällä. Järkäleen liikkuvan osan massa oli 5 tonnia ja lyöntikorkeutena käytettiin 0,1-0,5 m iskusuojan kulumisen mukaisesti. Paalujen 250a, 250b, 300b ja 300c iskusuojana käytettiin 100-150 mm paksua pyökkiä. Uusi iskusuoja vaihdettiin tarpeen mukaan, yleensä 2-3 lyöntikokeen jälkeen. Paalun 350a iskusuojana käytettiin 50-60 mm paksua vanerilevyistä koottua iskusuojaa. PDA-mittauslaite ei kyennyt mittaamaan kaikkia iskuja, joten iskujen kokonaismäärää seurattiin paalutuskoneen lyöntilaskurilla.

PDA-mittausten lisäksi lyöntikokeissa mitattiin terästen puristumista ja venymistä venymäliuskojen avulla. Venymäliuskamittausten mittaustiheys oli 10 kHz ja mittaukset suoritettiin LabVIEW Signal Express -ohjelmistoa käyttäen.

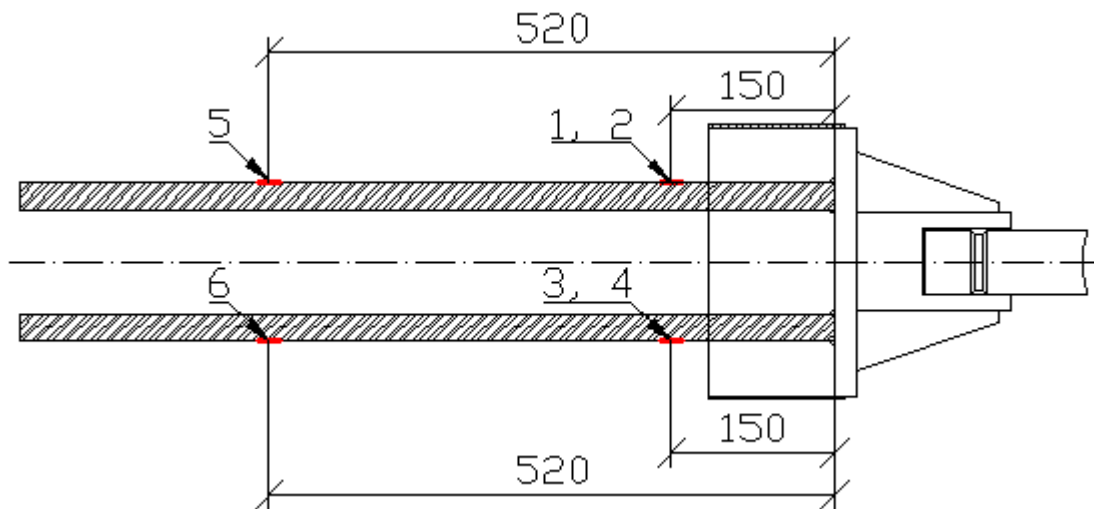
### 3.3 Taivutuskoe

Kalliokärjellä varustettujen paalujen taivutuskokeet suoritettiin Paalutusohjeen PO-2011 mukaisesti TTY:n rakennuslaboratoriossa 25.3.2013 ja 26.3.2013. Taivutuskokeen valvojana toimi Jukka Haavisto TTY:n Rakennetekniikan yksiköstä. Kuormitus toteutettiin 270 kN:n hydraulisella työsylinterillä. Työsylinteriltä tuleva kuorma siirrettiin kalliokärjelliselle paalulle pistekuormana. Taivutuskokeet suoritettiin kuvan 3.6 mukaisella koejärjestelyllä.



**Kuva 3.6** Kalliokärjellä varustetun teräsbetonipaalun taivutuskoejärjestely. Kalliokärjen tartuntateräksiin on merkitty punaisella venymäliuskojen paikat.

Kokeen aikana mitattiin koekappaleen taipumaa pystysuuntaisella mittakellolla, joka sijaitsi koekappaleen alapuolella, kuormituspisteen kohdalla. Koekappaleeseen oli liimattu venymäliuskoja taivutuskoeita varten, joiden tarkoituksena oli mitata jännityksiä kalliokärjen ankkurointiteräksissä ja paalun pääteräksissä. Venymäliuskat liimattiin kuvan 3.7 mukaisesti. Lisäksi mitattiin hydraulisen työsylinterin voimaa sekä siirtymää. Tietokone kirjasi mittausarvot kokeen aikana sekunnin välein.



**Kuva 3.7** Paalun 250a kalliokärjen tartuntateräksiin liimattujen venymäliuskojen paikat.

Valupinta toimi kuormituspintana kaikissa taivutuskokeissa. Taivutuskokeet toteutettiin voimaohjattuna kuormitusportaita käyttäen. Taivutuskokeen kuormitusnopeus vaihteli paalutyypin mukaan välillä 4 - 16 kN/min. Kuormitusportaan suuruutena käytettiin 8-32 kN riippuen paalutyypistä. Kuormitus pidettiin vakiona jokaisessa kuormitusportaassa 3-5 minuuttia. Toisen portaan jälkeen kuorma poistettiin ja kuormitus aloitettiin alusta. Liitteessä II on esitetty kuvia koejärjestelyistä ja kokeessa käytetystä mittakellosta.

Ulkoisen kuorman kuormapisteen kohdalle aiheuttama taivutusmomentti laskettiin kaavalla:

$$M = F \cdot \frac{a}{L} \cdot (b + c)$$

, missä F on työsylinterin voima;

L on koekappaleen jänneväli;

a, b ja c ovat kuvan 3.6 mukaisia mittoja.

## 4 KOESARJAN TULOKSET

### 4.1 Lyöntikokeet

#### 4.1.1 Kimmomoduuli

Kimmomoduuli määritetään betonin puristuslujuuden avulla. Koekuutiot puristettiin lyöntikokeiden välisenä päivänä 20.2.2013, jolloin betonin puristuslujuus oli hieman suurempi kuin ensimmäisenä lyöntikoepäivänä (19.2.2013), mutta hieman pienempi kuin toisena lyöntikoepäivänä (21.2.2013). Kimmomoduuli paalun poikkileikkaukselle mittausantureiden kohdalla saadaan kaavasta:

$$E_i = k_s \cdot 22 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$$

,missä  $E_i$  on koko poikkileikkauksen kimmomoduuli;

$k_s$  on mittaustason poikkileikkauksen rauditusmäärän huomioiva kerroin;

$f_{cm}$  on lyöntikoepäivänä olosuhdekappaleista määritettyjen puristuslujuuksien keskiarvo EN 1992-1-1 mukaisesti.

Mittaustason poikkileikkauksen rauditusmäärän vaikutus otetaan huomioon seuraavasti:

$$k_s = \frac{A_s \cdot \left( \frac{\rho_s}{\rho_c} - 1 \right) + A_c}{A_c}$$

,missä  $A_s$  on terästen poikkileikkauspinta-ala muodonmuutoksen mittauksen kohdalla;

$\rho_s$  on teräksen tiheys (7850 kg/m<sup>3</sup>);

$A_c$  on paalun poikkileikkauksala muodonmuutoksen mittauksen kohdalla;

$\rho_c$  on betonin tiheys (2500 kg/m<sup>3</sup>).

Kimmomoduulin määrittämiseen käytetty betonin keskimääräinen puristuslujuus oli lyöntikokeiden välisenä päivänä  $F_{cm} = 56 \text{ MPa}$ .

Jännitys lasketaan mitatun venymän ja materiaalin kimmomoduulin perusteella:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E_i \tag{4.3}$$



#### 4.1.2 Venymä ja jännitys

Lyöntikokeen lyöntien lukumäärä sekä lasketut paalun keskimääräiset jännitystasot koko poikkileikkauksessa (CSX) ja yksittäisen anturin kohdalla (CSI) on esitetty taulukossa 4.1.

**Taulukko 4.1** Mitatut jännitystasot lyöntikokeen aikana

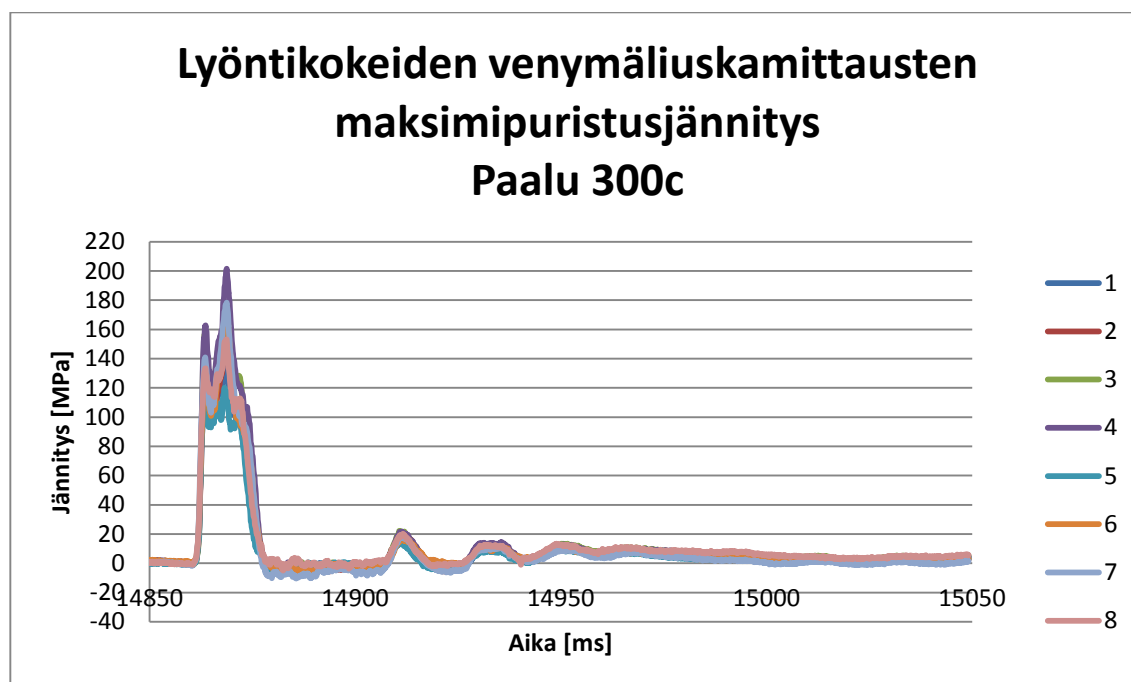
| Koekappale | Paalutyyppe | Kimmoduuli [MPa] | CSX keskiarvo [MPa] | CSI keskiarvo [MPa] | Lyöntien lukumäärä |
|------------|-------------|------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| P4         | 300 c       | 38410            | 28,3                | 30,3                | 1000               |
| P5         | 300 b       | 38030            | 28,5                | 35,4                | 1000               |
| P6         | 250 b       | 38100            | 28,4                | 32,4                | 1000               |
| P7         | 250 a       | 37890            | 28,5                | 40,4                | 1000               |
| P24        | 350 a       | 38360            | 29,2                | 32,6                | 1000               |

PDA-mittausten lisäksi lyöntikokeissa mitattiin terästen puristumista ja venymistä venymäliuskojen avulla. Venymäliuskamittausten mittaustiheys oli 10 kHz ja mittaukset suoritettiin LabVIEW Signal Express -ohjelmistoa käyttäen. Ensimmäisenä lyötiin paalu 300c, josta mitattiin venymäliuskoilla ensimmäiset 100 lyöntiä, väliltä kahdesta kohtaa noin 100 lyöntiä ja viimeiset 100 lyöntiä. Ensimmäisen paalun teräksien maksimi puristusjännitys oli 201,5 MPa ja suurin vetojännitys oli 17,9 MPa. Venymäliuskojen mittapistekohtaiset maksimijännitykset on esitetty taulukossa 4.2. Mittauksia ei suoritettu koko lyöntien ajalta, koska mittaustaajuuden ollessa 10 kHz käsiteltävän datan määrä olisi kasvanut liian suureksi.

**Taulukko 4.2** Paalulle 300c suoritettujen lyöntikokeiden maksimipuristus- ja vetojännitykset eri mittauspisteissä.

| Venymäliuska | Puristusjännityksen maksimi [MPa] | Vetojännityksen maksimi [MPa] |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1            | 141,9                             | 8,5                           |
| 2            | 162,4                             | 17,9                          |
| 3            | 177,0                             | 11,6                          |
| 4            | 201,5                             | 13,3                          |
| 5            | 136,5                             | 10,4                          |
| 6            | 174,5                             | 13,2                          |
| 7            | 181,4                             | 16,0                          |
| 8            | 162,8                             | 12,3                          |

Kuvassa 4.1 on esitetty lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys. Kuvasta havaitaan myös iskun jälkiaalto, joka aiheuttaa teräsiin vetojännityksiä. Paalun 300c maksimipuristusjännitys 201,5 MPa mitattiin kalliokärjen ankkurointiterästen juureen liimatusta venymäliuskastasta 4.



**Kuva 4.1** Paalun 300c lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys

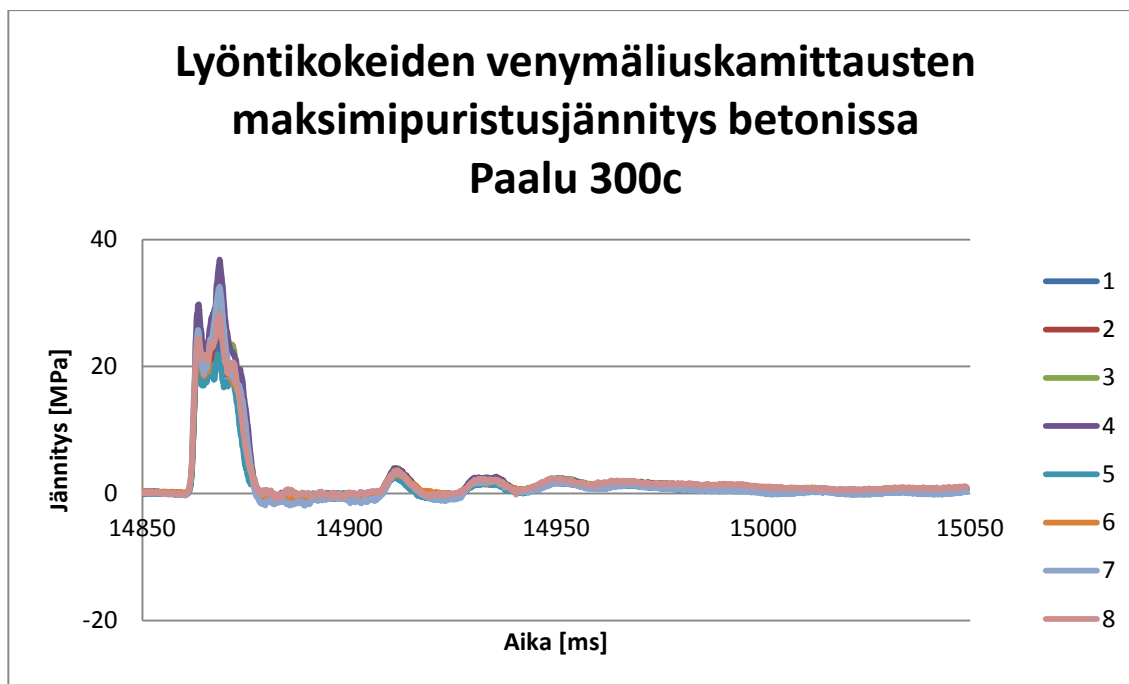
Venymäliuskamittauksista saatujen muodonmuutosten avulla on laskettu millainen puristus- ja vetojännitys aiheutuu paalun varren betoniin. Betonin jännitys tulisi olla lyöntijännityksen suuruinen eli 28 MPa. Puristus- ja vetojännityksen maksimiarvot on esitetty taulukossa 4.3.

**Taulukko 4.3** Paalulle 300c suoritetun lyöntikokeen maksimipuristus- ja vetojännitykset betonissa.

| Venymäliuska | Puristusjännityksen maksimi [MPa] | Vetojännityksen maksimi [MPa] |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1            | 26,0                              | 1,6                           |
| 2            | 29,7                              | 3,3                           |
| 3            | 32,4                              | 2,1                           |
| 4            | 36,9                              | 2,4                           |
| 5            | 25,0                              | 1,9                           |
| 6            | 31,9                              | 2,4                           |
| 7            | 33,2                              | 2,9                           |
| 8            | 29,8                              | 2,3                           |

Kuvassa 4.2 on esitetty lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys betonissa. Kuvasta havaitaan myös iskun jälkiaalto, joka aiheuttaa betoniin vetojännityksiä. Paalun 300c betonin maksimipuristusjännitys 36,9 MPa mitattiin kalliokärjen ankkurointiterästen juureen liimatusta venymäliuskasta 4.





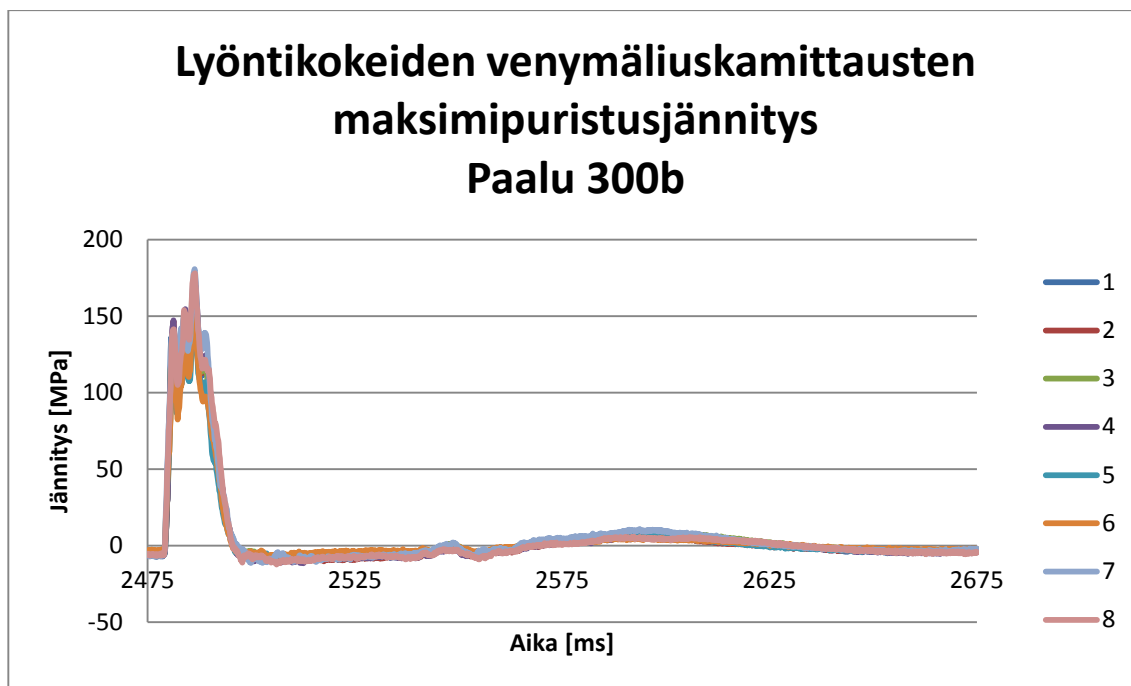
**Kuva 4.2** Paalun 300c lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys betonissa

Toisena lyötiin paalu 300b, josta mitattiin venymäliuskoilla ensimmäiset 100 lyöntiä, väliltä lyönnit 300-400 sekä lyönnit 600-700 ja viimeiset 100 lyöntiä. Toisen paalun teräksien maksimipuristusjännitys oli 180,7 MPa ja suurin vetojännitys oli 28,7 MPa. Venymäliuskojen mittapistekohtaiset maksimijännitykset on esitetty taulukossa 4.4.

**Taulukko 4.4** Paalulle 300b suoritetun lyöntikokeen maksimipuristus- ja vetojännitykset eri mittauspisteissä.

| Venymäliuska | Puristusjännityksen maksimi [MPa] | Vetojännityksen maksimi [MPa] |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1            | 165,0                             | 21,3                          |
| 2            | 164,9                             | 17,4                          |
| 3            | 166,9                             | 20,2                          |
| 4            | 178,5                             | 17,3                          |
| 5            | 141,6                             | 15,3                          |
| 6            | 148,9                             | 11,8                          |
| 7            | 180,7                             | 28,7                          |
| 8            | 179,3                             | 23,3                          |

Kuvassa 4.3 on esitetty lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys. Paalun 300b maksimipuristusjännitys 180,7 MPa mitattiin paalun pääteräkseen liimatusta venymäliuskasta 7.



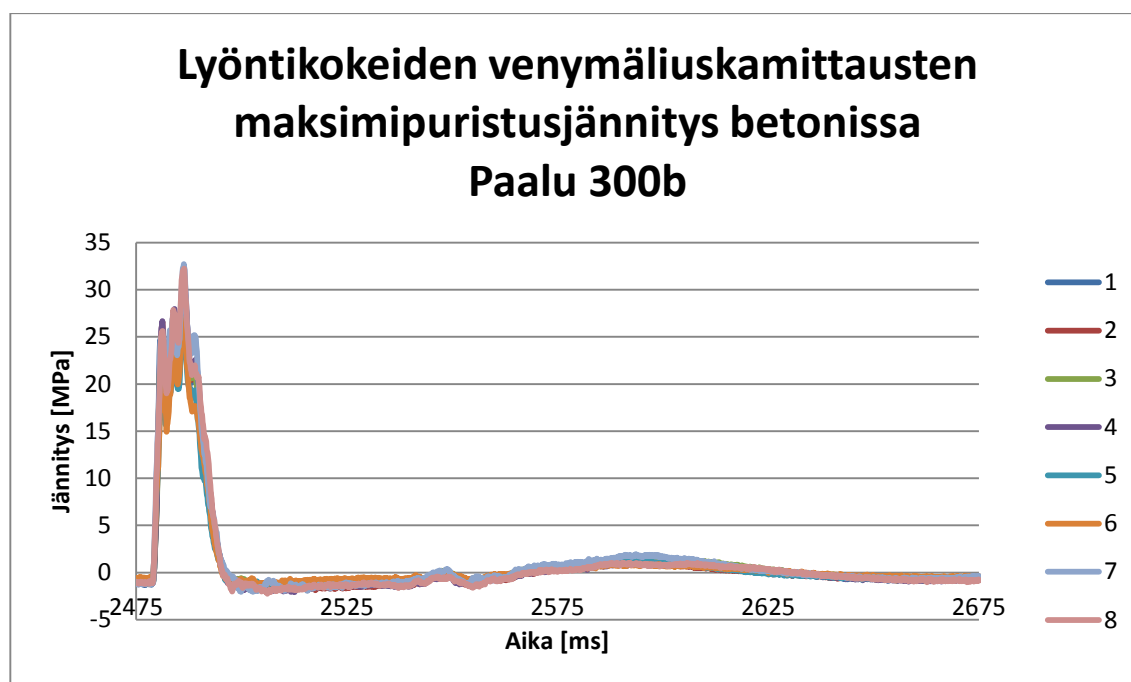
*Kuva 4.3 Paalun 300b lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys*

Venymäliuskamittauksista saatujen muodonmuutosten avulla on laskettu millainen puristus- ja vetojännitys aiheutuu paalun varren betoniin. Betonin jännitys tulisi olla lyöntijännityksen suuruinen eli 28 MPa. Puristus- ja vetojännityksen maksimiarvot on esitetty taulukossa 4.5.

**Taulukko 4.5** Paalulle 300b suoritettujen lyöntikokeiden maksimipuristus- ja vetojännitykset betonissa.

| Venymäliuska | Puristusjännityksen maksimi [MPa] | Vetojännityksen maksimi [MPa] |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1            | 29,9                              | 3,9                           |
| 2            | 29,9                              | 3,2                           |
| 3            | 30,2                              | 3,7                           |
| 4            | 32,3                              | 3,1                           |
| 5            | 25,7                              | 2,8                           |
| 6            | 27,0                              | 2,1                           |
| 7            | 32,7                              | 5,2                           |
| 8            | 32,5                              | 4,2                           |

Kuvassa 4.4 on esitetty lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys betonissa. Kuvasta havaitaan myös iskun jälkiaalto, joka aiheuttaa betoniin vetojännityksiä. Paalun 300b betonin maksimipuristusjännitys 32,7 MPa mitattiin kalliokärjen ankkurointiterästen juureen liimatusta venymäliuskasta 7.



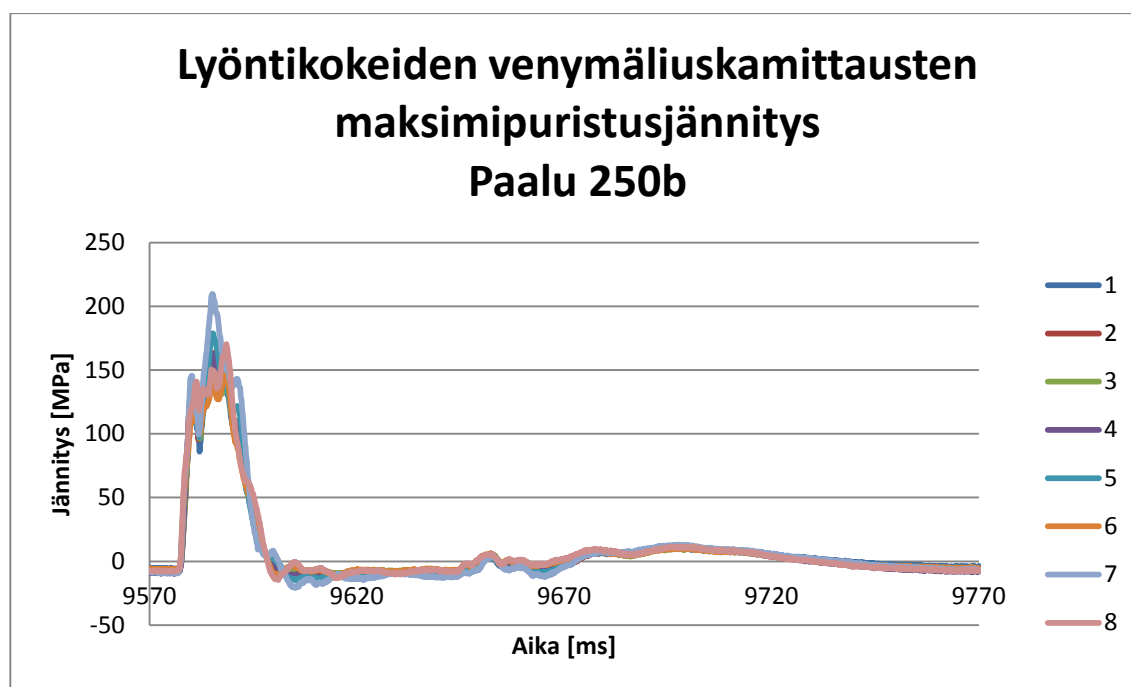
**Kuva 4.4** Paalun 300b lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys betonissa

Kolmantena lyötiin paalu 250b, josta mitattiin venymäliuskoilla ensimmäiset 100 lyöntiä, väliltä kahdesti noin 100 lyöntiä, 100 viimeistä lyöntiä ei mitattu venymäliuskoilla, koska PDA-mittauslaite ei kyennyt mittaamaan kaikkia paaluun kohdistuneita iskuja. Kolmannen paalun teräksien maksimipuristusjännitys oli 209,7 MPa ja suurin vetojännitys oli 29,0 MPa. Venymäliuskojen mittapistekohtaiset maksimijännitykset on esitetty taulukossa 4.6.

**Taulukko 4.6** Paalulle 250b suoritettujen lyöntikokeiden maksimipuristus- ja vetojännitykset eri mittauspisteissä.

| Venymäliuska | Puristusjännityksen maksimi [MPa] | Vetojännityksen maksimi [MPa] |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1            | 152,2                             | 13,7                          |
| 2            | 163,6                             | 17,8                          |
| 3            | 157,6                             | 16,2                          |
| 4            | 172,1                             | 16,9                          |
| 5            | 178,9                             | 19,7                          |
| 6            | 147,1                             | 17,9                          |
| 7            | 209,7                             | 29,0                          |
| 8            | 170,4                             | 28,8                          |

Kuvassa 4.5 on esitetty lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys. Paalun 250b maksimipuristusjännitys 209,7 MPa mitattiin paalun pääteräksen liimatusta venymäliuskasta 7.



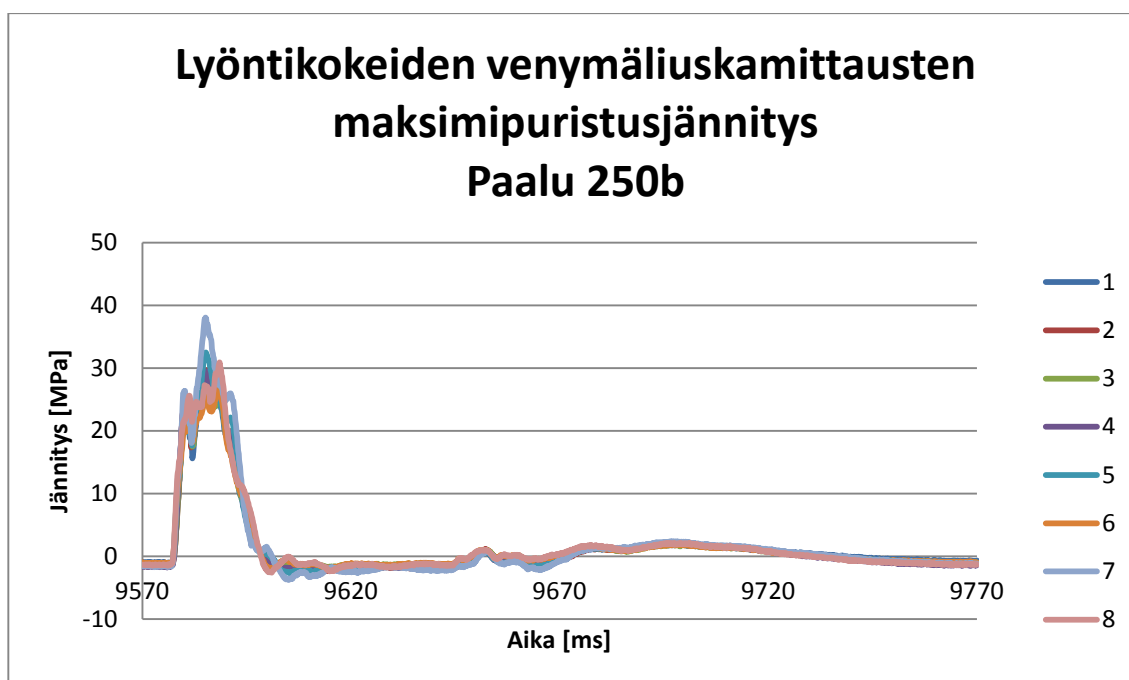
*Kuva 4.5 Paalun 250b lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys*

Venymäliuskamittauksista saatujen muodonmuutosten avulla on laskettu millainen puristus- ja vetojännitys aiheutuu paalun varren betoniin. Betonin jännitys tulisi olla lyöntijännityksen suuruinen eli 28 MPa. Puristus- ja vetojännityksen maksimiarvot on esitetty taulukossa 4.7.

**Taulukko 4.7** Paalulle 250b suoritettun lyöntikokeen maksimipuristus- ja vetojännitykset betonissa.

| Venymäliuska | Puristusjännityksen maksimi [MPa] | Vetojännityksen maksimi [MPa] |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1            | 27,6                              | 2,5                           |
| 2            | 29,7                              | 3,2                           |
| 3            | 28,6                              | 2,9                           |
| 4            | 31,2                              | 3,1                           |
| 5            | 32,5                              | 3,6                           |
| 6            | 26,7                              | 3,2                           |
| 7            | 38,0                              | 5,3                           |
| 8            | 30,9                              | 5,2                           |

Kuvassa 4.6 on esitetty lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys betonissa. Kuvasta havaitaan myös iskun jälkiaalto, joka aiheuttaa betoniin vetojännityksiä. Paalun 250b betonin maksimipuristusjännitys 38,0 MPa mitattiin paalun pääteräkseen liimatusta venymäliuskasta 7.



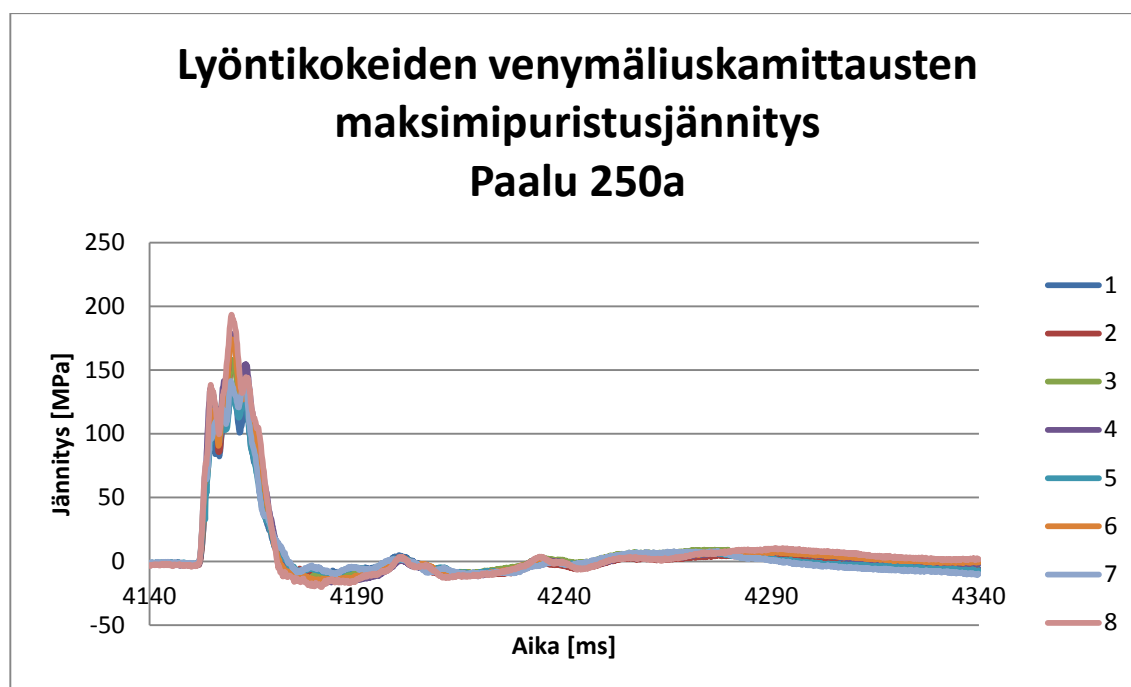
**Kuva 4.6** Paalun 250b lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys betonissa

Neljäntenä lyötiin paalu 250a, josta mitattiin venymäliuskoilla kaikki paaluun tulleet lyönnit. Neljännen paalun teräksien maksimi puristusjännitys oli 193,5 MPa ja suurin vetojännitys oli 28,1 MPa. Venymäliuskojen mittapistekohtaiset maksimijännitykset on esitetty taulukossa 4.8.

**Taulukko 4.8** Paalulle 250a suoritettujen lyöntikokeiden maksimipuristus- ja vetojännitykset eri mittauspisteissä.

| Venymäliuska | Puristusjännityksen maksimi [MPa] | Vetojännityksen maksimi [MPa] |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1            | 143,2                             | 12,2                          |
| 2            | 161,6                             | 15,5                          |
| 3            | 158,1                             | 17,3                          |
| 4            | 179,2                             | 18,5                          |
| 5            | 142,6                             | 14,0                          |
| 6            | 174,1                             | 18,9                          |
| 7            | 154,9                             | 14,9                          |
| 8            | 193,5                             | 28,1                          |

Kuvassa 4.7 on esitetty lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys. Paalun 250a maksimipuristusjännitys 193,5 MPa mitattiin paalun pääteräkseen liimatusta venymäliuskasta 8.



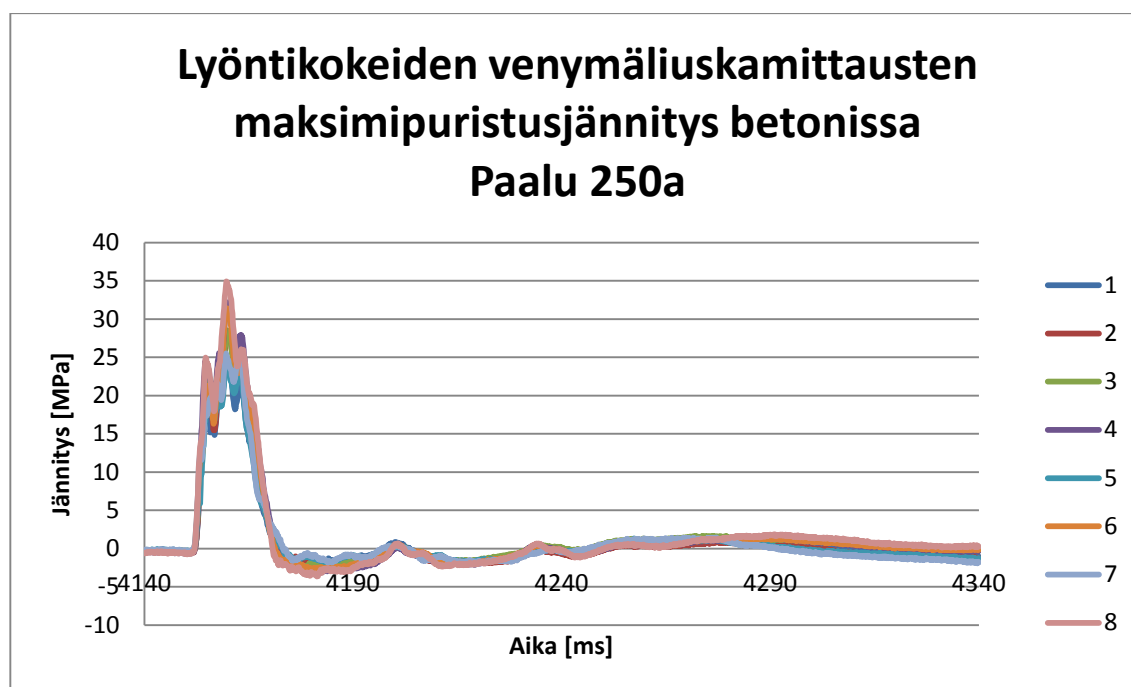
*Kuva 4.7 Paalun 250a lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys*

Venymäliuskamittauksista saatujen muodonmuutosten avulla on laskettu millainen puristus- ja vetojännitys aiheutuu paalun varren betoniin. Betonin jännitys tulisi olla lyöntijännityksen suuruinen eli 28 MPa. Puristus- ja vetojännityksen maksimiarvot on esitetty taulukossa 4.9.

**Taulukko 4.9** Paalulle 250a suoritettun lyöntikokeen maksimipuristus- ja vetojännitykset betonissa.

| Venymäliuska | Puristusjännityksen maksimi [MPa] | Vetojännityksen maksimi [MPa] |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1            | 25,8                              | 2,2                           |
| 2            | 29,2                              | 2,8                           |
| 3            | 28,5                              | 3,1                           |
| 4            | 32,3                              | 3,3                           |
| 5            | 25,7                              | 2,5                           |
| 6            | 31,4                              | 3,4                           |
| 7            | 27,9                              | 2,7                           |
| 8            | 34,9                              | 5,1                           |

Kuvassa 4.8 on esitetty lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys betonissa. Kuvasta havaitaan myös iskun jälkiaalto, joka aiheuttaa betoniin vetojännityksiä. Paalun 250a betonin maksimipuristusjännitys 34,9 MPa mitattiin paalun pääteräkseen liimatusta venymäliuskasta 8.



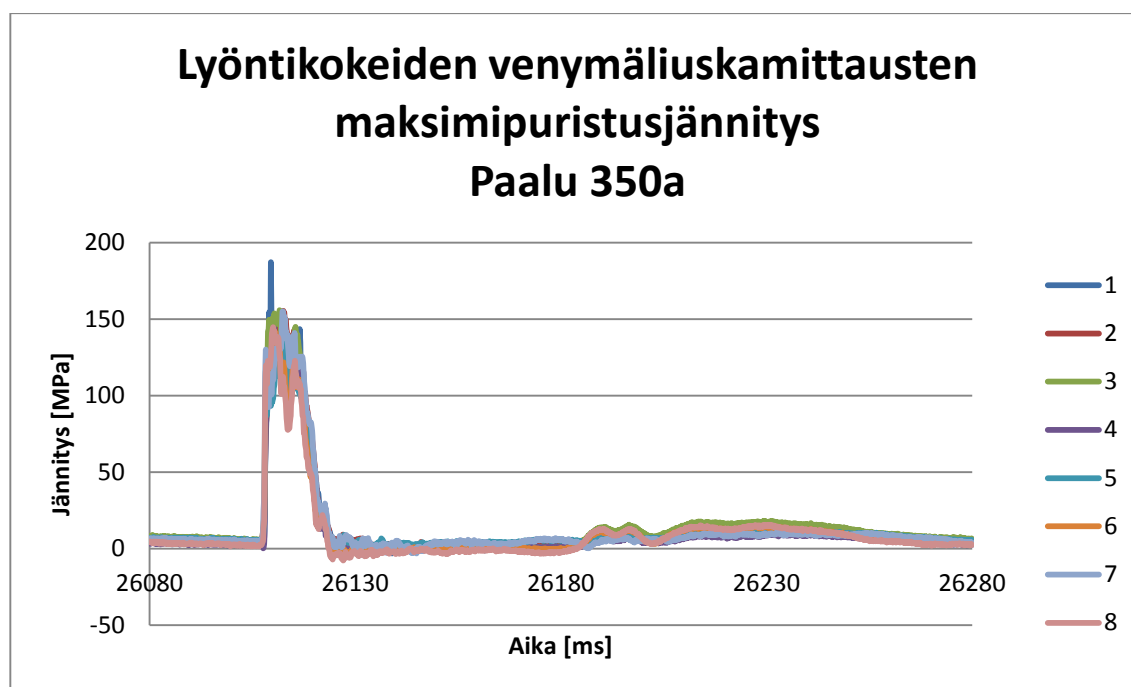
*Kuva 4.8 Paalun 250a lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys*

Viimeisenä lyötiin paalu 350a, josta mitattiin venymäliuskoilla ensimmäiset 100 lyöntiä, lyönnit 300-400, lyönnit 600-700 ja viimeiset 100 lyöntiä. Ensimmäisen paalun teräksien maksimipuristusjännitys oli 187,1 MPa ja suurin vetojännitys oli 29,4 MPa. Venymäliuskojen mittapistekohtaiset maksimijännitykset on esitetty taulukossa 4.10.

**Taulukko 4.10** Paalulle 350a suoritettun lyöntikokeen maksimipuristus- ja vetojännitykset eri mittauspisteissä.

| Venymäliuska | Puristusjännityksen maksimi [MPa] | Vetojännityksen maksimi [MPa] |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1            | 187,1                             | 13,6                          |
| 2            | 160,4                             | 12,6                          |
| 3            | 163,0                             | 10,0                          |
| 4            | 143,1                             | 11,3                          |
| 5            | 141,1                             | 14,6                          |
| 6            | 151,3                             | 12,3                          |
| 7            | 170,1                             | 29,4                          |
| 8            | 160,6                             | 17,7                          |

Kuvassa 4.9 on esitetty lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys. Paalun 350a maksimipuristusjännitys 187,1 MPa mitattiin kalliokärjen ankkurointiterästen juureen liimatusta venymäliuskasta 1.



Kuva 4.9 Paalun 350a lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys

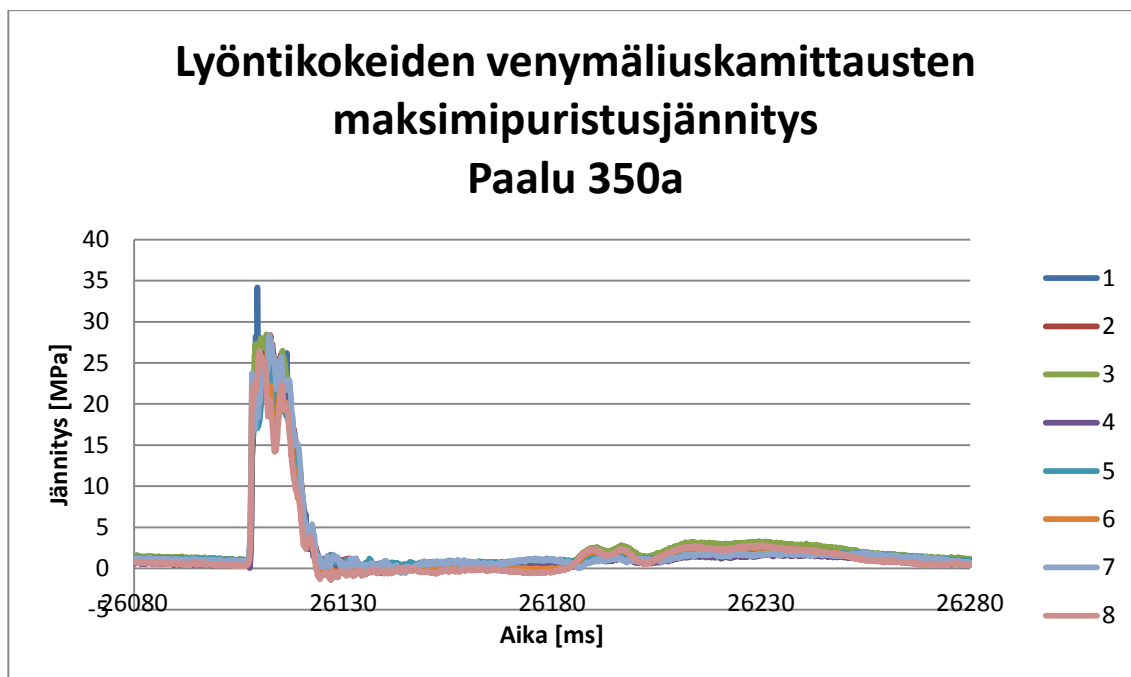
Venymäliuskamittauksista saatujen muodonmuutosten avulla on laskettu millainen puristus- ja vetojännitys aiheutuu paalun varren betoniin. Betonin jännitys tulisi olla lyöntijännityksen suuruinen eli 28 MPa. Puristus- ja vetojännityksen maksimiarvot on esitetty taulukossa 4.11.

Taulukko 4.11 Paalulle 350asuoritetun lyöntikokeen maksimipuristus- ja vetojännitykset betonissa.

| Venymäliuska | Puristusjännityksen maksimi [MPa] | Vetojännityksen maksimi [MPa] |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1            | 34,2                              | 2,5                           |
| 2            | 29,3                              | 2,3                           |
| 3            | 29,8                              | 1,8                           |
| 4            | 26,1                              | 2,1                           |
| 5            | 25,8                              | 2,7                           |
| 6            | 27,6                              | 2,3                           |
| 7            | 31,1                              | 5,4                           |
| 8            | 29,3                              | 3,2                           |

Kuvassa 4.10 on esitetty lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys betonissa. Kuvasta havaitaan myös iskun jälkiaalto, joka aiheuttaa betoniin vetojännityksiä. Paalun 350a betonin maksimipuristusjännitys 34,2 MPa mitattiin kalliokärjen ankkurointiterästen juureen venymäliuskasta 1.





*Kuva 4.10 Paalun 350a lyöntikokeiden yhteydessä suoritettujen venymäliuskamittausten maksimipuristusjännitys*

Missään paalutyypissä ei kalliokärjen tartuntateräksiin tai paalun pääteräksiin muodostunut teräksen myötörajan ylittävää puristus- tai vetojännitystä. Yhdenkään paalutyypin betonin puristuskestävyys ei ylittänyt lyöntikokeissa. Betonin vetokestävyys on tavallisesti 6-10 prosenttia betonin puristuslujuudesta. Betonin puristuslujuus oli lyöntikoepäivänä 58,2 MPa, joten vetolujuus oli 3,5 MPa. Betonin vetojännitys ylittyi lyöntikokeissa, joten paaluihin muodostui lyöntikokeissa halkeamia. Kaikki testatut paalut täyttivät niille asetetut vaatimukset.

#### 4.1.3 Kokeen aikaiset havainnot

Lyötyjen paalujen kalliokärkien kärkitapeissa ei havaittu kokeen jälkeen merkittäviä muodonmuutoksia, joten kalliokärjet kestivät lyönnit hyvin. Kalliokärjen ja paalun liitoskohdassa ei myöskään havaittu lyöntikokeiden aikana merkittäviä halkeamia. Kuvissa 4.11, 4.12 ja 4.13 on esitetty kalliokärjet lyöntikokeiden jälkeen.



*Kuva 4.11 Kalliokärjissä 300c ja 300b ei lyöntikokeen jälkeen ollut havaittavissa merkittäviä vaurioita.*

Ensimmäisenä lyötyjen paalujen 300c ja 300b kalliokärjet eivät vaurioituneet lyöntikokeessa. Paalujen 250b ja 250a kalliokärjissä ei ollut havaittavissa merkittäviä vaurioita.



*Kuva 4.12 Kalliokärjissä 250b ja 250a ei lyöntikokeiden jälkeen ollut havaittavissa merkittäviä vaurioita.*

Viimeisenä lyödyn paalun 350a kalliokärjessä ei ole havaittavissa merkittäviä vaurioita. Kaikki paalut ja kalliokärjet täyttivät lyöntikokeen vaatimukset.



*Kuva 4.13 Kalliokärki 350a ei vaurioitunut lyöntikokeessa.*

## 4.2 Taivutuskokeet

### 4.2.1 Paalujen poikkileikkausarvot

Paaluista ennen taivutuskokeita mitatut poikkileikkausarvot on esitetty taulukossa 4.12. Poikkileikkausarvot ovat useamman mittaustuloksen keskiarvoja. Mittaukset suoritettiin kuormituskohdan läheisyydestä.

**Taulukko 4.12 Testattujen paalujen poikkileikkausmitat**

| Koekappale | Paalutyyppi | Poikkileikkausmitat |           |
|------------|-------------|---------------------|-----------|
|            |             | b<br>[mm]           | H<br>[mm] |
| P4         | 300 c       | 314                 | 298       |
| P5         | 300 b       | 300                 | 299       |
| P6         | 250 b       | 257                 | 252       |
| P7         | 250 a       | 251                 | 252       |
| P24        | 350 a       | 354                 | 354       |

Taivutuskokeiden aikainen betonin puristuslujuus testattiin paalujen valun yhteydessä valetuista koekappaleista kuormituspäivänä 25.3.2013. Taivutuskokeen aikainen betonin puristuslujuus on esitetty taulukossa 4.13.

**Taulukko 4.13** Taivutuskokeiden aikaisenbetonin puristuslujuus.

| Testaus päivämäärä | Lujuus- ja rakenneluokka | Ikä [d] | Puristuslujuus [MPa] | Keskiarvo [MPa] | Keskihajonta [MPa] | Murtokuorma [kN] | Massa [g] |
|--------------------|--------------------------|---------|----------------------|-----------------|--------------------|------------------|-----------|
| 25.3.2013          | C40/50 (K45)             | 65      | 64                   | 62,0            | 1,90               | 1440             | 7831      |
|                    | C40/50 (K45)             | 65      | 60,2                 |                 |                    | 1354             | 7793      |
|                    | C40/50 (K45)             | 65      | 61,9                 |                 |                    | 1394             | 7816      |

Kalliokärjen kestävyysvaatimukset laskettiin Paalutusohje PO-2011 mukaan. Geoteknisen kestävyuden arvona käytettiin  $R_{k;geo}$  -arvoa, joka laskettiin Rakennusteollisuuden julkaiseman tuotelehden PO-2011 mukaiseen paalutustyöhön taulukossa 3 esitettyjen  $R_{d;max}$  -arvojen avulla.

$$R_{k;geo} = R_{d;max} \cdot \gamma_t \cdot \xi \quad (4.4)$$

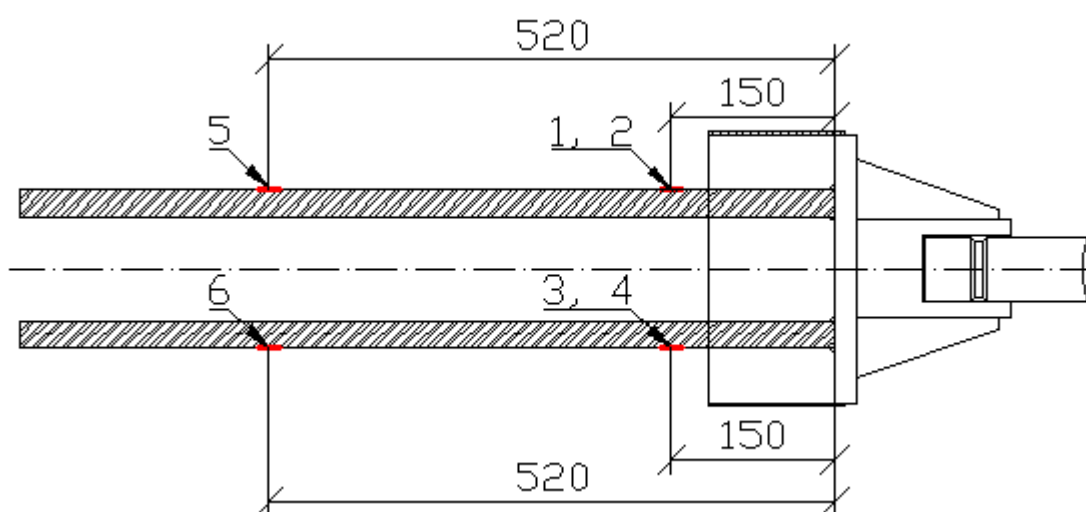
, missä  $R_{d;max}$  on paalun suurin lyömällä osoitettavissa oleva murtorajatilan puristuskestävyys eri paalutustyöluokissa;

$\gamma_t$  on teräsbetonipaalun varmuuskerroin;

$\xi$  on korrelaatiokerroin ( $\xi = 1,47$ ).

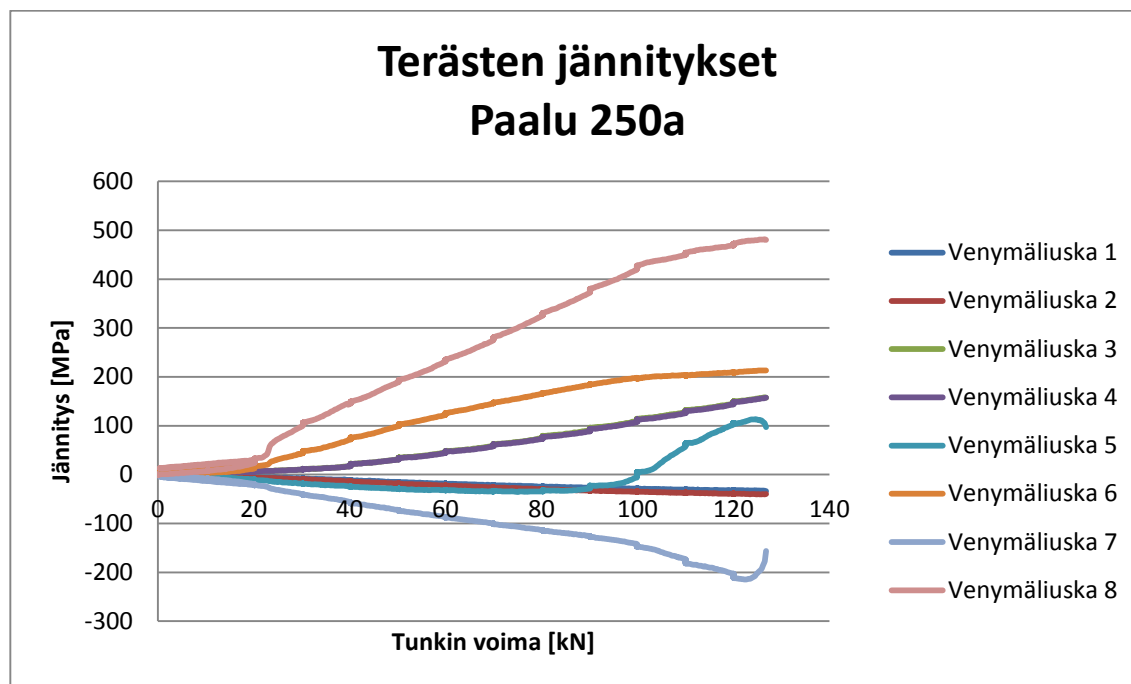
#### 4.2.2 Tulokset

Paaluun 250a liimattujen venymäliuskojen sijainnit on esitetty kuvassa 4.14. Lisäksi paalun pääteräsiin liimattiin kaksi venymäliuskaa (venymäliuskat 7 ja 8) suunnilleen samoihin kohtiin kuin kalliokärkeen liimatut venymäliuskat 5 ja 6. Venymäliuska 7 sijaitsi puristuspuolen teräksessä ja venymäliuska 8 liimattiin vetopuolen teräkseen.



**Kuva 4.14** Paalun 250a kalliokärjen tartuntateräsiin liimattujen venymäliuskojen paikat.

Taivutuskokeen aikaiset jännitykset teräksissä on esitetty kuvassa 4.15 ja niistä voidaan havaita, että jännitykset jakautuu teräsiin niin kuin niiden oletetaan. Paalun pääteräksille tulee kaikista suurimmat jännitykset veto- ja puristuspuolella. Jännityskuvista nähdään myös, että yläpuolen teräkset toimivat aluksi puristusteräksinä, mutta betonin halkeilun kasvaessa ja puristuspuolelta pienentyessä alkavat yläpuolenkin teräkset toimimaan vetoteräksinä. Tämä voidaan havaita etenkin kalliokärjen ankkurointiteräkseen kauemmaksi liimatusta venymäliuskasta ja paalun yläpuolen pääteräkseen liimatusta liuskasta.

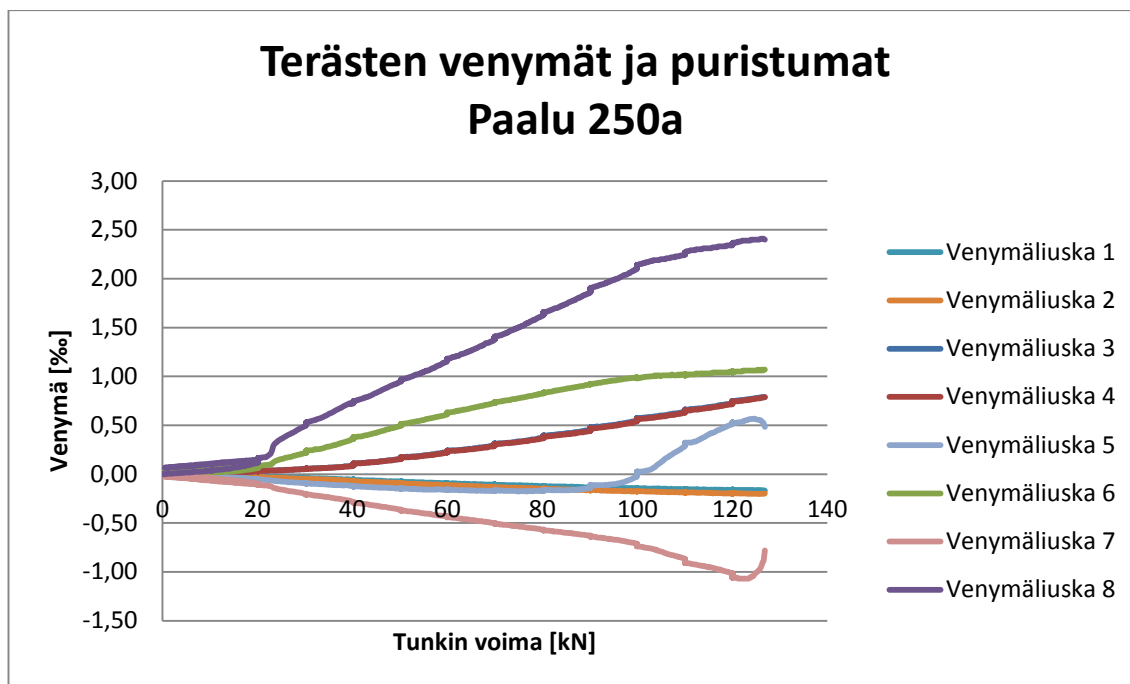


Kuva 4.15 Terästen jännitykset taivutuskokeessa.

Kalliokärjen tartuntateräsiin muodostuvat jännitykset ovat selvästi pienemmät kuin paalun pääterästen jännitykset. Paalun pääteräkset ottavat suurimman osan paaluun kohdistuvasta taivutusrasituksesta, joten niillä on suurempi vaikutus paalun taivutuskestävyyteen kuin kalliokärjen tartuntateräksillä.

Taivutuskokeen aikaiset venymät paalun pääteräksissä ja kalliokärjen tartuntateräksissä on esitetty kuvassa 4.16. Myös terästen venymät käyttäytyivät, kuten niiden oletettiin käyttäytyvän. Suurimmat venymät ja puristumat mitattiin paalun pääteräsiin liimatuista venymäliuskoista.





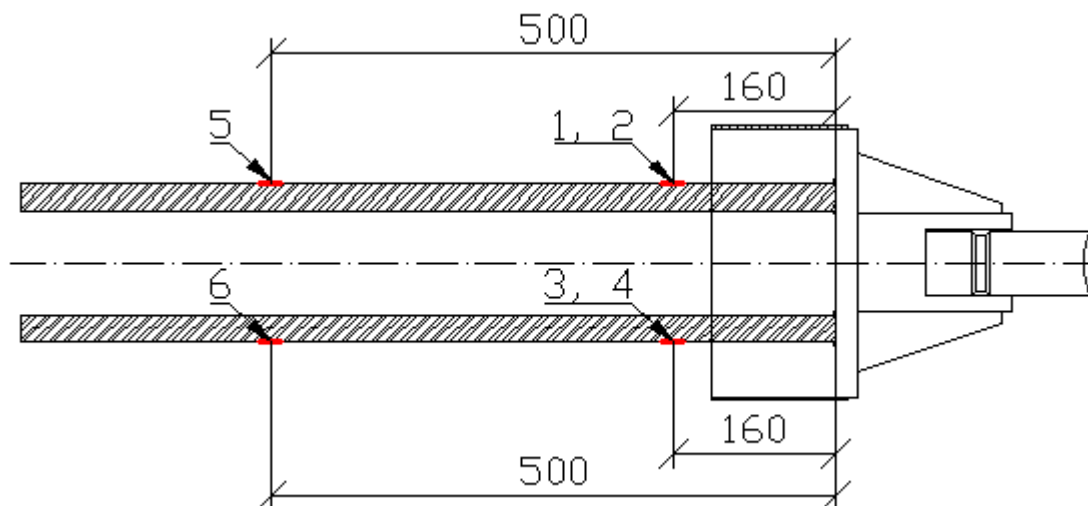
*Kuva 4.16 Terästen venymät ja puristumat taivutuskokeessa.*

Paalun 250a murtumistapa on esitetty kuvassa 4.17. Paalun murtumistapana oli paalun varren taivutusmurto. Taivutusmurto tapahtui kalliokärjen ankkurointiterästen loppumiskohdassa. Paalun pääteräkset menivät poikki murrossa. Poikkimenneet teräkset on esitetty liitteessä II.



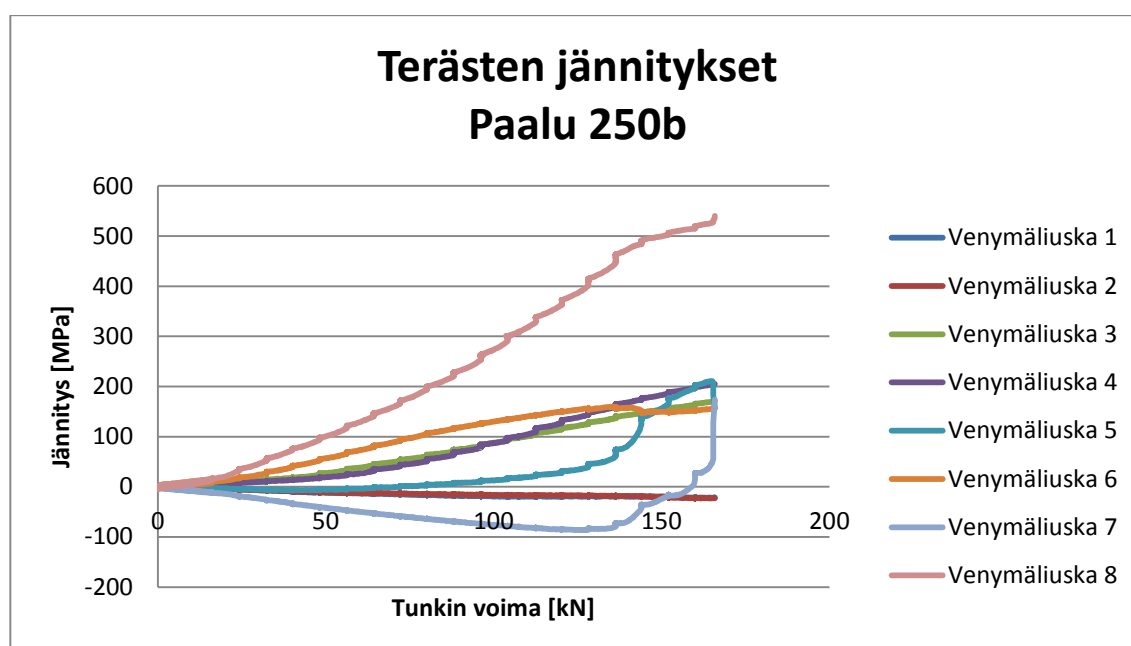
*Kuva 4.17 Paalun 250a murtumistapa oli taivutusmurto. Paalun pääteräkset menivät poikki kalliokärjen ankkurointiterästen päättymiskohdassa.*

Paaluun 250b liimattujen venymäliuskojen sijainnit on esitetty kuvassa 4.18. Lisäksi paalun pääteräksiin liimattiin kaksi venymäliuskaa (venymäliuskat 7 ja 8) suunnilleen samoihin kohtiin kuin kalliokärkeen liimatut venymäliuskat 5 ja 6. Venymäliuska 7 sijaitsi puristuspuolen teräksessä ja venymäliuska 8 liimattiin vetopuolen teräkseen.



**Kuva 4.18** Paalun 250b kalliokärjen tartuntateräksiin liimattujen venymäliuskojen paikat.

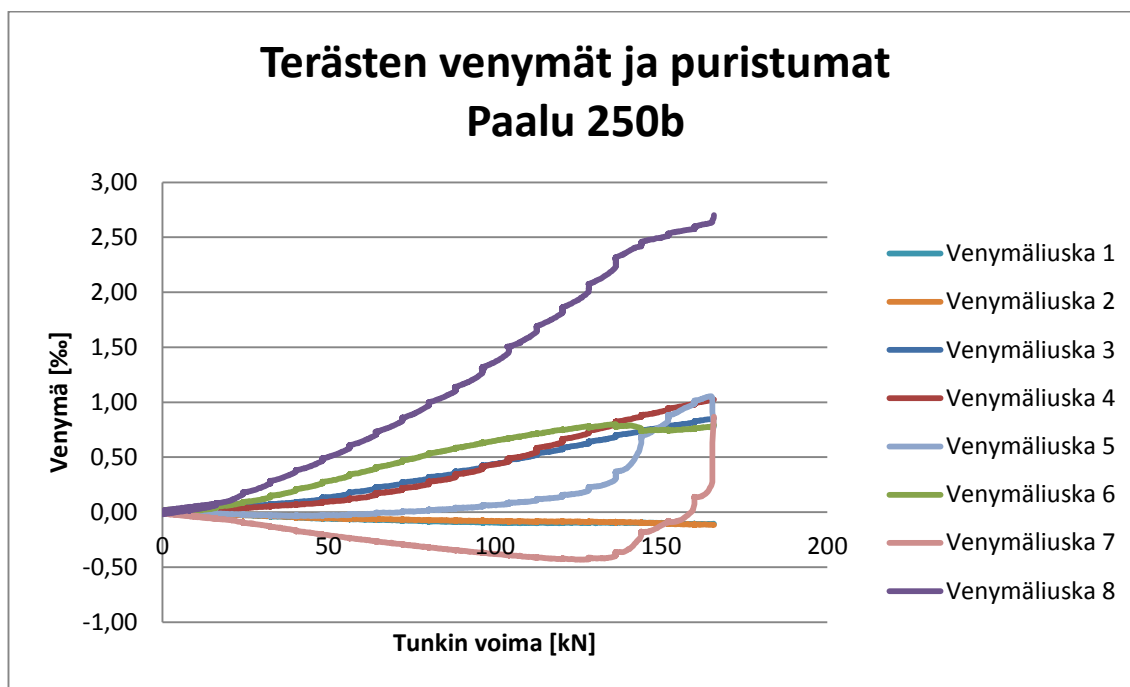
Taivutuskokeen aikaiset jännitykset teräksissä on esitetty kuvassa 4.19. Paalun pääteräksille tulee kaikista suurimmat jännitykset veto- ja puristuspuolella. Jännityskuvista nähdään myös, että yläpuolen teräkset toimivat aluksi puristusteräksinä, mutta betonin halkeilun kasvaessa ja puristuspuolelta pienentyessä alkavat yläpuolenkin teräkset toimimaan vetoteräksinä. Tämä voidaan havaita etenkin kalliokärjen ankkurointiteräkseen kauemmaksi liimatusta venymäliuskasta ja paalun yläpuolen pääteräkseen liimatusta liuskasta.



**Kuva 4.19** Terästen jännitykset taivutuskokeessa

Kalliokärjen tartuntateräksiin muodostuvat jännitykset ovat selvästi pienemmät kuin paalun pääterästen jännitykset. Paalun pääteräkset ottavat suurimman osan paaluun kohdistuvasta taivutusrasituksesta, joten niillä on suurempi vaikutus paalun taivutuskestävyyteen kuin kalliokärjen tartuntateräksillä.

Taivutuskokeen aikaiset venymät paalun pääteräksissä ja kalliokärjen tartuntateräksissä on esitetty kuvassa 4.20. Suurimmat venymät ja puristumat mitattiin paalun pääteräksiin liimatuista venymäliuskoista.



Kuva 4.20 Terästen venymät taivutuskokeessa

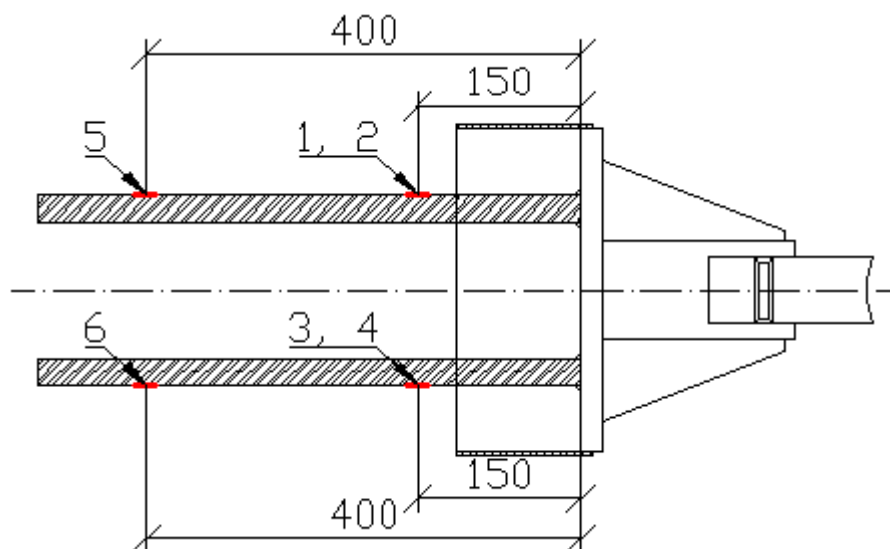
Paalun 250b murtumistapa on esitetty kuvassa 4.21. Paalun murtumistapana oli paalun varren taivutusmurto. Taivutusmurto tapahtui kalliokärjen ankkurointiterästen loppumiskohdassa. Paalun pääteräkset menivät poikki murrossa. Poikkimenneet teräkset on esitetty liitteessä II.





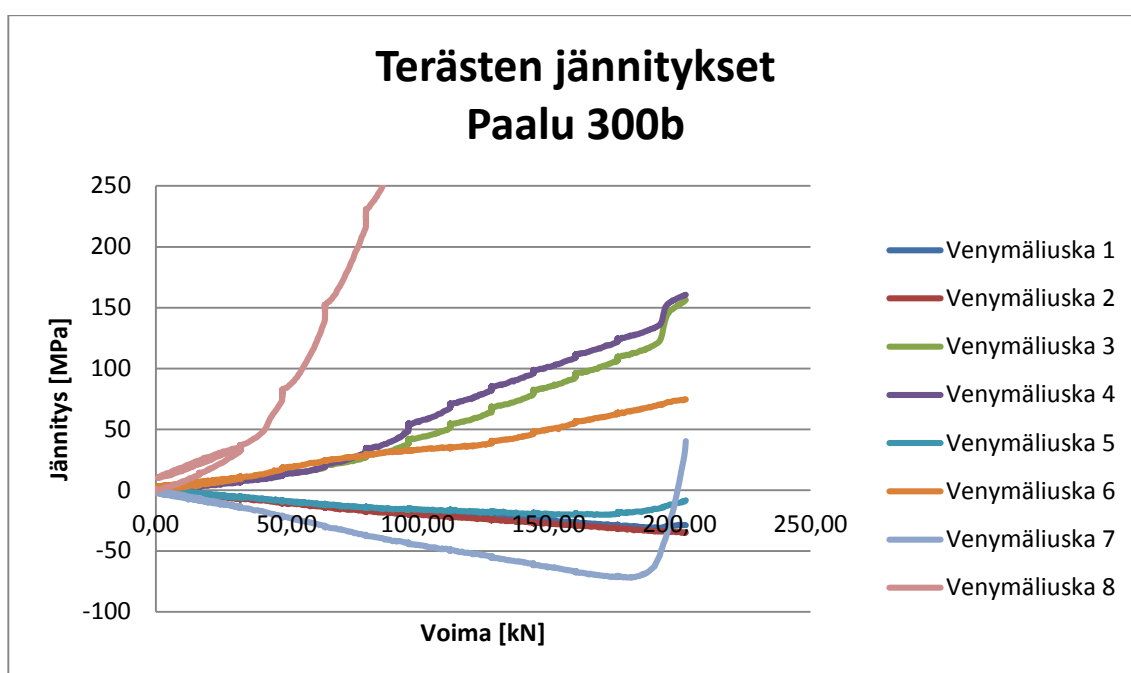
**Kuva 4.21** Paalun 250b murtumistapa oli taivutusmurto. Paalun pääteräkset menivät poikki kalliokärjen ankkurointiterästen päättymiskohdassa.

Paaluun 300b liimattujen venymäliuskojen sijainnit on esitetty kuvassa 4.22. Lisäksi paalun pääteräksiin liimattiin kaksi venymäliuskaa (venymäliuskat 7 ja 8) suunnilleen samoihin kohtiin kuin kalliokärkeen liimatut venymäliuskat 5 ja 6. Venymäliuska 7 sijaitsee puristuspuolen teräksessä ja venymäliuska 8 liimattiin vetopuolen teräkseen.



**Kuva 4.22** Paalun 300b kalliokärjen tartuntateräksiin liimattujen venymäliuskojen paikat.

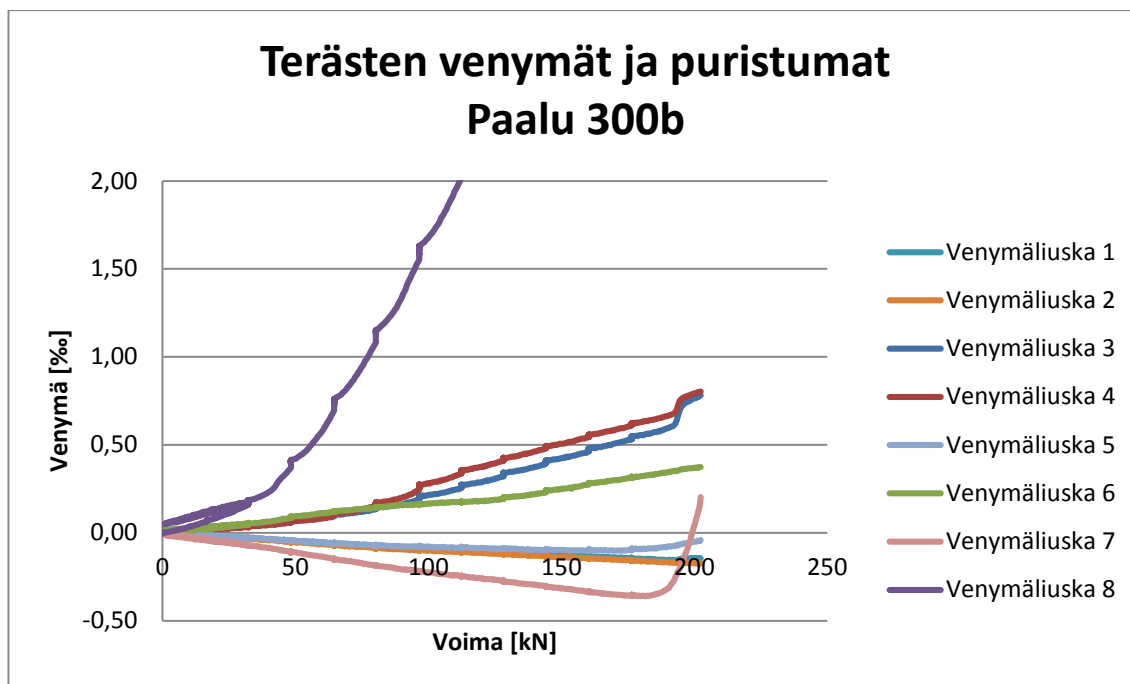
Taivutuskokeen aikaiset jännitykset teräksissä on esitetty kuvassa 4.23 ja niistä voidaan havaita, että jännitykset jakautuu teräksiin niin kuin niiden oletetaan. Paalun pääteräksille tulee kaikista suurimmat jännitykset veto- ja puristuspuolella. Paalun 300b vetopuolen pääteräs on alkanut myötää melko pienellä jännitysarvolla, mikä saattaa johtua siitä, että venymäliuska on sijainnut terästen kuroutumiskohdassa. Sama voidaan havaita terästen venymistä, jotka on esitetty kuvassa 4.24. Jännityskuvista nähdään myös, että yläpuolen teräkset toimivat aluksi puristusteräksinä, mutta betonin halkeilun kasvaessa ja puristuspuolelta pienentyessä alkavat yläpuolenkin teräkset toimimaan vetoteräksinä. Tämä voidaan havaita etenkin kalliokärjen ankkurointiteräkseen kauemmaksi liimatusta venymäliuskaista ja paalun yläpuolen pääteräkseen liimatusta liuskasta.



Kuva 4.23 Terästen jännitykset taivutuskokeessa.

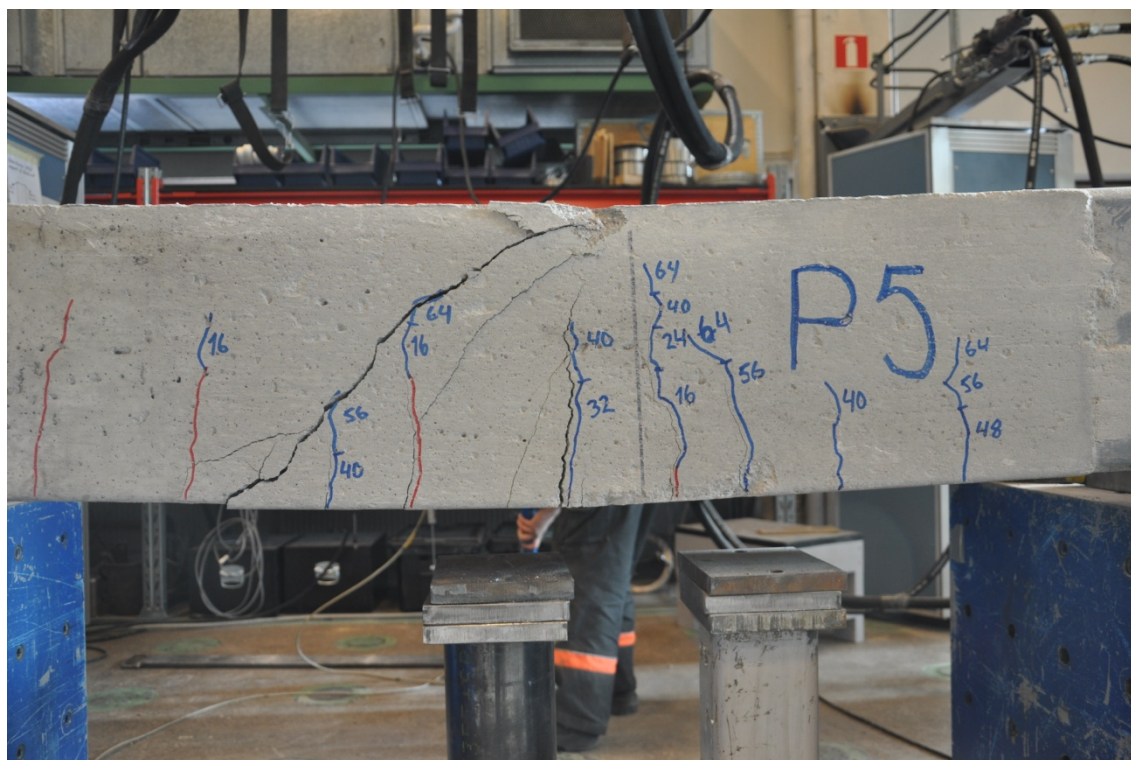
Kalliokärjen tartuntateräksiin muodostuvat jännitykset ovat selvästi pienemmät kuin paalun pääterästen jännitykset. Paalun pääteräkset ottavat suurimman osan paaluun kohdistuvasta taivutusrasituksesta, joten niillä on suurempi vaikutus paalun taivutuskestävyyteen kuin kalliokärjen tartuntateräksillä.

Taivutuskokeen aikaiset venymät paalun pääteräksissä ja kalliokärjen tartuntateräksissä on esitetty kuvassa 4.24. Suurimmat venymät ja puristumat mitattiin paalun pääteräksiin liimatuista venymäliuskoista.



Kuva 4.24 Terästen venymät ja puristumat taivutuskokeessa.

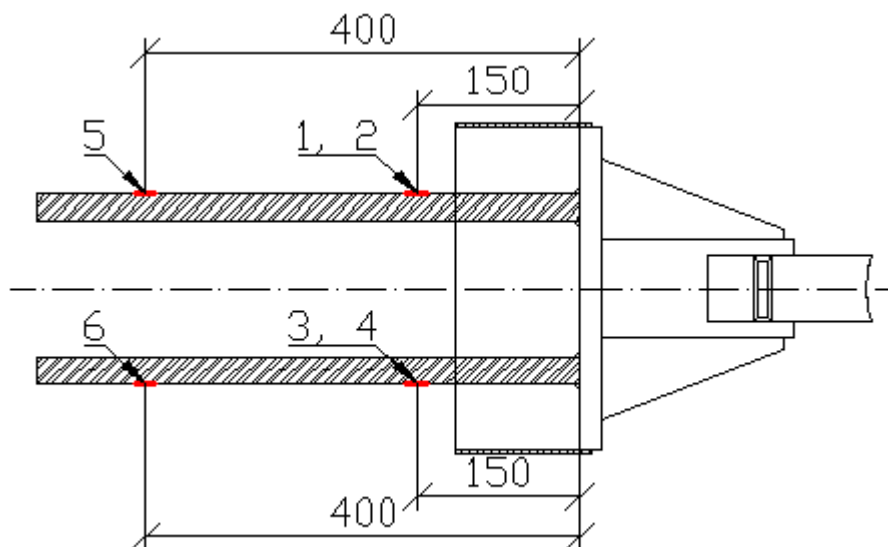
Paalun 300b murtumistapa on esitetty kuvassa 4.25. Paalun murtumistapana oli paalun varren yhdistetty taivutusleikkausmurto. Paalu murtui lähellä kuormapistettä.



Kuva 4.25 Paalun 300b murtumistapa oli yhdistetty taivutusleikkausmurto

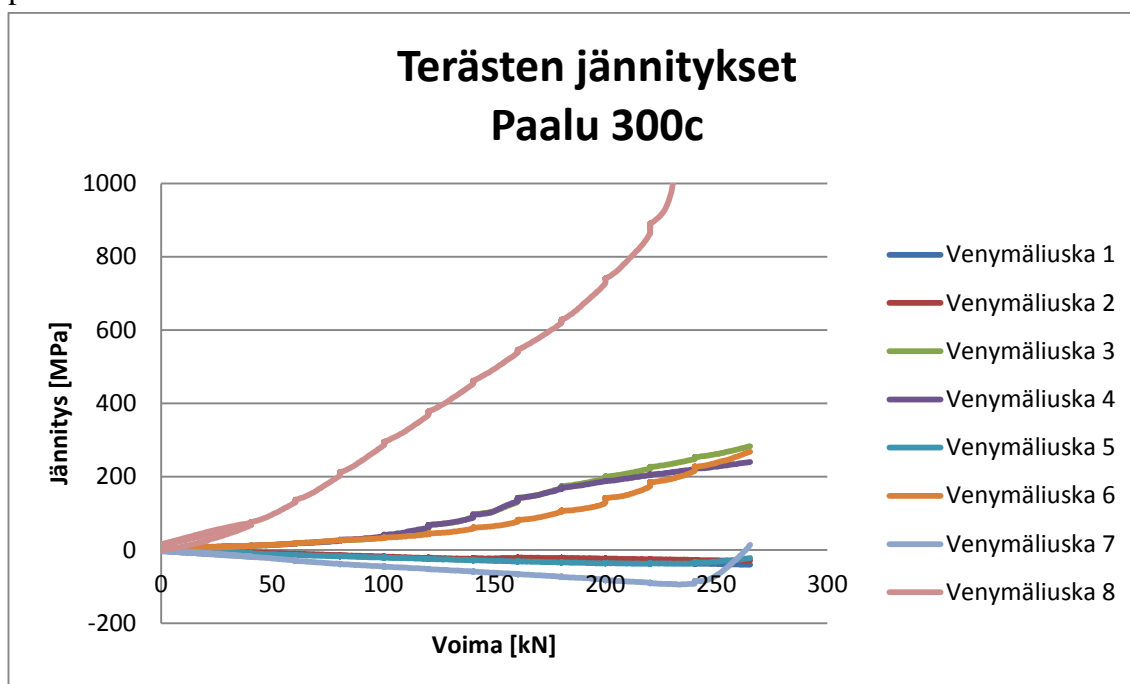
Paaluun 300c liimattujen venymäliuskojen sijainnit on esitetty kuvassa 4.26. Lisäksi paalun pääteräksiin liimattiin kaksi venymäliuskaa (venymäliuskat 7 ja 8) suunnilleen samoihin kohtiin kuin kalliokärkeen liimatut venymäliuskat 5 ja 6.

Venymäliuska 7 sijaitsee puristuspuolen teräksessä ja venymäliuska 8 liimattiin vetopuolen teräkseen.



Kuva 4.26 Paalun 300c kalliokärjen tartuntateräsiin liimattujen venymäliuskojen paikat.

Taivutuskokeen aikaiset jännitykset teräksissä on esitetty kuvassa 4.27 ja niistä voidaan havaita, että jännitykset jakautuu teräsiin niin kuin niiden oletetaan. Paalun pääteräksille tulee kaikista suurimmat jännitykset veto- ja puristuspuolella. Jännityskuvista nähdään myös, että yläpuolen teräkset toimivat aluksi puristusteräksinä, mutta betonin halkeilun kasvaessa ja puristuspuolelta pienentyessä alkavat yläpuolenkin teräkset toimimaan vetoteräksinä. Tämä voidaan havaita etenkin kalliokärjen ankkurointiteräkseen kauemmaksi liimatusta venymäliuskasta ja paalun yläpuolen pääteräkseen liimatusta liuskasta.

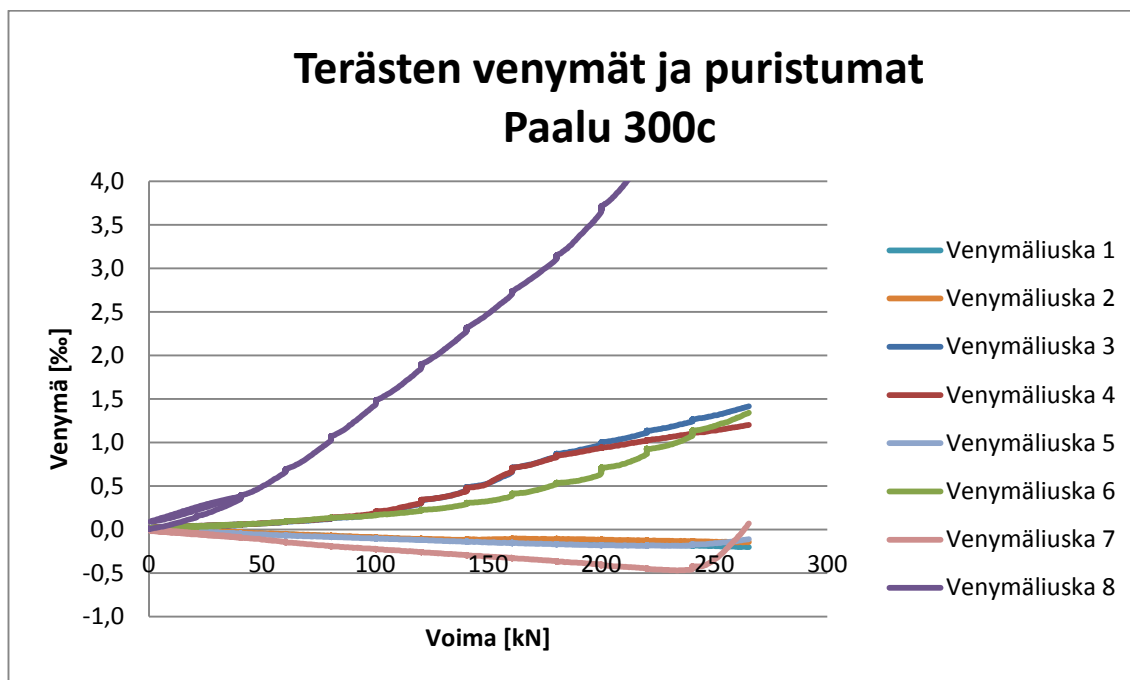


Kuva 4.27 Terästen jännitykset taivutuskokeessa



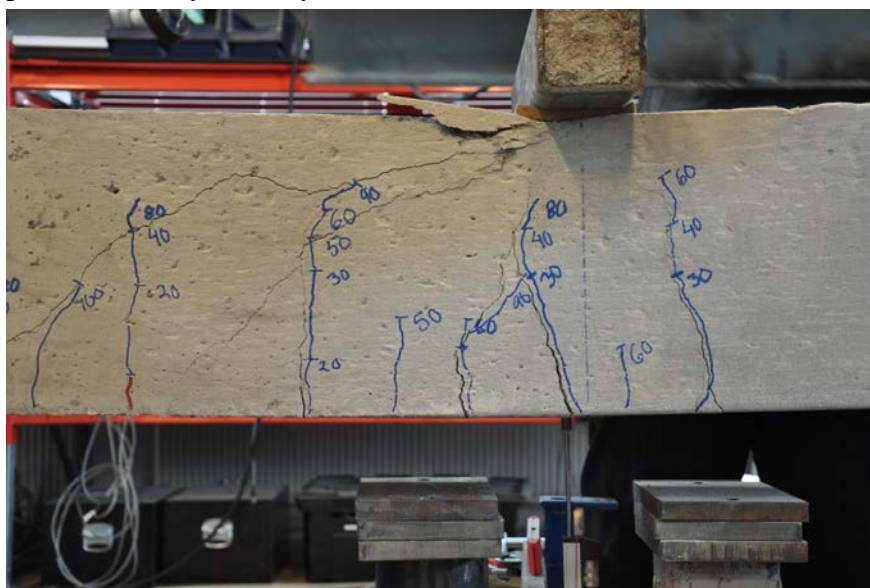
Kalliokärjen tartuntateräksiin muodostuvat jännitykset ovat selvästi pienemmät kuin paalun pääterästen jännitykset. Paalun pääteräkset ottavat suurimman osan paaluun kohdistuvasta taivutusrasituksesta, joten niillä on suurempi vaikutus paalun taivutuskestävyyteen kuin kalliokärjen tartuntateräksillä.

Taivutuskokeen aikaiset venymät paalun pääteräksissä ja kalliokärjen tartuntateräksissä on esitetty kuvassa 4.28. Myös terästen venymät käyttäytyivät, kuten niiden oletettiin käyttäytyvän. Suurimmat venymät ja puristumat mitattiin paalun pääteräksiin liimatuista venymäliuskoista.



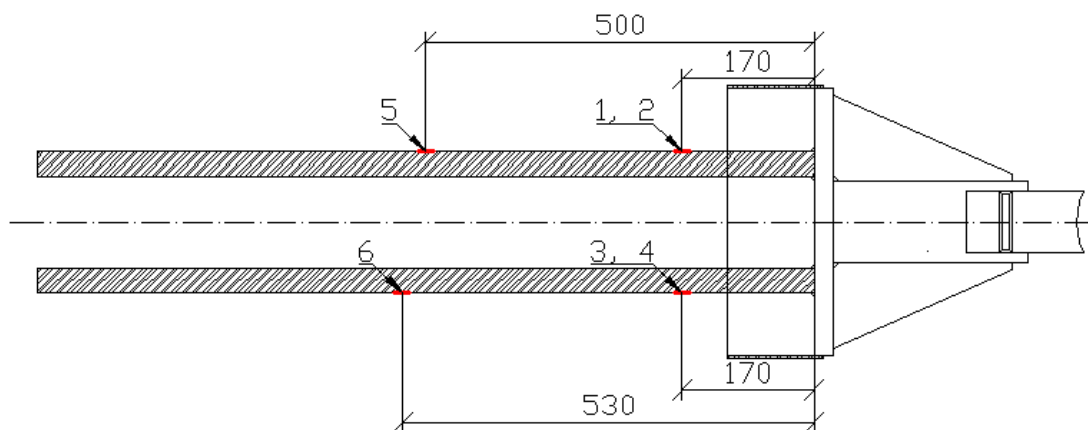
Kuva 4.28 Terästen venymät taivutuskokeessa

Paalun 300c murtumistapa on esitetty kuvassa 4.29. Paalun murtumistapana oli paalun varren yhdistetty taivutusleikkausmurto. Paalu murtui lähellä kuormapistettä.



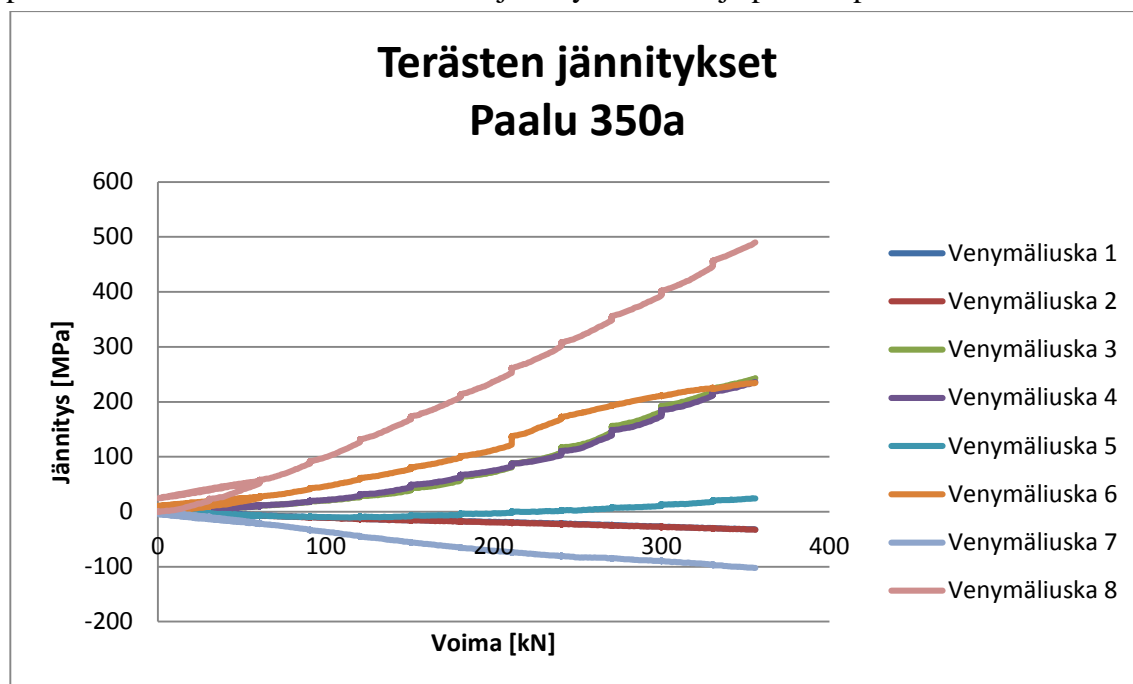
Kuva 4.29 Paalun 300c murtumistapana oli paalun varren yhdistetty taipuma-leikkausmurto.

Paaluun 350a liimattujen venymäliuskojen sijainnit on esitetty kuvassa 4.30. Lisäksi paalun pääteräksiin liimattiin kaksi venymäliuskaa (venymäliuskat 7 ja 8) suunnilleen samoihin kohtiin kuin kalliokärkeen liimatut venymäliuskat 5 ja 6. Venymäliuska 7 sijaitsi puristuspuolen teräksessä ja venymäliuska 8 liimattiin vetopuolen teräkseen.



*Kuva 4.30 Paalun 350a kalliokärjen tartuntateräksiin liimattujen venymäliuskojen paikat*

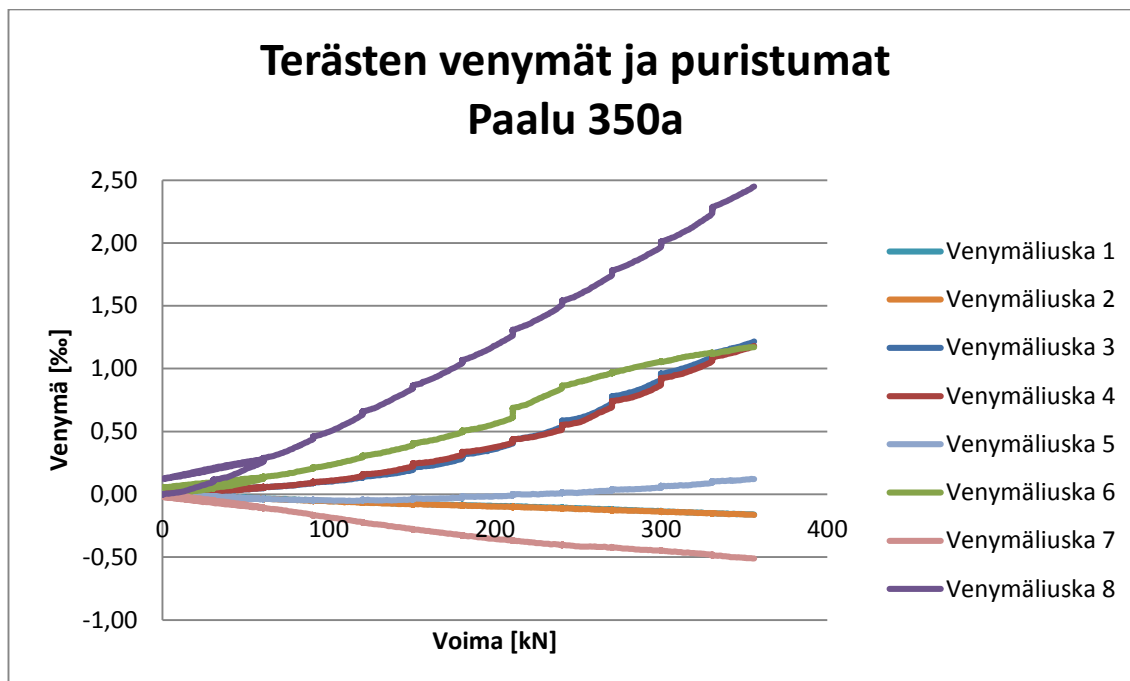
Taivutuskokeen aikaiset jännitykset teräksissä on esitetty kuvassa 4.31 ja niistä voidaan havaita, että jännitykset jakautuu teräksiin niin kuin niiden oletetaan. Paalun pääteräksille tulee kaikista suurimmat jännitykset veto- ja puristuspuolella.



*Kuva 4.31 Terästen jännitykset taivutuskokeessa*

Kalliokärjen tartuntateräksiin muodostuvat jännitykset ovat selvästi pienemmät kuin paalun pääterästen jännitykset. Paalun pääteräkset ottavat suurimman osan paaluun kohdistuvasta taivutusrasituksesta, joten niillä on suurempi vaikutus paalun taivutuskestävyyteen kuin kalliokärjen tartuntateräksillä.

Taivutuskokeen aikaiset venymät paalun pääteräksissä ja kalliokärjen tartuntateräksissä on esitetty kuvassa 4.32. Myös terästen venymät käyttäytyivät, kuten niiden oletettiin käyttäytyvän. Suurimmat venymät ja puristumat mitattiin paalun pääteräksiin liimatuista venymäliuskoista.



*Kuva 4.32 Terästen venymät taivutuskokeessa*

Paalun 350a murtumistapa on esitetty kuvassa 4.33. Paalun murtumistapana oli paalun varren leikkausmurto. Paalu murtui varren hakojen mentyä poikki. Poikkimenneet haat on esitetty liitteessä II.



*Kuva 4.33 Paalun 350a murtumistapa oli paalun varren leikkausmurto*

### 4.2.3 Momentti- ja leikkauskestävyys

Kaikki testatut kalliokärkipaalut täyttivät Paalutusohje PO-2011 sekä Lyöntipaalutusohje LPO-2005 mukaiset laatuvaatimukset momentin ja leikkauskestävyyden osalta. Vaaditun momenttikestävyyden on tulkittu koskevan koekappaleen maksimimomenttia taivutuskokeen aikana kuormapisteen kohdalla.

Taulukossa 4.19 on esitetty kuormitettujen koekappaleiden maksimikuormat sekä maksimileikkausvoimat (kalliokärkeen kohdistuva tukireaktio) ja maksimitaivutusmomentit kuormapisteen kohdalla. Taulukossa on eritelty murtoarvot taivutuskokeen ulkoiseen kuormaan ( $F_{koe}$ ,  $Q_{koe}$ ,  $M_{koe}$ ) sekä paalun omasta painosta johtuvaan kuormaan ( $F_g$ ,  $Q_g$ ,  $M_g$ ). Lisäksi taulukossa on esitetty PO-2011 sekä LPO-2005 mukaiset vaatimukset leikkausvoimalle sekä taivutusmomentille. PO-2011 vaatimukset on laskettu taulukoissa 4.14 - 4.18 esitetyllä poikkileikkausluokan PTL3  $R_{k;geo}$  -arvolla.

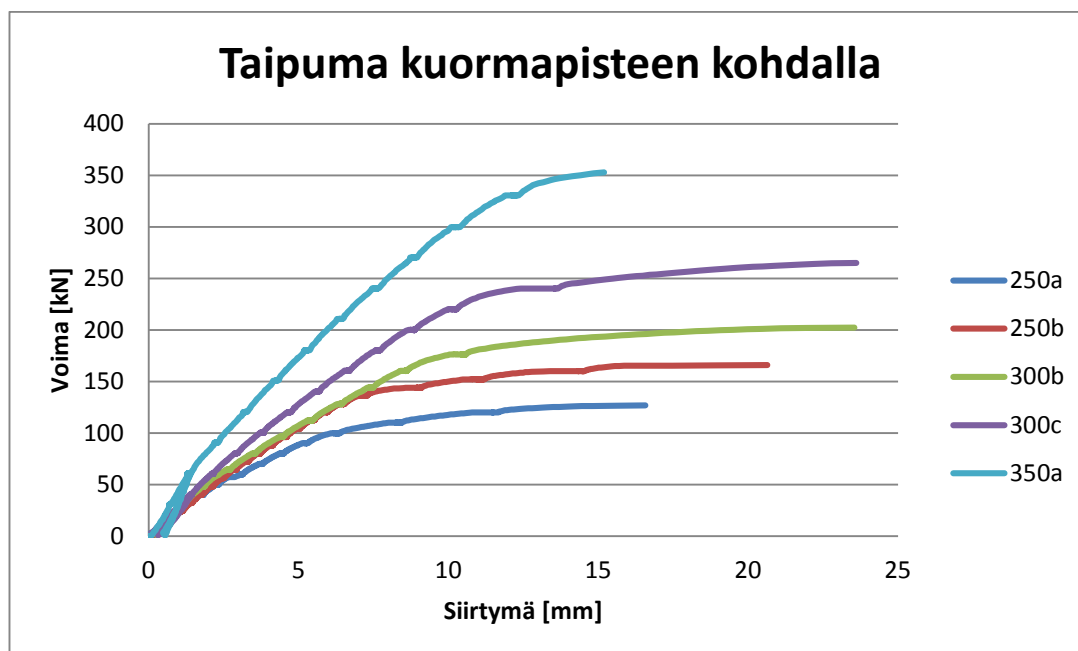
**Taulukko 4.19** Taivutuskokeiden tulokset sekä PO-2011 ja LPO-2005 mukaiset leikkausvoima- ja taivutusmomenttivaatimukset

| Koekappale                          | 250a  | 250b  | 300b  | 300c  | 350a  |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $F_{koe}$ [kN]                      | 126,8 | 165,9 | 202,4 | 265,2 | 355,9 |
| $F_g$ [kN]                          | 2,4   | 2,5   | 4,1   | 4,1   | 6,8   |
| $F_{max}$ [kN]                      | 129,2 | 168,4 | 206,5 | 269,3 | 362,8 |
| $M_{koe}$ [kNm]                     | 52,1  | 68,1  | 99,4  | 130,3 | 208,2 |
| $M_g$ [kNm]                         | 1,0   | 1,0   | 2,0   | 2,0   | 4,0   |
| $M_{max}$ [kNm]                     | 53,1  | 69,2  | 101,5 | 132,3 | 212,2 |
| $M_{vaatimus}$ (PO-2011) [kNm]      | 13,3  | 15,0  | 25,7  | 29,7  | 46,6  |
| $M_{vaatimus}$ (LPO-2005: IB) [kNm] | 25,0  | 25,0  | 35,0  | 35,0  | 50,0  |
| $Q_{koe}$ [kN]                      | 74,7  | 97,8  | 119,5 | 156,6 | 207,2 |
| $Q_g$ [kN]                          | 1,4   | 1,5   | 2,4   | 2,4   | 4,0   |
| $Q_{max}$ [kN]                      | 76,2  | 99,2  | 122,0 | 159,1 | 211,2 |
| $Q_{vaatimus}$ (PO-2011) [kN]       | 42,7  | 48,1  | 68,6  | 79,3  | 106,5 |
| $Q_{vaatimus}$ (LPO-2005: IB) [kN]  | 50,0  | 50,0  | 65,0  | 65,0  | 85,0  |
| $R_{k;geo;max}$ [kN]                | 1904  | 2481  | 3049  | 3977  | 5280  |



#### 4.2.4 Siirtymät

Jokaisen kuormitetun paalun taipuma kuormapisteen kohdalla on esitetty kuvassa 4.14. Kuvaajassa ei ole mukana paalun oman painon osuutta.



Kuva 4.14 Testattujen paalujen taipumat kuormapisteen kohdalla.

#### 4.2.5 Halkeamatarkastelut

Kokeen aikana tutkittiin halkeamien muodostumista kuorman kasvun myötä. Liitteessä II on esitetty kuvia halkeilleista koekappaleista. Kuvissa punaisella on merkitty ennen taivutuskokeen aloittamista koekappaleesta havaitut halkeamat ja sinisellä kuormituksen aikana muodostuneet halkeamat. Kuormituksen aikana tulleet halkeamat merkittiin koekappaleisiin kuormitusportaiden kohdalla ja halkeaman viereen kirjattiin kuormaportaan suuruus.

#### 4.2.6 Murtumistavat

Paalujen 250a ja 250b murtumistapa oli paalun varren taivutusmurto kalliokärjen tartuntaterästen päättymiskohdassa. Paalujen 300b ja 300c murtumistapa oli yhdistetty paalun varren taivutusleikkausmurto kuormapisteen kohdassa. Paalun 350a murtumistapa oli paalun varren leikkausmurto. Kuvassa 4.15 on esitetty murtoon kuormitetut paalut taivutuskokeen jälkeen.



*Kuva 4.15 Testatut paalut taivutuskokeen jälkeen. Paalujen P7 ja P6 murtumistapa oli paalun varren taivutusmurto kalliokärjen tartuntaterästen päättymiskohdassa. Paalujen P4 ja P5 murtumistapa oli yhdistetty paalun varren taivutusleikkausmurto kuormapisteen kohdassa. Paalun P24 murtumistapa oli paalun varren leikkausmurto.*

### 4.3 Yhteenveto

Tutkittavaan koesarjaan kuului viisi kalliokärjellistä teräsbetonipaalua. Koepaalut olivat rakennusteollisuuden julkaiseman tuotelehden mukaisia paaluja. Paalut olivat tyypiltään 250a, 250b, 300b, 300c ja 350a. Koepaalujen kalliokärjet olivat Leimet Oy:n valmistamia kalliokärkiä.

Paalut valettiin HTM-Yhtiöt Oy:n toimesta 4.2.2013 Hausjärven Ryttylässä. Paaluissa käytetyn betonin nimellislujuus oli C40/50 (EN 206). Lyönti- ja taivutuskokeiden aikainen betonin puristuskestävyys testattiin paalujen valun yhteydessä valetuista koekuutioista. Lyöntikokeiden aikainen betonin puristuslujuus oli 58,2 MPa ja taivutuskokeiden aikainen betonin puristuslujuus oli 62,0 MPa.

Kaikki koekappaleet kestivät lyöntikokeiden 1000 iskua jännitystasolla 28 MPa, eikä kalliokärkiin muodostunut merkittäviä muodonmuutoksia. Lyöntikokeiden jälkeen paalut katkaistiin taivutuskoepituuteen.

Kaikki testatut kalliokärkipaalut täyttivät Paalutusohje PO-2011 sekä lyöntipaalutusohje LPO-2005 mukaiset laatuvaatimukset taivutusmomentin ja leikkauskestävyyden osalta. Paalutusohje PO-2011 mukaiset kalliokärjen vetokestävyysvaatimukset täyttyivät, koska kalliokärki pysyi lyönnin aikana paalun kärjessä siten, että se kykeni välittämään momentin ja leikkausvoiman osalta asetetut vaatimukset.

Kaikki taivutuskuormitetut paalut murtuivat paalun varresta, joten taivutuskokeesta ei selvinnyt miten paljon taivutusta koestetut kalliokärjet

todellisuudessa kestävät. Taivutuskoejärjestelyt eivät siis todenna kalliokärjen kestävyyttä täysin tarkasti. Testatut paalut olivat rakennusteollisuuden julkaiseman tuotelehden mukaisia paaluja, eikä niiden teräsmäärää ollut lisätty, vaikka Paalutusohjeen PO-2011 mukaan paalun pääteräksiä on mahdollista lisätä kalliokärkien kestävyyttä tutkittaessa. Paalun varren terästystä lisäämällä saataisiin paremmin tutkittua kalliokärjen todellista kestävyyttä.

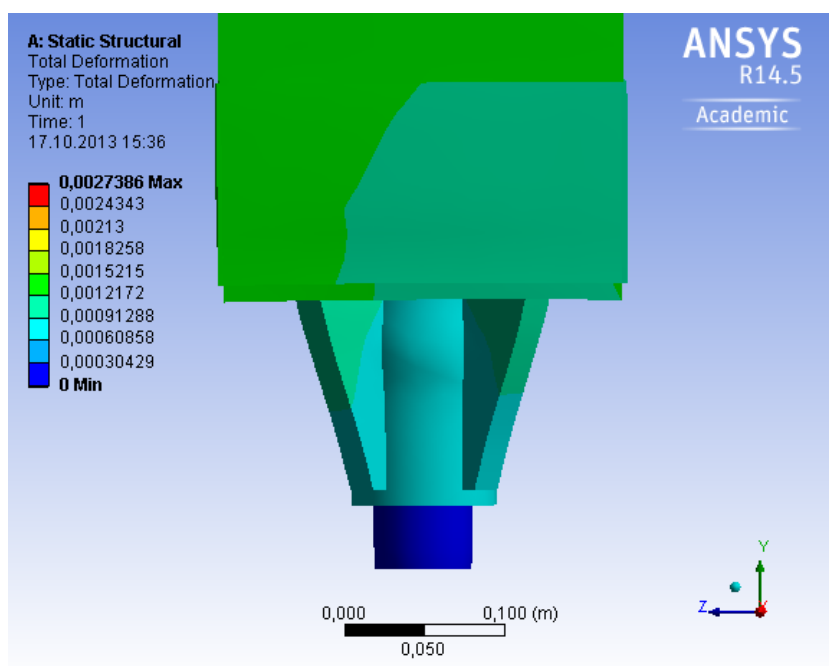
## 5 TULOSTEN TARKASTELO

### 5.1 Jännitysten mallintaminen koetulosten perusteella

Kalliokärkeen ja paaluun syntyviä jännityksiä mallinnettiin FE-menetelmään pohjautuvalla Ansys-mallinnusohjelmalla. Jännityksiä mallinnettiin lyötässä paalua tasaiseen kallioon ja 30° kulmassa olevaan kallioon. Vinon kallion lyöntiä mallintaessa kärkitappi tukeutuu kalliota vasten vain puoliksi, joten kärkitappin jännitykset kasvavat. Lisäksi epäkeskisyys aiheuttaa kalliokärkeen momenttia. Mallinnuksessa ei pystytty huomioimaan kalliokärjen liukumista kallion pinnalla, joten mallinnus ei täysin vastaa todellista tilannetta. Vinon kallion tapaus kuvaa oikeastaan kuormitustapausta, jossa vain puolet kärkitappista tukeutuu kallioon.

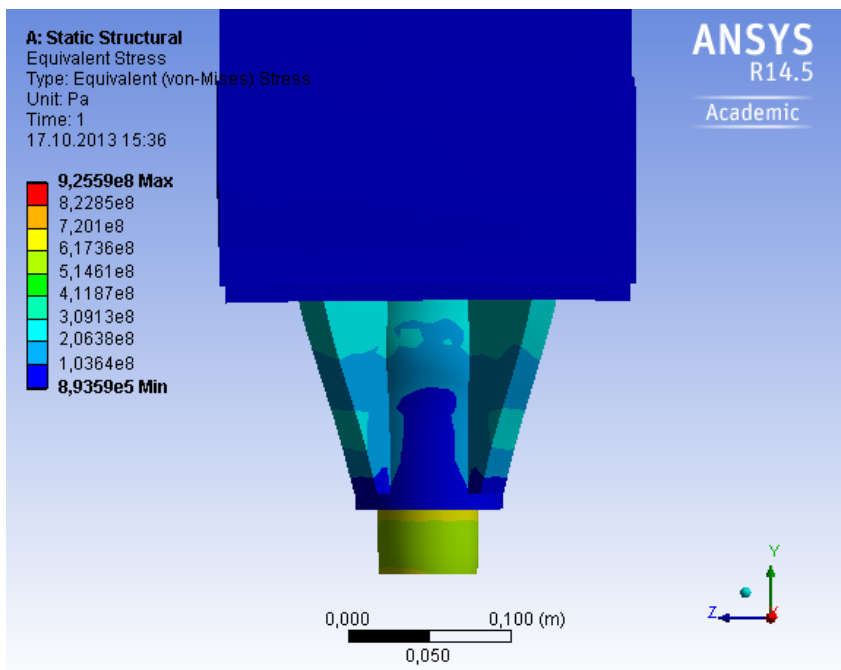
Kalliokärjen teräsosien mallinnuksessa on käytetty kalliokärkipiirustuksien mukaisia materiaaliarvoja. Käytetyt materiaaliarvot ovat ominaisarvoja. Paalun betonin lujuutena on käytetty 58,2 MPa, joka oli lyöntikokeiden aikaan mitattu puristuslujuus. Tässä kohdassa on esimerkkinä esitetty 250 x 250 mm<sup>2</sup> paalun mallinnus. Liitteessä III on esitetty mallinnustulokset myös 300 x 300 mm<sup>2</sup> ja 350 x 350 mm<sup>2</sup> paaluista.

Kuvassa 5.1 on mallinnettu kalliokärkeen syntyviä muodonmuutoksia lyötässä paalua tasaiseen kallioon. Kärkitappiin ei tule muodonmuutoksia ja kalliokärjen muiden teräsosien muodonmuutokset ovat alle 2 mm suuruisia.



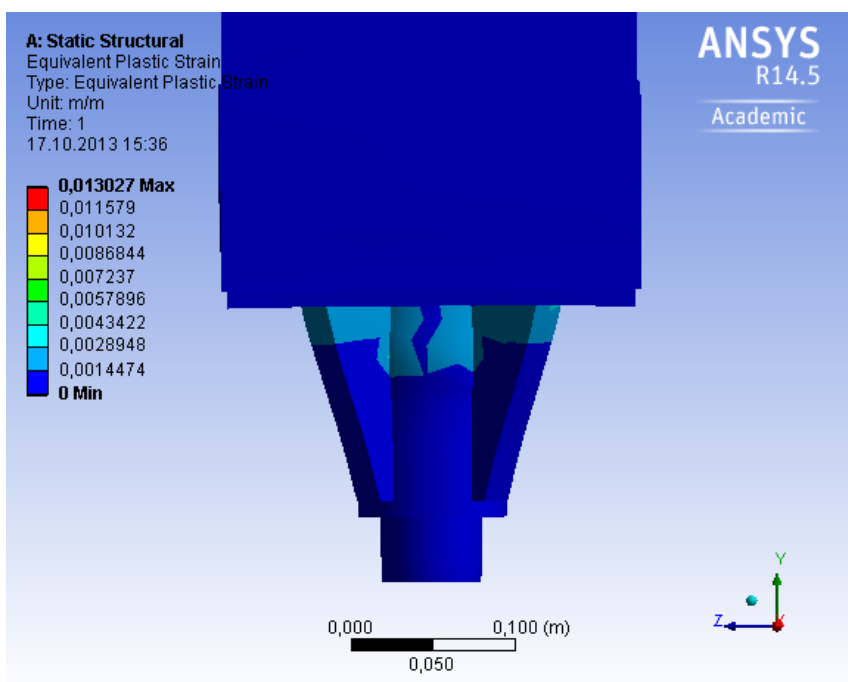
Kuva 5.1 Paaluun 250x250 syntyvät muodonmuutokset, kun paalua lyödään tasaiseen kallioon jännityksellä 28 MPa.

Kuvassa 5.2 on mallinnettu kalliokärkeen syntyviä jännityksiä, kun paalua lyödään tasaiseen kallioon. Kalliokärjen dubbiin muodostuu suurimmat rasitukset, jotka ovat suuruudeltaan noin 617 MPa. Kalliokärjen siivekkeisiin muodostuu noin 309 MPa rasitus.



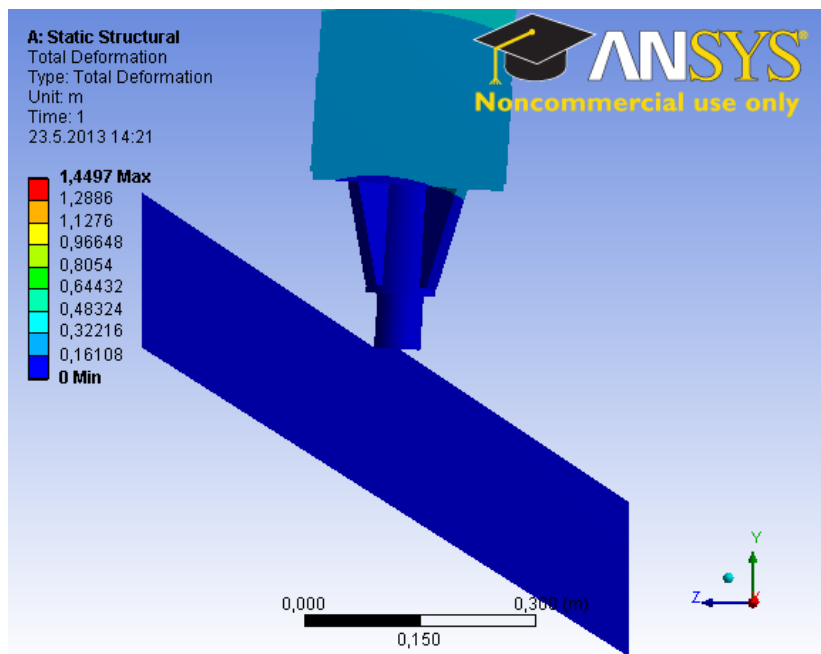
*Kuva 5.2 Paaluun 250x250 syntyvät jännitykset, kun paalua lyödään tasaiseen kallioon jännityksellä 28 MPa.*

Kuvassa 5.3 on mallinnettu kalliokärjen plastisoitumista, kun paalua lyödään tasaiseen kallioon. Kalliokärjen siivekkeet alkavat hieman plastisoitua. Plastisoituminen on kuitenkin hyvin vähäistä.



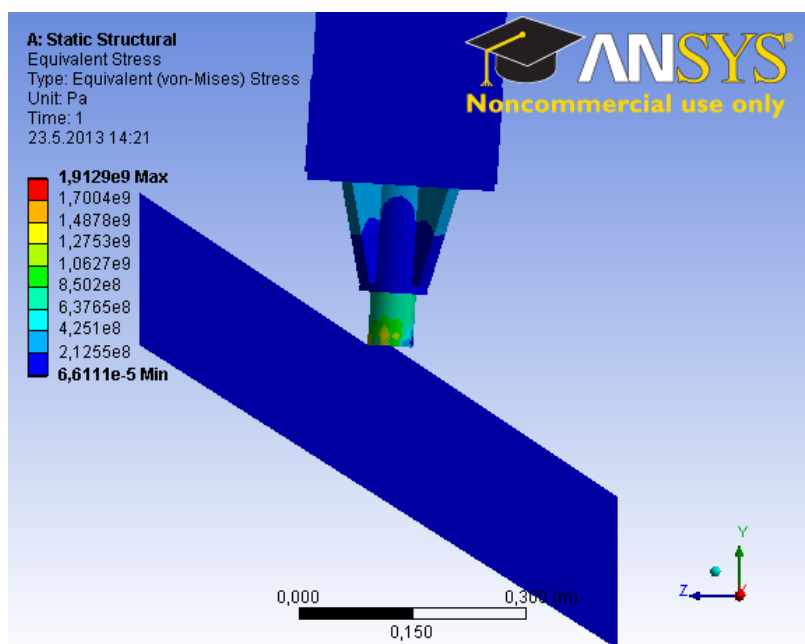
*Kuva 5.3 Paalun 250x250 plastisoituminen, kun paalua lyödään tasaiseen kallioon jännityksellä 28 MPa.*

Kuvassa 5.4 on mallinnettu kalliokärjen muodonmuutoksia, kun paalua lyödään vinoon kallioon. Muodonmuutoksista ei kuitenkaan voida tehdä juurikaan havaintoja, sillä paalu on kallistunut, joten pienimmät muodonmuutokset eivät ole kuvasta havaittavissa.



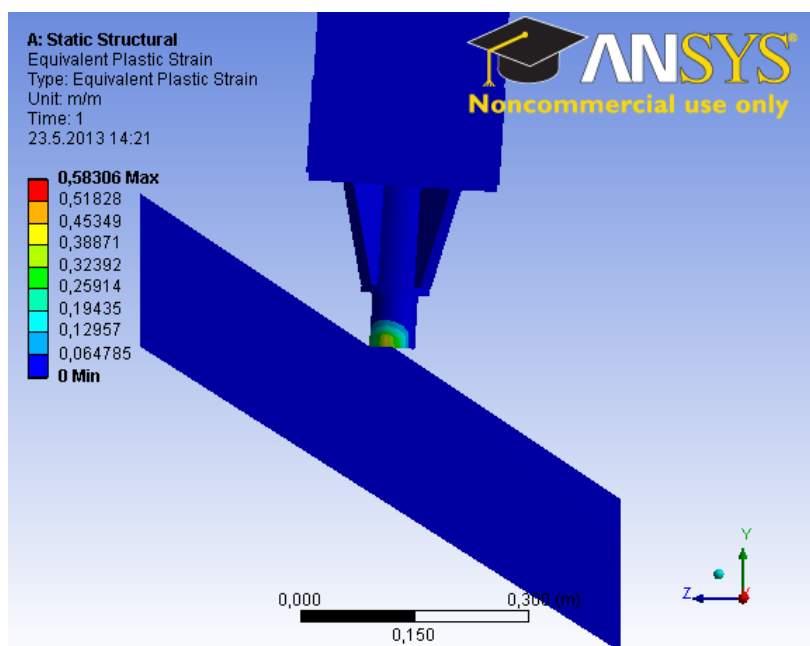
*Kuva 5.4 Paaluun 250x250 syntyvät muodonmuutokset, kun paalua lyödään vinoon kallioon jännityksellä 28 MPa.*

Kuvassa 5.5 on mallinnettu kalliokärkeen muodostuvia jännityksiä, kun paalua lyödään vinoon kallioon. Kalliokärjen dubbiin muodostuu suurimmat rasitukset, jotka ovat suuruudeltaan noin 1275 MPa. Kalliokärjen siivekkeisiin muodostuu noin 213 MPa rasitus.



*Kuva 5.5 Paaluun 250x250 syntyvät jännitykset, kun paalua lyödään vinoon kallioon jännityksellä 28 MPa.*

Kuvassa 5.3 on mallinnettu kalliokärjen plastisoitumista, kun paalua lyödään vinoon kallioon. Vinon kallion tapauksessa kalliokärjen dubbi alkaa plastisoitua, koska vain dubin puolikas tukeutuu kallioon.



Kuva 5.6 Paalun 250x250 plastisoituminen, kun paalua lyödään vinoon kallioon jännityksellä 28 MPa.

Kalliokärjen liukumista vinolla kalliopinnalla ei pystytty mallinnuksessa huomioimaan, joten mallinnus vastaa huonosti todellista tilannetta. Yksinkertaistettu malli vinon kallion lyönnin aiheuttamista rasituksista on esitetty kohdassa 2.5. Liitteessä V on yksinkertaistetun mallin mukainen esimerkkilasku paaluun kohdistuvista vaakasuuntaisista rasituksista kalliokärjen liukuessa vinolla kalliopinnalla. Esimerkkilaskun tarkoituksena on havainnollistaa vinoon kallioon lyötäessä syntyviä rasituksia ja verrata niitä RIL-254:n mukaisen taivutuskokeen rasituksiin. Mallin mukaiset rasitukset vastaavat melko hyvin taivutuskokeen mukaisia rasituksia.

## 5.2 Arvio kokeiden tuloksista ja koejärjestelyistä

HTM-Yhtiöt Oy toimitti yhteensä viisi Rakennusteollisuuden julkaiseman tuotelehden mukaista kalliokärjellä varustettua teräsbetonipaalua tutkittavaksi Tampereen teknilliselle yliopistolle. Tutkitut paalut olivat kooltaan 250x250 mm<sup>2</sup> (2 kappaletta), 300x300 mm<sup>2</sup> (2 kappaletta) ja 350x350 mm<sup>2</sup> (1 kappale). Koekappaleille suoritettiin standardin EN 12794 + A1:2007 mukaiset lyöntikokeet sekä Paalutusohje 2011 mukaiset taivutuskokeet.

Teräsbetonisten kalliokärkipaalujen betonin puristuslujuus testattiin rakennekoelieriöistä taivutuskokeiden jälkeen. Betonin puristuslujuus lyöntikokeiden aikana oli 58,2 MPa (nimellislujuus C40/50).

Lyöntikokeissa kaikki koekappaleet kestivät 1000 iskua jännitystasolla 28 MPa. Lyöntikokeiden jälkeen paalut katkaistiin taivutuskoepituuteen. Kaikki testatut kalliokärkipaalut täyttivät Paalutusohje PO-2011 sekä Lyöntipaalutusohje LPO-2005 mukaiset laatuvaatimukset momentin ja leikkauskestävyyden osalta.

Nykyiset laadunvarmistusmenetelmät ovat varsin hyvät. Lyöntikoetta ja iskunkestävyysvaatimuksia ei ole mitään tarvetta muuttaa. Taivutuskokeella saadaan selvitettyä hyvin kalliokärjen taivutusmomentti- ja leikkauskestävyyttä. Taivutuskoe voitaisiin kuitenkin korvata lyöntikokeilla, joissa paaluja lyötäisiin vinoon kallioon. Tällöin koe vastaisi paremmin todellista paalutustilannetta. Paaluun ja kalliokärkeen kohdistuvat suurimmat taivutusrasitukset lyöntivaiheessa, joten paalun kestäessä lyöntikokeet vinoon kallioon se hyvin todennäköisesti kestää asennuksen jälkeen tulevat taivutusmomentit. Vinoon kallioon lyötäessä uutta koejärjestelyä tulee suunnitella tarkemmin. Suunnitelmissa on pohdittava, mikä olisi sopiva kulma, jossa paalua lyödään kallioon. Lisäksi tulee pohtia onko helpompi lyödä paalua valmiiksi vinoa kalliopintaa vasten vai lyödäänkö paalua vinosti tasaiseen kallioon. Vinon kalliopinnan lyöntikoe on vaikea yhdenmukaistaa, sillä kallion kaltevuuden ja lujuusominaisuuksien tulee olla vakioitavissa. Vinon kalliopinnan lyöntikoe olisi todennäköisesti kalliimpi ja vaikeampi toteuttaa kuin nykyiset laadunvarmistusmenetelmät.

Teräsputkipaalujen lyöntiä vinoon kallioon on tutkittu Hannu Jokiniemen diplomityössä (Teräsputkipaalujen kalliokärjet, 1992). Vinoon lyönnissä on omat haasteensa. Kallion kulma on vaikea vakioida, tasaiseen kallioon vinoon lyötäessä epäkeskeisen lyönnin ja lyönninaikaisten virheiden todennäköisyys kasvaa. [10]

Lyöntikoe vinoon kallioon olisi mahdollista toteuttaa asentamalla paksu teräslevy vinosti maahan, ja teräslevyn päälle tulisi maata noin kaksi metriä. Järjestely on muuten sama kuin tässä työssä toteutetussa lyöntikokeessa, mutta teräslevy olisi asennettu vinoon. Hyviä puolia tässä olisi esimerkiksi helposti vakioitavat lyöntiolosuhteet. Koejärjestelyn huono puoli on, että teräslevy ei täysin vastaa kallion pintaa, sillä kalliokärki ei uppoa teräslevyyn niin helposti kuin kallioon, joten kalliokärki liukuu levyn pinnalla aiheuttaen suuremmat taivutusrasitukset kalliokärkeen. Toisaalta kokeen läpäisseet paalut olisivat todennäköisesti kestäviä, koska niille ei todellisessa asennustilanteessa tulisi yhtä suuria taivutusrasituksia.

Viistetyn kalliokärjen lyöntiä tasaiseen kallioon pohdittiin, mutta se ei vastaisi todellista tilannetta niin hyvin kuin vinon kalliopinnan koejärjestely, sillä viistetty kärki todennäköisesti uppoaa lyötävään alustaan paremmin kuin viistämätön. Kärkitappiin tulisi tällöin kovemmat jännitykset pienemmästä pinta-alasta johtuen. Lisäksi pohdittiin mahdollisuutta korvata kalliokärjen taivutuskokeet puolikkaalla kärkitapilla suoritettavalla lyöntikokeella. Suoritettujen FE-mallinnusten ja käytyjen keskustelujen perusteella tällaisen testausmenetelmän ei kuitenkaan todettu varmentavan kalliokärjeltä vaadittuja ominaisuuksia, joten tältä osin lisätutkimustarve hylättiin.



### 5.3 Uusien laatuvaatimusten määrittäminen

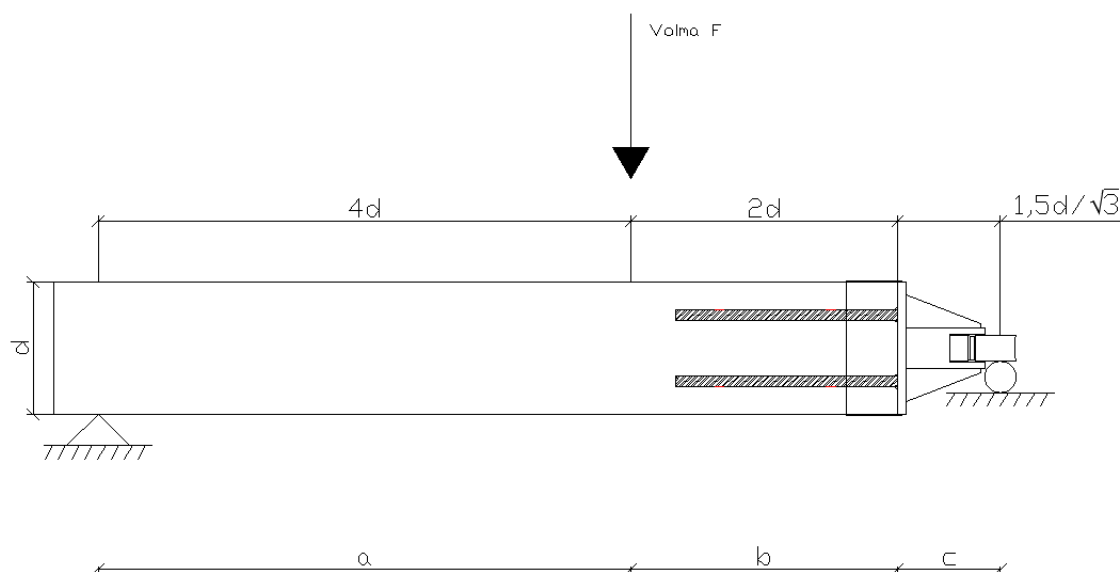
Paalun geoteknistä kestävyyttä laskettaessa Rakennusteollisuuden julkaiseman tuotelehden mukaisille paaluille on paalun geotekninen kestävyys redusoitava vastaamaan paalun poikkileikkauksen momenttikestävyyden ominaisarvoa. Paalun poikkileikkauksen momenttikestävyys toimii mitoittavana tekijänä, joten paaluun kiinnitettävän kalliokärjen momenttikestävyysvaatimukseksi voidaan asettaa paalun varren momenttikestävyys. Taivutuskokeissa havaittiin, että kalliokärjen tartuntateräksiin muodostuvat jännitykset on selvästi pienemmät kuin paalun pääterästen jännitykset. Taulukkoon 4.20 on laskettu kalliokärjen tartuntateräksiin liimatun venymäliuskan ja paalun pääteräksiin samaan kohtaan liimatun venymäliuskan jännitysten suhteiden keskiarvo lähellä paalun varren murtoa.

**Taulukko 4.20** Kalliokärjen tartuntateräksiin ja paalun pääteräksiin taivutuskokeessa syntyvien jännityksien suhteen keskiarvot lähellä paalun murtumista.

| Paalutyyppi           | Yläpinnan teräket | Alapinnan teräket |
|-----------------------|-------------------|-------------------|
| 250a                  | 0,28              | 0,44              |
| 250b                  | 0,20              | 0,29              |
| 300b                  | 0,34              | 0,29              |
| 300c                  | 0,41              | 0,15              |
| 350a                  | 0,20              | 0,51              |
| Jännitysten keskiarvo | 0,29              | 0,34              |

Jos kalliokärjen momenttikestävyys annetaan paalun varren momenttikestävyytenä, voidaan kalliokärjen momenttivaatimusta pienentää vastaamaan kalliokärjen tartuntateräksien todellisia jännityksiä. Ohjeissa tulee selvästi mainita tulkitaanko momenttivaatimus sijaitsevan kuormituspisteen kohdalla vai kalliokärjen ja paalun liitoskohdassa. Jos momenttivaatimus halutaan antaa kalliokärjen ja paalun liitoskohdassa tulee vaatimusta pienentää taivutuskoejärjestelyn mukaisesti, koska RIL 254:n mukaisella koejärjestelyllä taivutusmomentti on kuormituspisteen kohdalla paljon suurempi kuin kalliokärjen ja paalun liitoskohdassa.

Liitteessä VI on esitetty esimerkkilasku paalun 300b geoteknisen kestävyuden laskemisesta. Laskussa on laskettu myös paalun poikkileikkauksen momenttikestävyyden ominaisarvo, joka toimii mitoittavana. Paalun 300b laskennallinen momenttikestävyys on 71,24 kNm. Taivutuskokeen mukaiset mitat on esitetty kuvassa 4.16. Kalliokärjen pituus (mitta c) on määritetty kalliokärjen ja paalun varren liittymäkohdan ja kalliokärjen kärkitapin välisen 60° kulman avulla.



**Kuva 4.16** Taivutuskoejärjestelyn mukaiset mitat, mitta  $c$  on määritetty kalliokärjen ja paalun varren liittymäkohdan ja kalliokärjen kärkitapin välisen  $60^\circ$  kulman avulla.

Esimerkkilaskun mukaisesti paalun 300b taivutusvaatimukseksi kalliokärjen ja paalun liitoskohdassa saadaan 21,45 kNm. Taulukossa 4.21 on esitetty suositukset kalliokärjen momenttivaatimuksista. Taulukossa 4.21 on esitetty myös kalliokärjen momentti- ja leikkauskestävyysvaatimusten redusoidut arvot. Vaatimusten redusoinnin kertoimena on käytetty arvoa 0,4; joka on määritetty taulukon 4.20 jännitysten keskiarvoa hieman varmalle puolelle suurentaen. Leikkausvoimaa redusoitaessa on huomioitava, että kalliokärjen on pystyttävä välittämään siihen kohdistuva leikkausvoima paalulle.

**Taulukko 4.21** Suositukset kalliokärjen momentti- ja leikkauskestävyysvaatimuksista

| Paalutyyppi | $M_{\text{varsi}}$ [kNm] | $M_{\text{liitos}}$ [kNm] | $V$ [kN] | $M_{\text{varsi,red}}$ [kNm] | $M_{\text{liitos,red}}$ [kNm] | $V_{\text{red}}$ [kN] |
|-------------|--------------------------|---------------------------|----------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 250a        | 33                       | 10                        | 46       | 13                           | 4                             | 18                    |
| 250b        | 42                       | 13                        | 59       | 17                           | 5                             | 23                    |
| 300a        | 55                       | 17                        | 64       | 22                           | 7                             | 26                    |
| 300b        | 69                       | 21                        | 80       | 28                           | 8                             | 32                    |
| 300c        | 103                      | 31                        | 120      | 41                           | 12                            | 48                    |
| 300c (8T14) | 130                      | 39                        | 151      | 52                           | 16                            | 60                    |
| 350a        | 160                      | 48                        | 160      | 64                           | 19                            | 64                    |

Kalliokärjen ankkurointi paaluun on merkittävä kalliokärjen kestävyuden kannalta. Kalliokärjen ankkurointiterästen pituus tulee olla vähintään 500 mm. Tällöin varmistetaan kalliokärjen riittävä tartunta betoniin.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

### 6.1 Arvio testausmenetelmistä ja laatuvaatimuksista

Lyöntikokeissa kaikki koekappaleet kestivät 1000 iskua jännitystasolla 28 MPa. Lyöntikokeiden jälkeen paalut katkaistiin taivutuskoepituuteen. Kaikki testatut kalliokärkipaalut täyttivät Paalutusohje PO-2011 sekä Lyöntipaalutusohje LPO-2005 mukaiset laatuvaatimukset momentin ja leikkauskestävyyden osalta.

Nykyiset laadunvarmistusmenetelmät ovat varsin hyvät. Lyöntikoetta ja iskunkestävyysvaatimuksia ei ole mitään tarvetta muuttaa. Taivutuskokeella saadaan selvitettyä hyvin kalliokärjen taivutusmomentti- ja leikkauskestävyyttä. Taivutusmomentti- ja leikkauskestävyysvaatimuksia on mahdollista tarkentaa. Taivutuskestävyysvaatimus voidaan antaa paalun varren redusoituna momenttikestävyytenä. Vetokestävyysvaatimukset ovat sellaisenaan hyvät.

### 6.2 Suositus laatuvaatimuksista

Kalliokärjen momenttikestävyys voidaan antaa paalun varren redusoituna momenttikestävyytenä. Tällöin momenttivaatimus tulkitaan sijaitsevan kuormituspisteen kohdalla ja se tulee ohjeissa selvästi mainita. Tutkimuksen tuloksena saadut kalliokärjen laatuvaatimussuositukset taivutuskestävyyden ja leikkausvoimakestävyyden osalta on esitetty taulukossa 6.1.

**Taulukko 6.1** Suositukset kalliokärjen uusista laatuvaatimuksista

| Paalutyyppi                 | 250a | 250b | 300a | 300b | 300c | 300c (8T14) | 350a |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|-------------|------|
| $M_{\text{suositus}}$ [kNm] | 15   | 20   | 25   | 30   | 45   | 55          | 65   |
| $V_{\text{suositus}}$ [kN]  | 20   | 25   | 30   | 35   | 50   | 60          | 65   |

### 6.3 Jatkotutkimustarpeet

Tämän diplomityön puitteissa ei ollut resursseja suorittaa kenttämittauksia kalliokärjen lyönnistä vinoon kallioon. Kalliokärjen lyöntiä vinoon kallioon on tutkittu hyvin vähän, eikä kalliokärkeen asennustilanteesta muodostuvista voimista ja niiden suuruuksista ole tarkkaa tietoa. Tästä johtuen kalliokärjen käyttäytymistä vinon kallion lyöntitilanteessa olisi syytä tutkia lisää. Tutkimuksen avulla saataisiin selvitettyä kalliokärkeen

lyöntitilanteessa muodostuvat todelliset rasitukset, tarkennettua kalliokärjen laatuvaatimuksia ja kehittää kalliokärkeä tuotteena.

Kalliokärjen ainoana laadunvarmistusmenetelmänä olisi mahdollista käyttää lyöntikoetta vinoon kalliopintaan. Tällöin kalliokärjen lyönti-, taivutus-, ja leikkauskestävyys saataisiin varmistettua yhdellä kokeella. Koejärjestely vastaisi paremmin todellista paalutustilannetta, koska paaluun ja kalliokärkeen kohdistuvat suurimmat taivutusrasitukset lyöntivaiheessa. Paalun kestäessä lyöntikokeet vinoon kallioon se hyvin todennäköisesti kestää asennuksen jälkeen tulevat taivutusmomentit. Tutkimuksessa tulee kiinnittää huomiota myös laadunvarmistusmenetelmän taloudellisuuteen.

## LÄHTEET

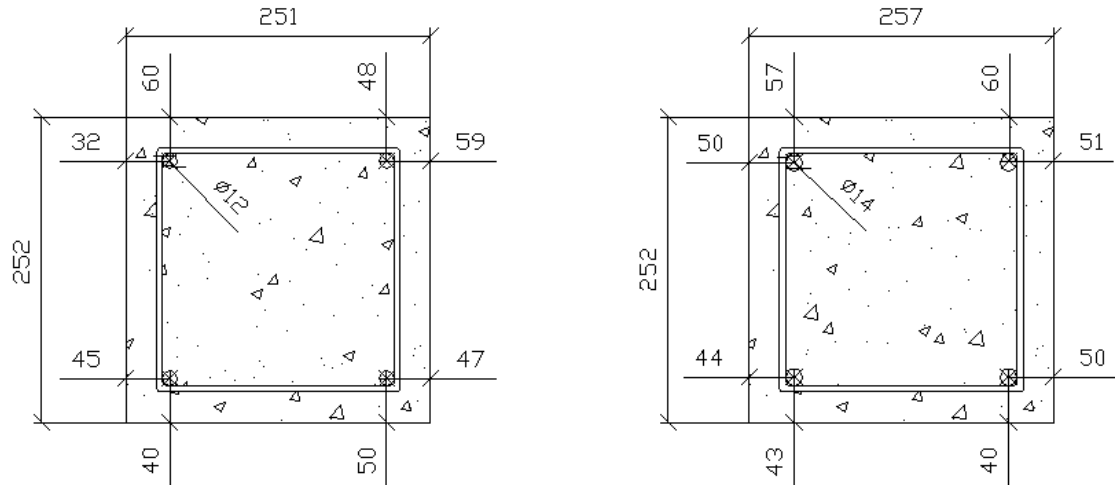
- [1] RIL 254-2011, Paalutusohje 2011, PO-2011, Saarijärven Offset, 2011, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry, 261 s. (s.161- 165)
- [2] Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry, Lyöntipaalutusohjeet (1972) LPO-72, TKY/Otapaino, Otaniemi, 1973, 37-40 s.
- [3] Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry, Lyöntipaalutusohjeet 1979, LPO-79, Helsinki, 1979, 91 s.
- [4] Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry, LPO-87 Lyöntipaalutusohjeet, Rakentajain Kustannus Oy, Helsinki, 1987, 135 s.
- [5] RIL 223-2005, Lyöntipaalutusohje LPO-2005, Teräbetoni ja puupaalut. Hakapaino Oy, 2006, 3. painos, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry, 134 s.
- [6] SS 811196, Betongvaror – Bergskor av stål för fastgjutning i kvadratiska betongpålar – Fördringar, SIS – Standardiserings kommissionen i Sverige, 1992, 8 s.
- [7] SS 811192, Betongvaror – Bergskodubbar för betongpålar – Fördringar, SIS – Standardiserings kommissionen i Sverige, 1992, 3 s.
- [8] Peleveiledningen 2012, Den Norske Pelekomité, Norsk Geoteknisk Forening, 2012, 314 s.
- [9] Tvedt, G., Tefera, T., Norwegian Public Roads Administration, 2011, Standardized pile shoes on steel pipe piles, Report number No.34E, 108 s. [WWW]. [Viitattu 7.2.2013]. Saatavissa: [http://www.vegvesen.no/Fag/Publikasjoner/Publikasjoner/VD+rapport/\\_attachm ent/316582?\\_ts=135f69f3f30](http://www.vegvesen.no/Fag/Publikasjoner/Publikasjoner/VD+rapport/_attachm ent/316582?_ts=135f69f3f30)
- [10] Jokiniemi, H., Teräsputkipaalujen kalliokärjet, Diplomityö, Tampere 1992, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 138 s.
- [11] H. Green, Impact strength of concrete, Proc. Inst. Civ. Engrs., 29, pp. 383-396, London, July 1964.
- [12] J.R. Clifton, L.I. Knab, Impact testing of concrete, Cement and Concrete Research, 13, No. 4 pp. 541-8, 1983.

- [13] TTY, Tampereen teknillinen yliopisto, Geotekniikan laitos, PDA-mittauksen suoritus ja tulkinta, Julkaisu 23, Tampere 1993, 44 s.
- [14] SFS-EN 12794 + A1 + AC, Betonivalmisisat. Perustuspaalut = Precast concrete products. Foundation piles. Helsinki 2007, Suomenstandardisoimisliitto SFS, 43 s.
- [15] J.A.T. Ruigrok, Laterally Loaded Piles, Models and Measurements, Master thesis, Delft, 2010, TU Delft, 360 s.
- [16] Rakennusteollisuus RT, Tuotelehti, PO-2011 mukaiseen paalutustyöhön, RT-2011, 24 s.
- [17] Lindberg, R., Kerokoski, O., Teräsbetonirakenteet, Luentomoniste syksy 2010, 294 s.
- [18] Rakennusteollisuus RT, Teräsbetonisten lyöntipaalujen valmistuspiirustus PO-2011 mukaiseen paalutustyöhön, 2011, 7 s.

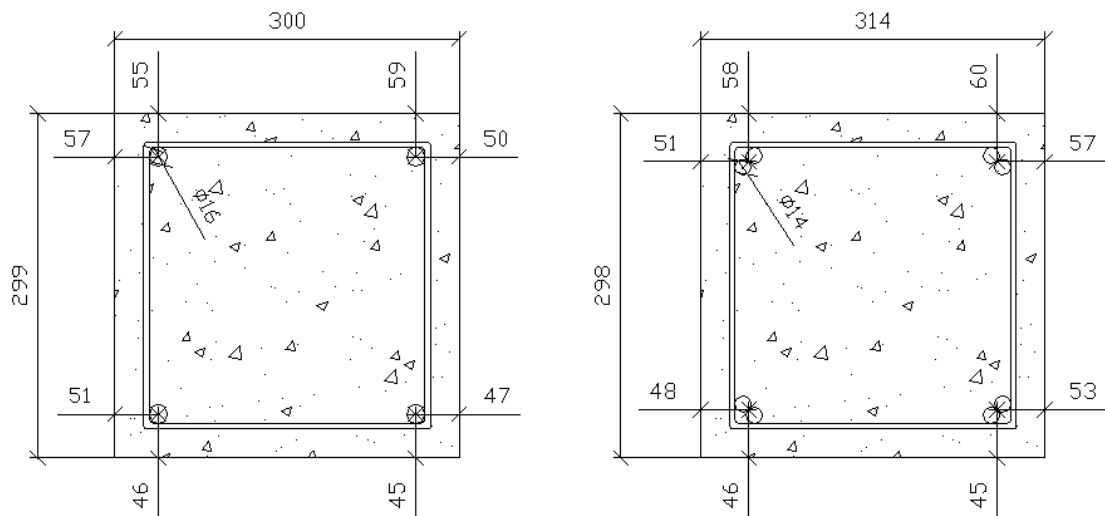
# LIITTEET

## Liite I

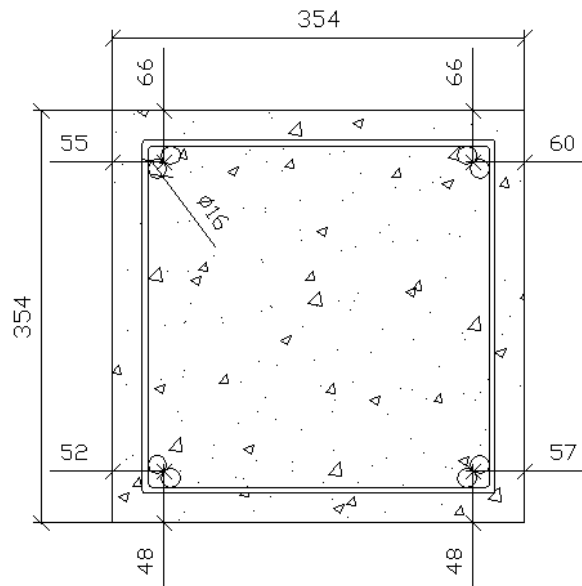
### Toteutuneet poikkileikkaukset ja betonin peitepaksuudet



*Kuva LI.1 Paalujen 250a ja 250b toteutuneet poikkileikkausmitat ja peitepaksuudet.*



*Kuva LI.2 Paalujen 300b ja 300c toteutuneet poikkileikkausmitat ja peitepaksuudet*



*Kuva L1.3 Paalun 350a toteutuneet poikkileikkausmitat ja peitepaksuudet*



## Liite II

### Paalujen taivutuskoejärjestelyt, halkeamatarkastelut ja murtotavat

#### Paalu 250a

Kuvassa L2.1 on esitetty kuormitusjärjestelyt. Paalun 250a kuormitusnopeutena käytettiin 4 kN/min ja kuormitusportaiden suuruus oli 8 kN. Kuormitus pidettiin vakiona jokaisessa kuormitusportaassa 3-5 minuuttia. Toisen portaan jälkeen kuorma poistettiin ja kuormitus aloitettiin alusta.



*Kuva L2.1 Taivutuskoejärjestelyt ja paalun halkeamat juuri ennen murtoa*



*Kuva L2.2 Paalun 250a murtumistapa oli taivutusmurto*

Paalun ankkurointiterästen päätyminen ja poikkimenneet pääteräkset voidaan havaita kuvasta L2.3.



*Kuva L2.3 Paalun pääteräkset ovat menneet poikki kalliokärjen ankkurointiterästen loppumiskohdassa.*

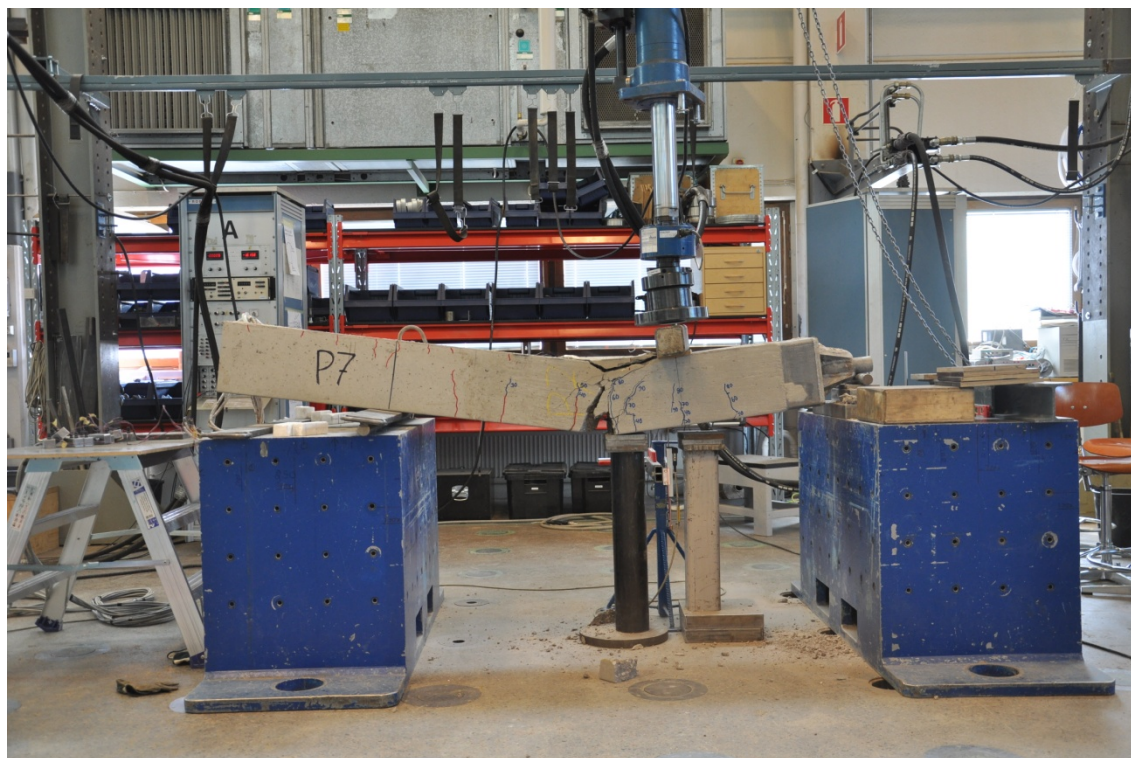


## Paalu 250b

Kuvassa L2.4 on esitetty kuormitusjärjestelyt. Paalun 250b kuormitusnopeutena käytettiin 4 kN/min ja kuormitusportaiden suuruus oli 8 kN. Kuormitus pidettiin vakiona jokaisessa kuormitusportaassa 3-5 minuuttia. Toisen portaan jälkeen kuorma poistettiin ja kuormitus aloitettiin alusta.



*Kuva L2.4 Koejärjestelyt ja koekappaleen halkeamat*



*Kuva L2.5 Koekappaleen murtumistapa oli taivutusmurto*





*Kuva L2.6 Poikki menneet pääteräket kalliokärjen tartuntaterästen päättymiskohdassa*

### **Paalu 300b**

Kuvassa L2.7 on esitetty kuormitusjärjestelyt. Paalun 300b kuormitusnopeutena käytettiin 4 kN/min tunkkia kohden ja kuormitusportaiden suuruus oli 16 kN. Kuormitus pidettiin vakiona jokaisessa kuormitusportaassa 3-5 minuuttia. Toisen portaan jälkeen kuorma poistettiin ja kuormitus aloitettiin alusta.



*Kuva L2.7 Koejärjestelyt ja betonin halkeamat*





*Kuva L2.8 Paalun 300b murtumistapa oli yhdistetty taivutusleikkausmurto*

### **Paalu 300c**

Kuvassa L2.9 on esitetty kuormitusjärjestelyt. Paalun 300c kuormitusnopeutena käytettiin 5 kN/min tunkkia kohden ja kuormitusportaiden suuruus oli 20 kN. Kuormitus pidettiin vakiona jokaisessa kuormitusportaassa 3-5 minuuttia. Toisen portaan jälkeen kuorma poistettiin ja kuormitus aloitettiin alusta.



*Kuva L2.9 Koejärjestelyt ja betonin halkeamat kuormituksessa*





*Kuva L2.10 Paalun 300c murtumistapana oli paalun varren yhdistetty taipuma-leikkausmurto*

### **Paalu 350a**

Kuvassa L2.11 on esitetty kuormitusjärjestelyt. Paalun 350a kuormitusnopeutena käytettiin 8 kN/min tunkkia kohden ja kuormitusportaiden suuruus oli 30 kN. Kuormitus pidettiin vakiona jokaisessa kuormitusportaassa 3-5 minuuttia. Toisen portaan jälkeen kuorma poistettiin ja kuormitus aloitettiin alusta.



*Kuva L2.11 Koejärjestelyt ja paalun 350a halkeamat*





*Kuva L2.12 Paalun 350a murtumistapa oli paalun varren leikkausmurto*



*Kuva L2.13 Paalun haat ovat menneet poikki murren yhteydessä*



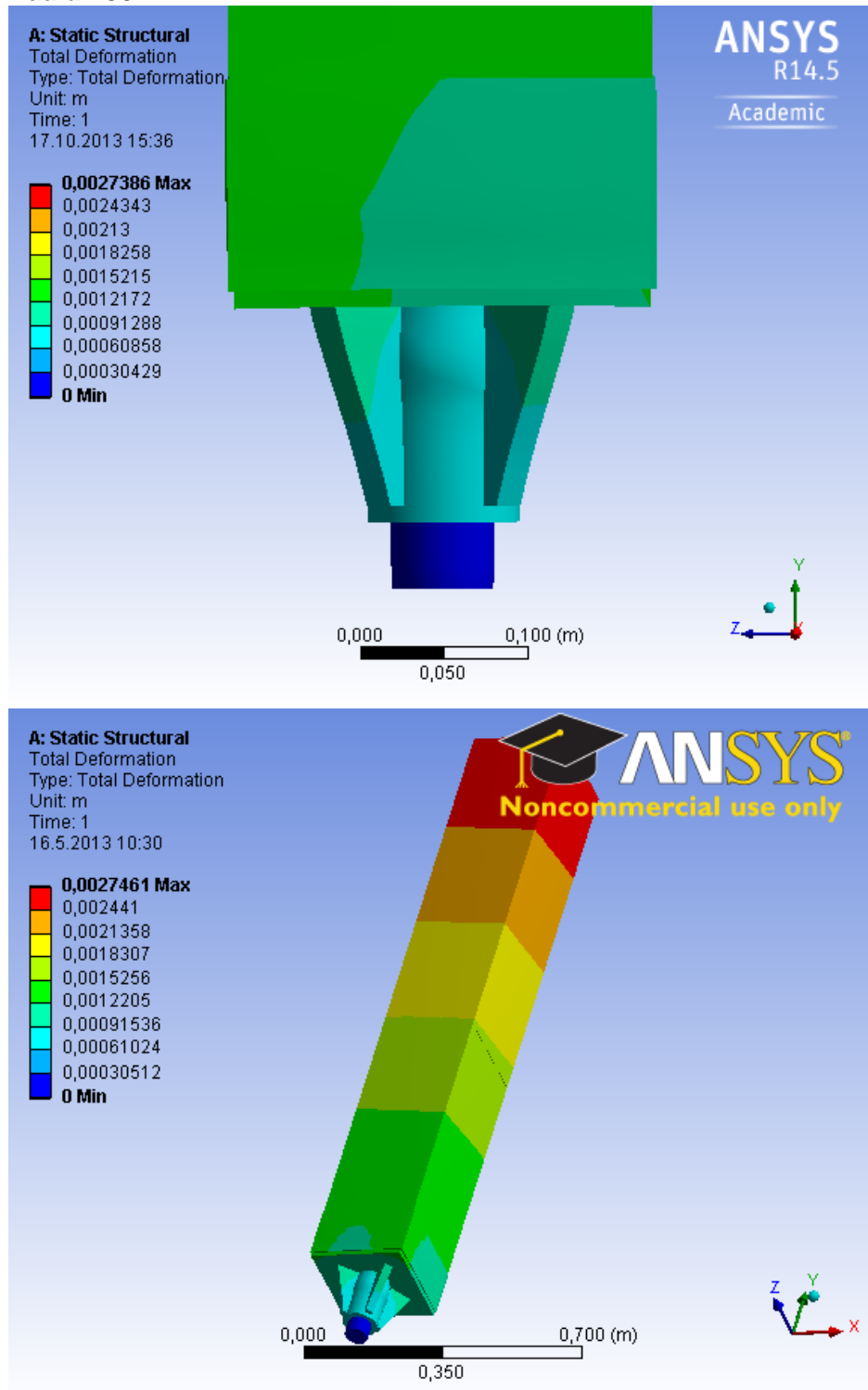
*Kuva L2.14 Yhteiskuva taivutuskuormitetuista paaluista.*



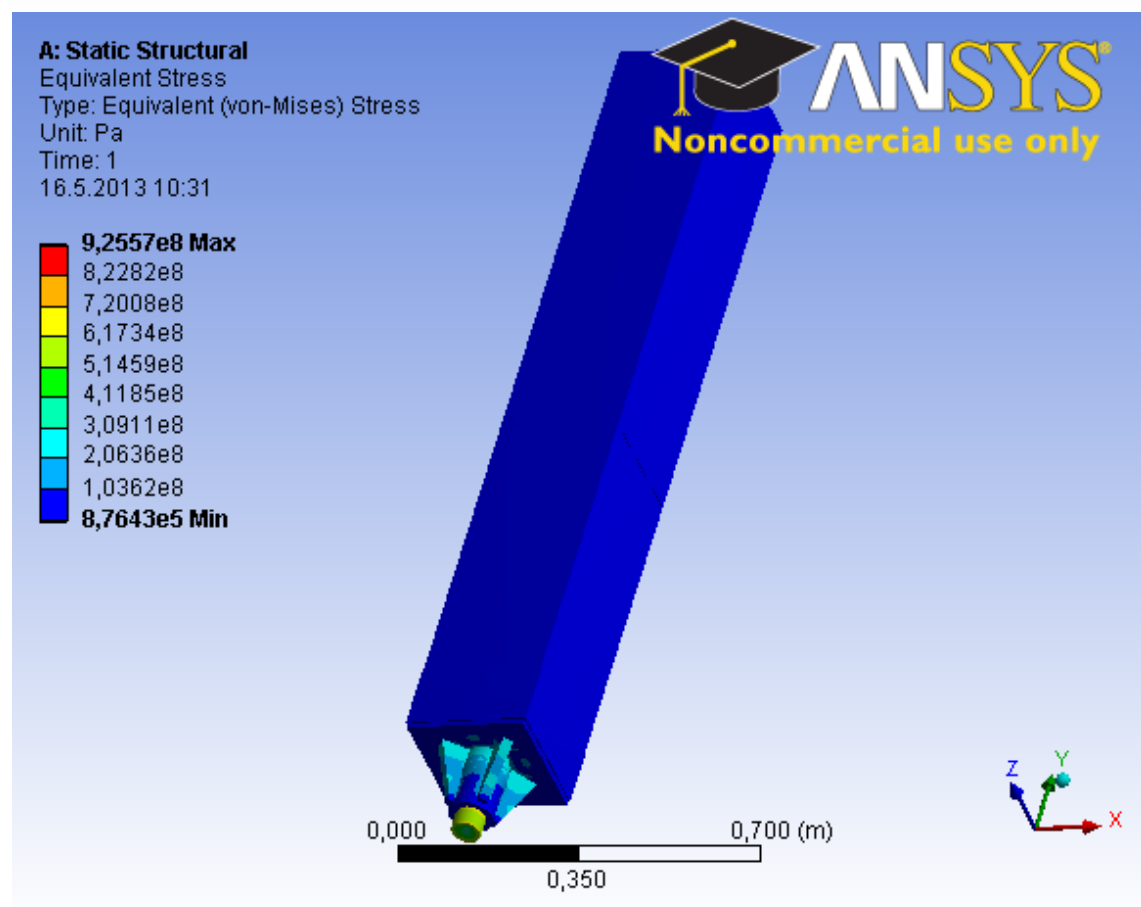
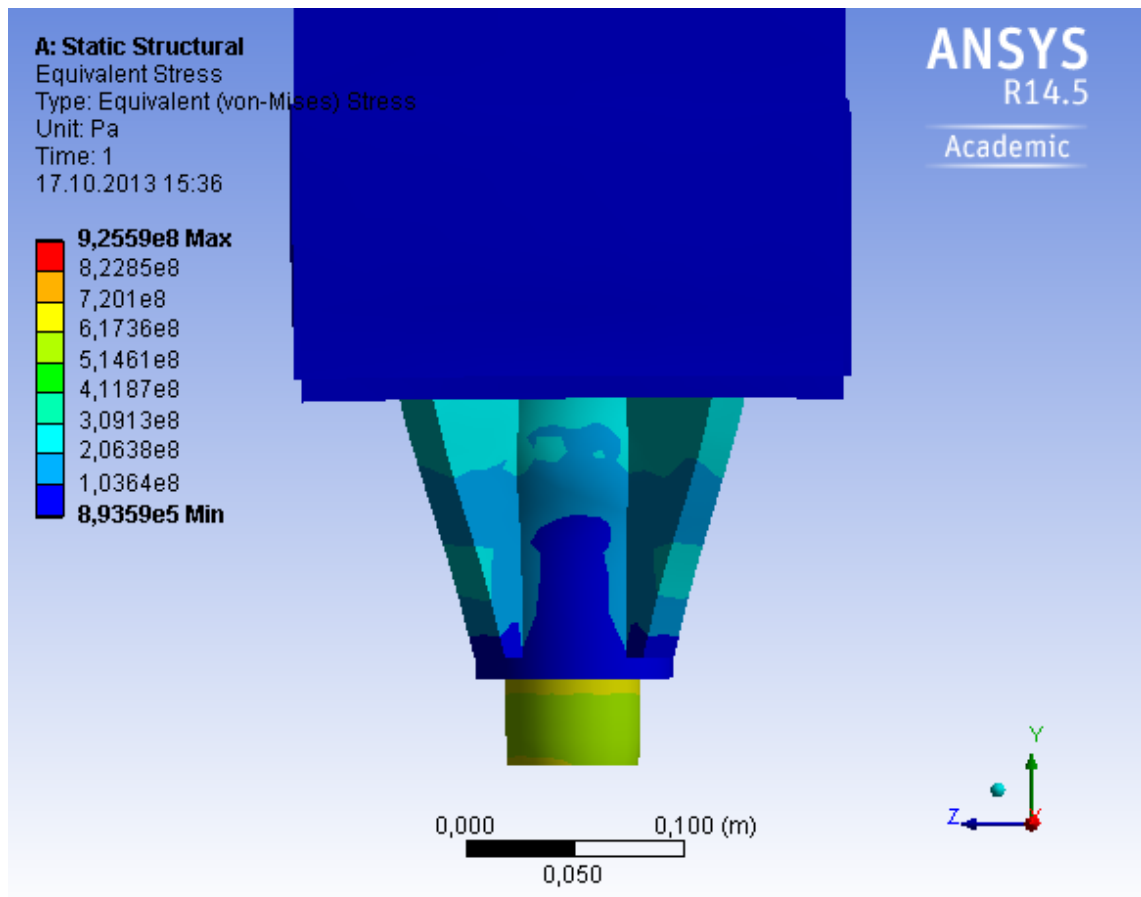
## Liite III

### Malli paalun muodonmuutoksista, jännityksistä ja plastisoitumisesta

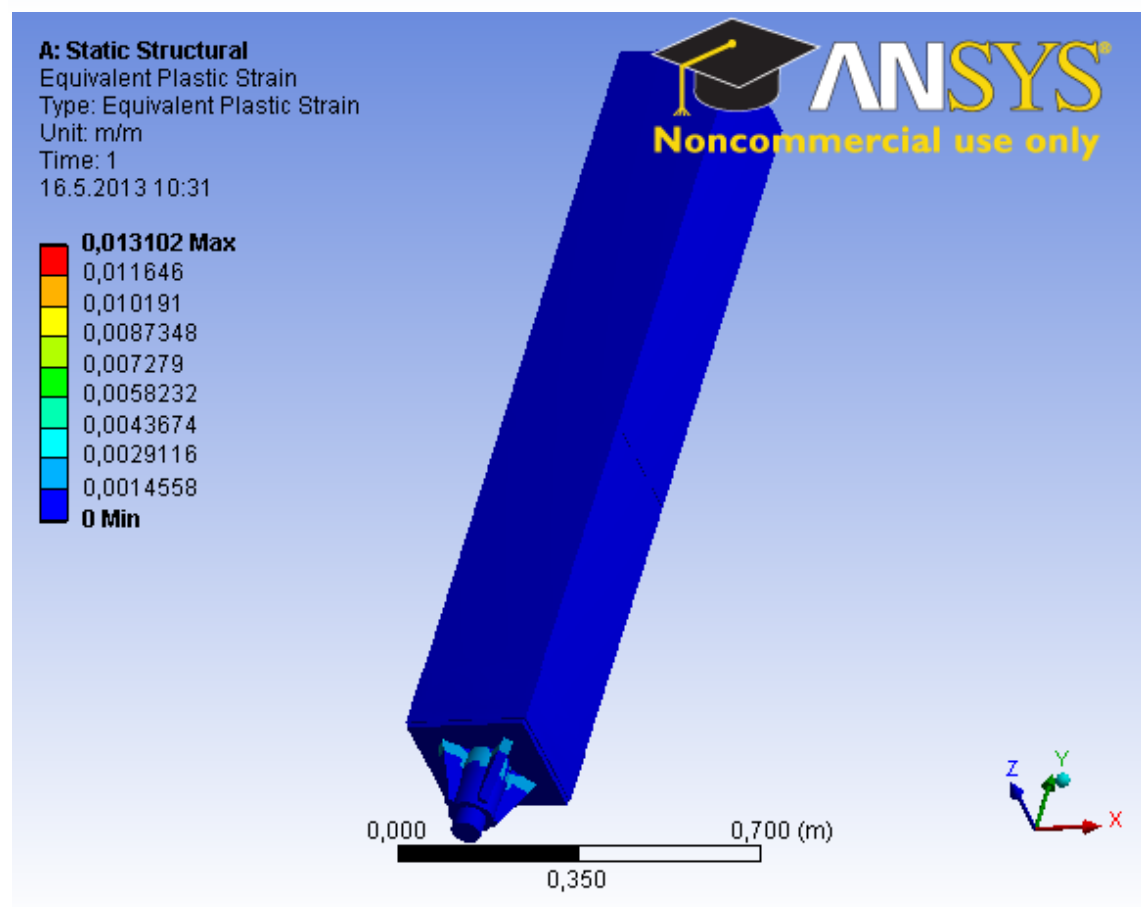
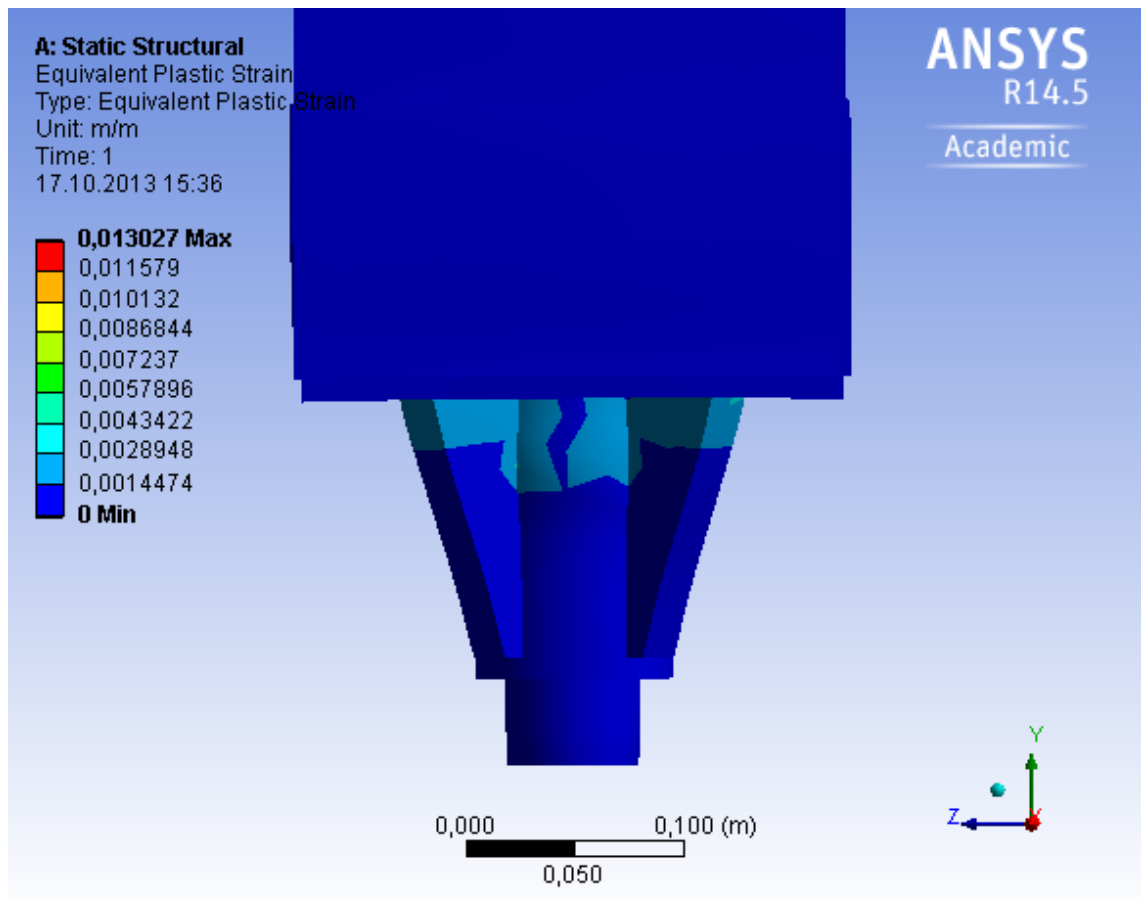
#### Paalu 250



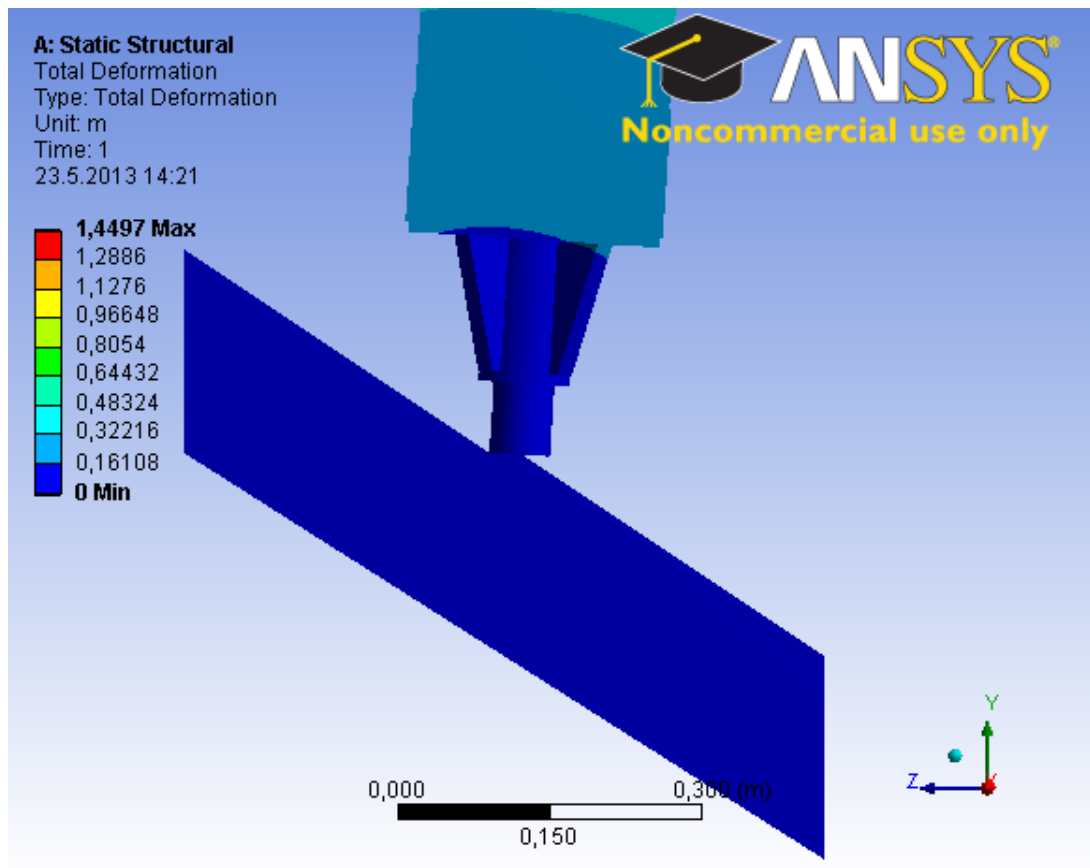
*Kuva L3.1 Paaluun 250x250 syntyvät muodonmuutokset, kun paalua lyödään tasaiseen kallioon jännityksellä 28 MPa.*



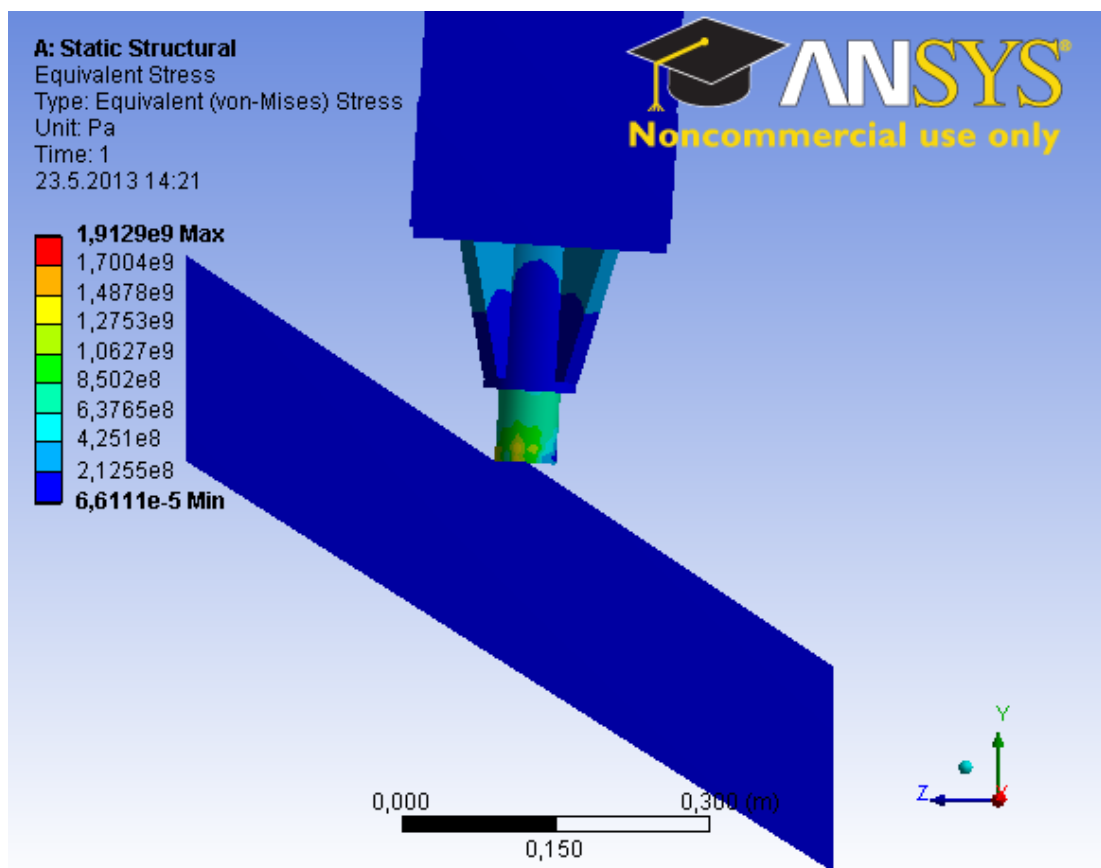
*Kuva L3.2 Paaluun 250x250 syntyvät jännitykset, kun paalua lyödään tasaiseen kallioon jännityksellä 28 MPa.*



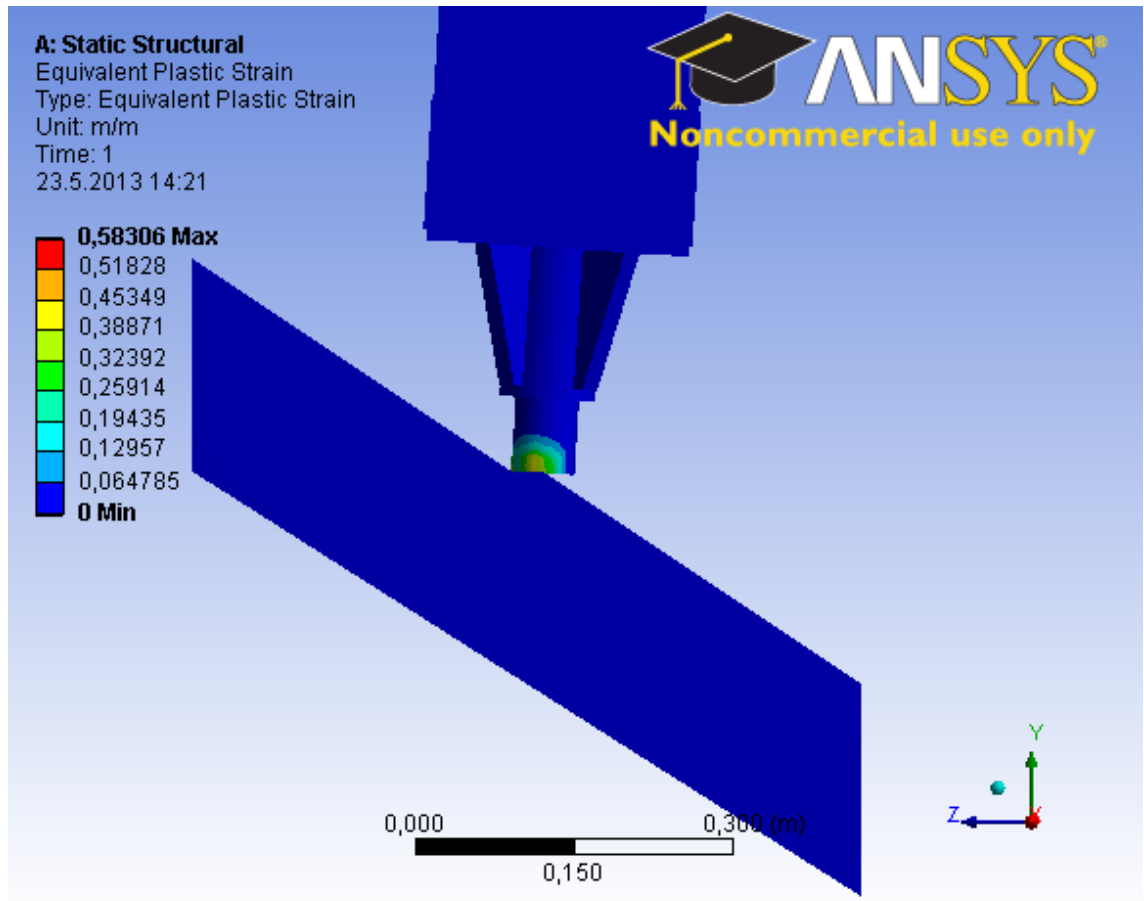
*Kuva L3.3 Paalun 250x250 plastisoituminen, kun paalua lyödään tasaiseen kallioon jännityksellä 28 MPa.*



*Kuva L3.4 Paaluun 250x250 syntyvät muodonmuutokset, kun paalua lyödään vinoon kallioon jännityksellä 28 MPa.*

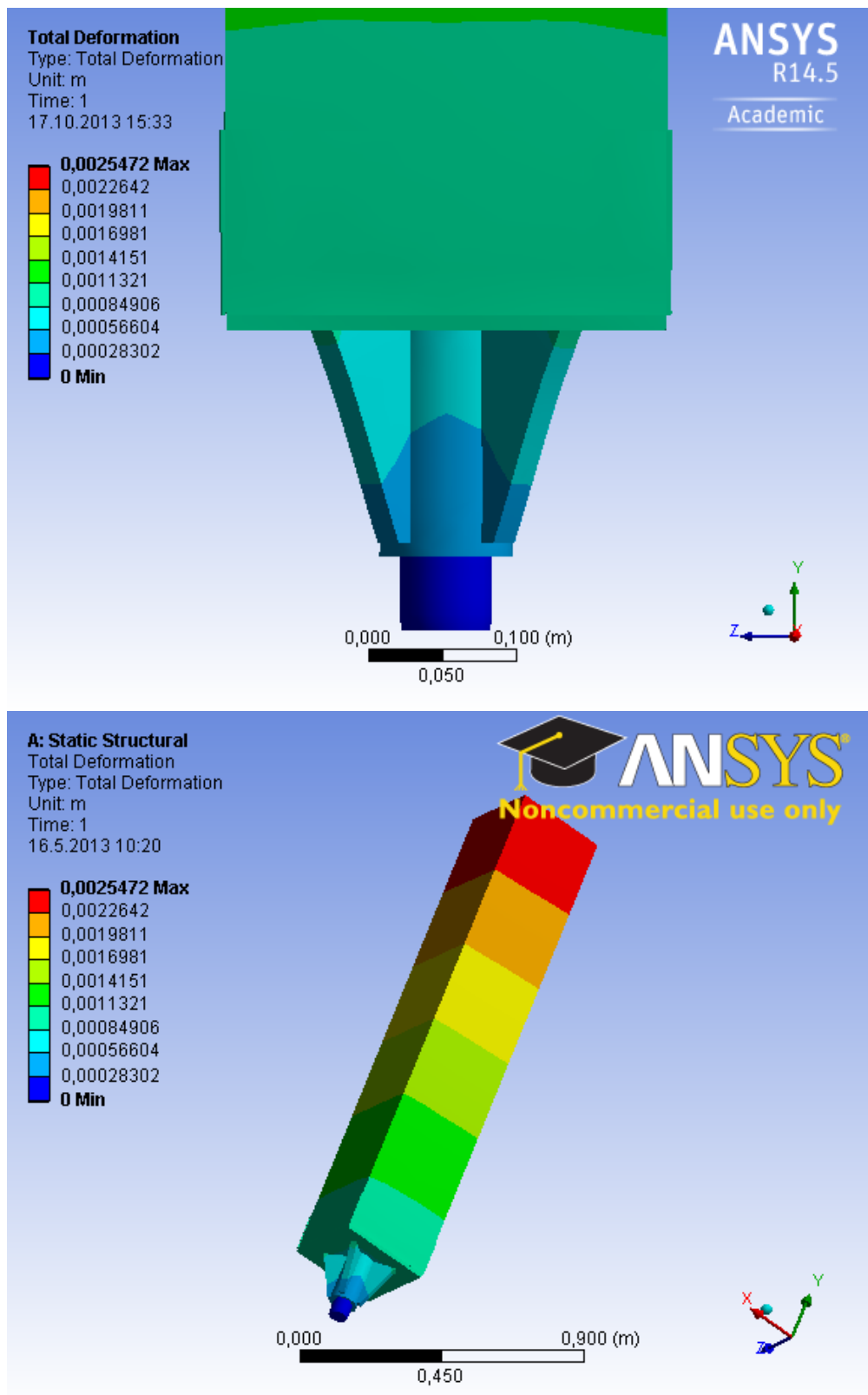


*Kuva L3.5 Paaluun 250x250 syntyvät jännitykset, kun paalua lyödään vinoon kallioon jännityksellä 28 MPa.*

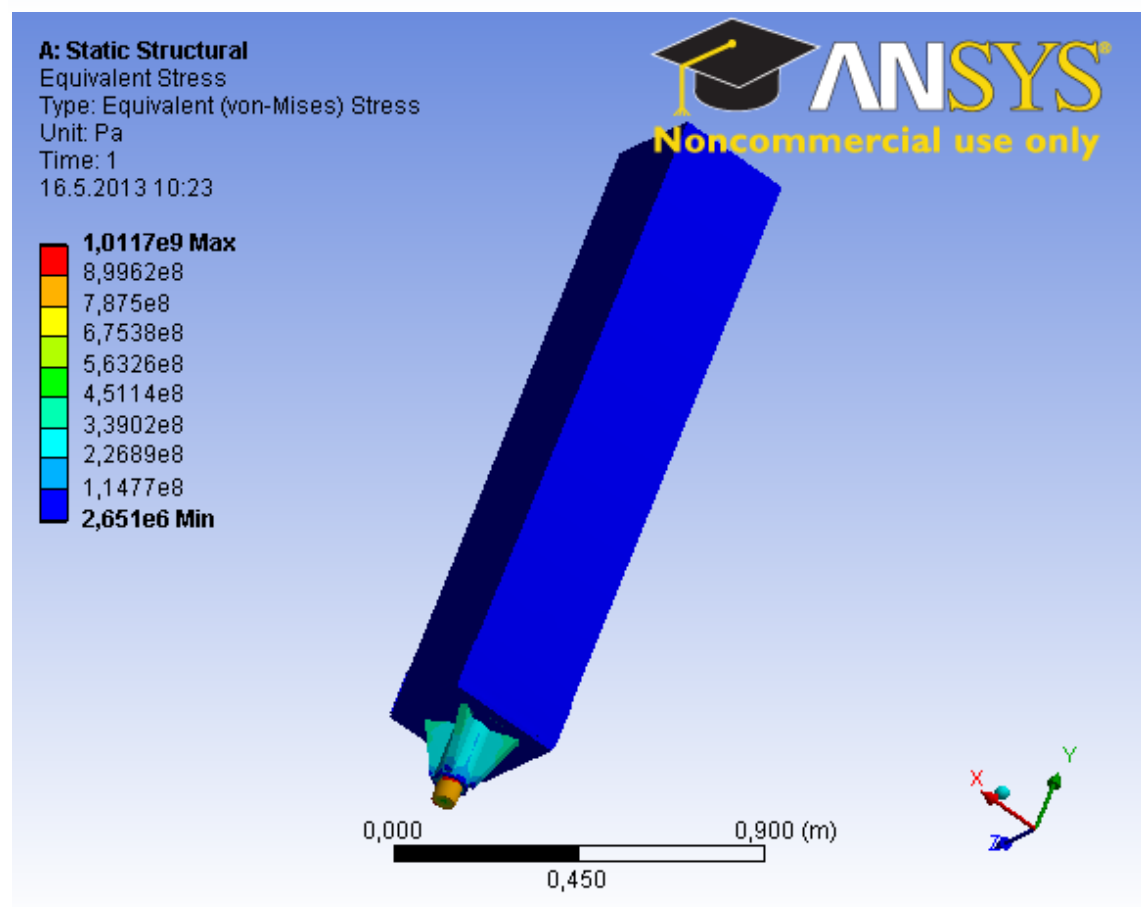
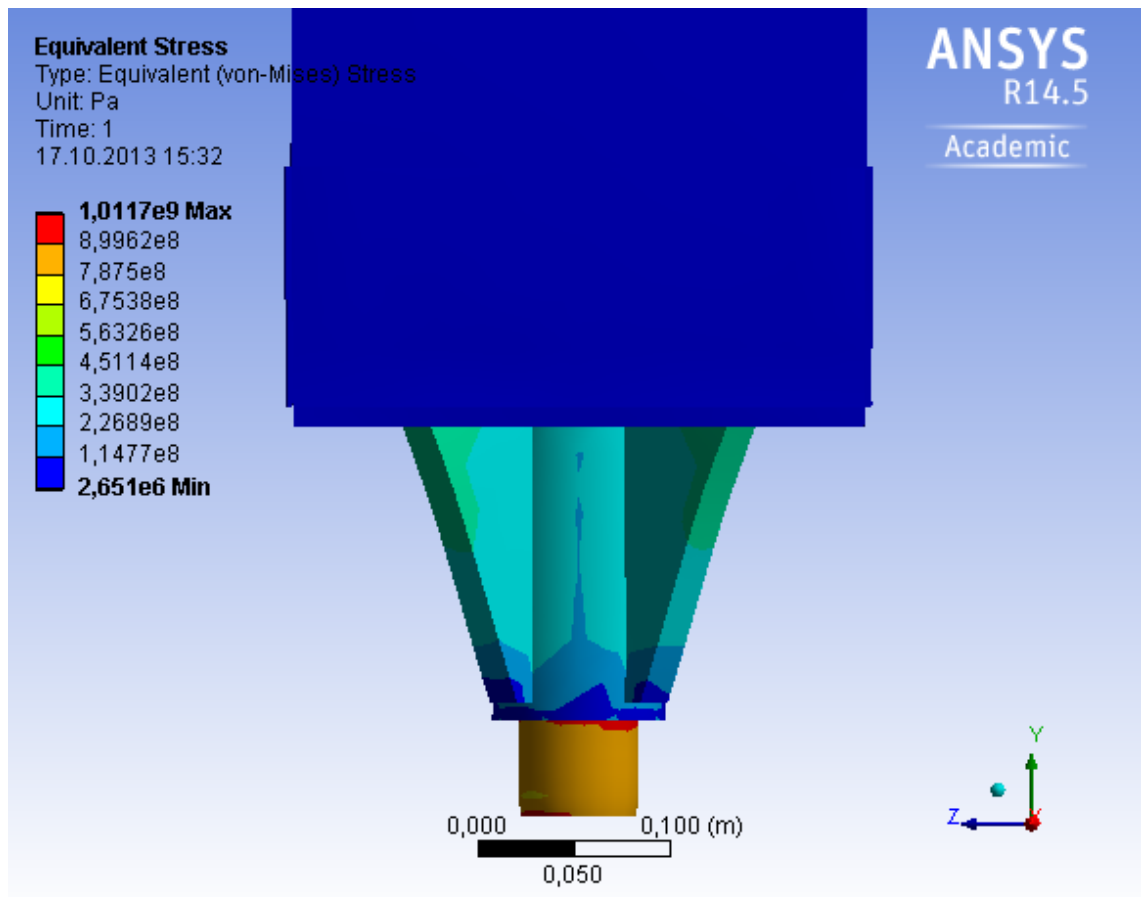


*Kuva L3.6 Paalun 250x250 plastisoituminen, kun paalua lyödään vinoon kallioon jännityksellä 28 MPa.*

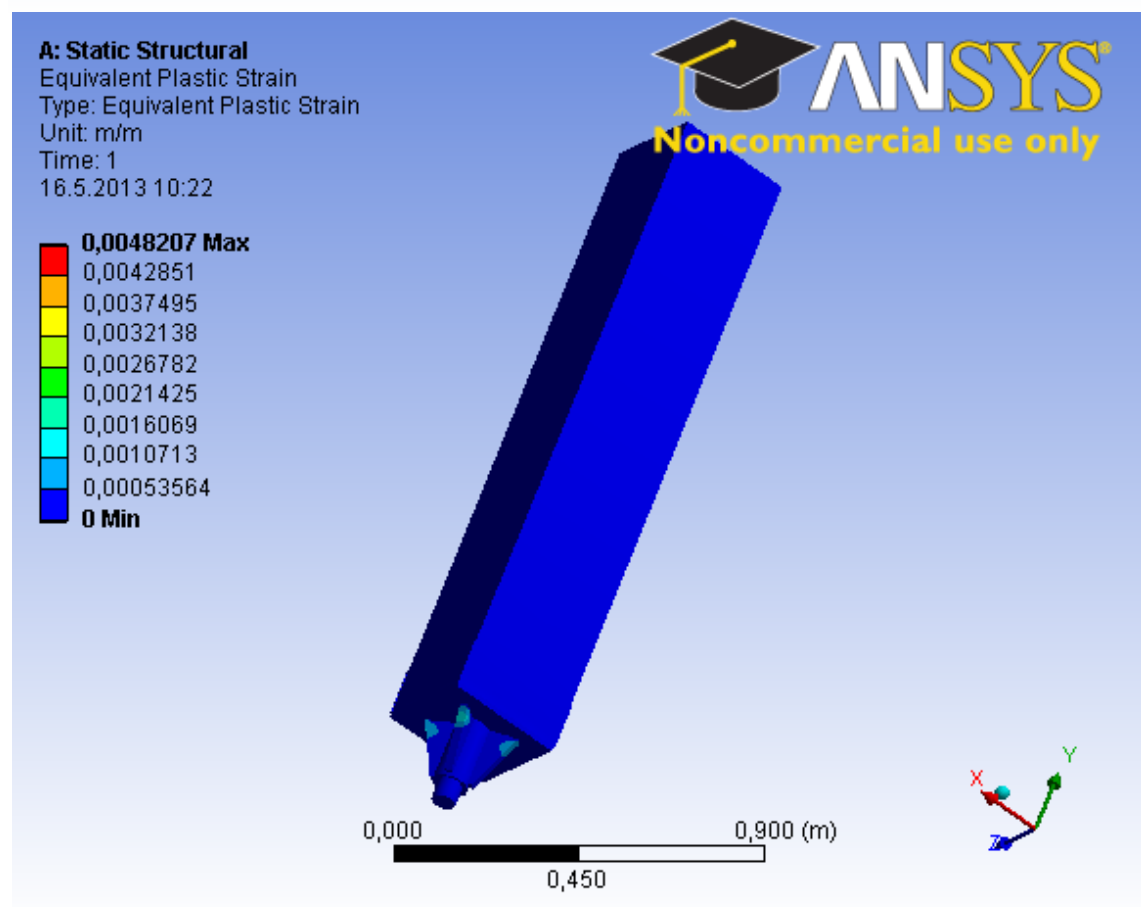
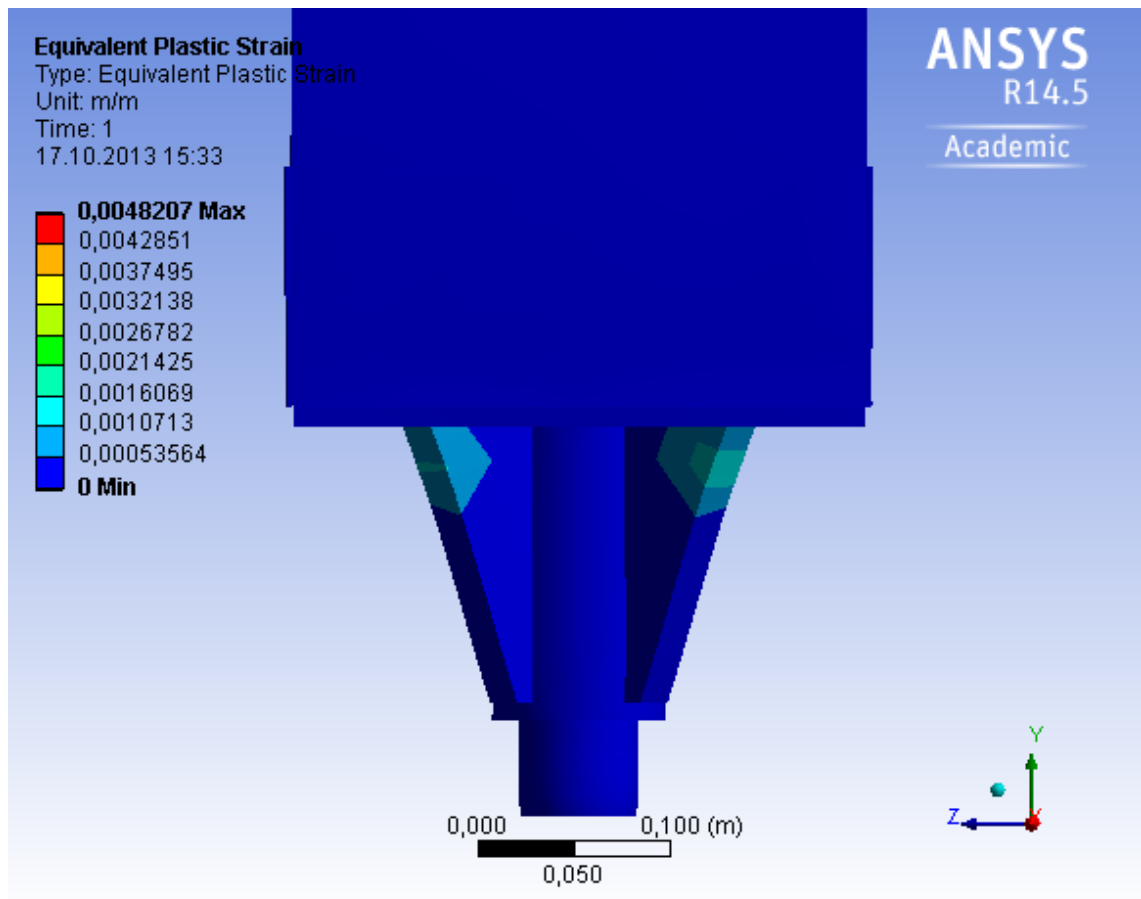
## Paalu 300



*Kuva L3.7 Paaluun 300x300 syntyvät muodonmuutokset, kun paalua lyödään tasaiseen kallioon jännityksellä 28 MPa.*



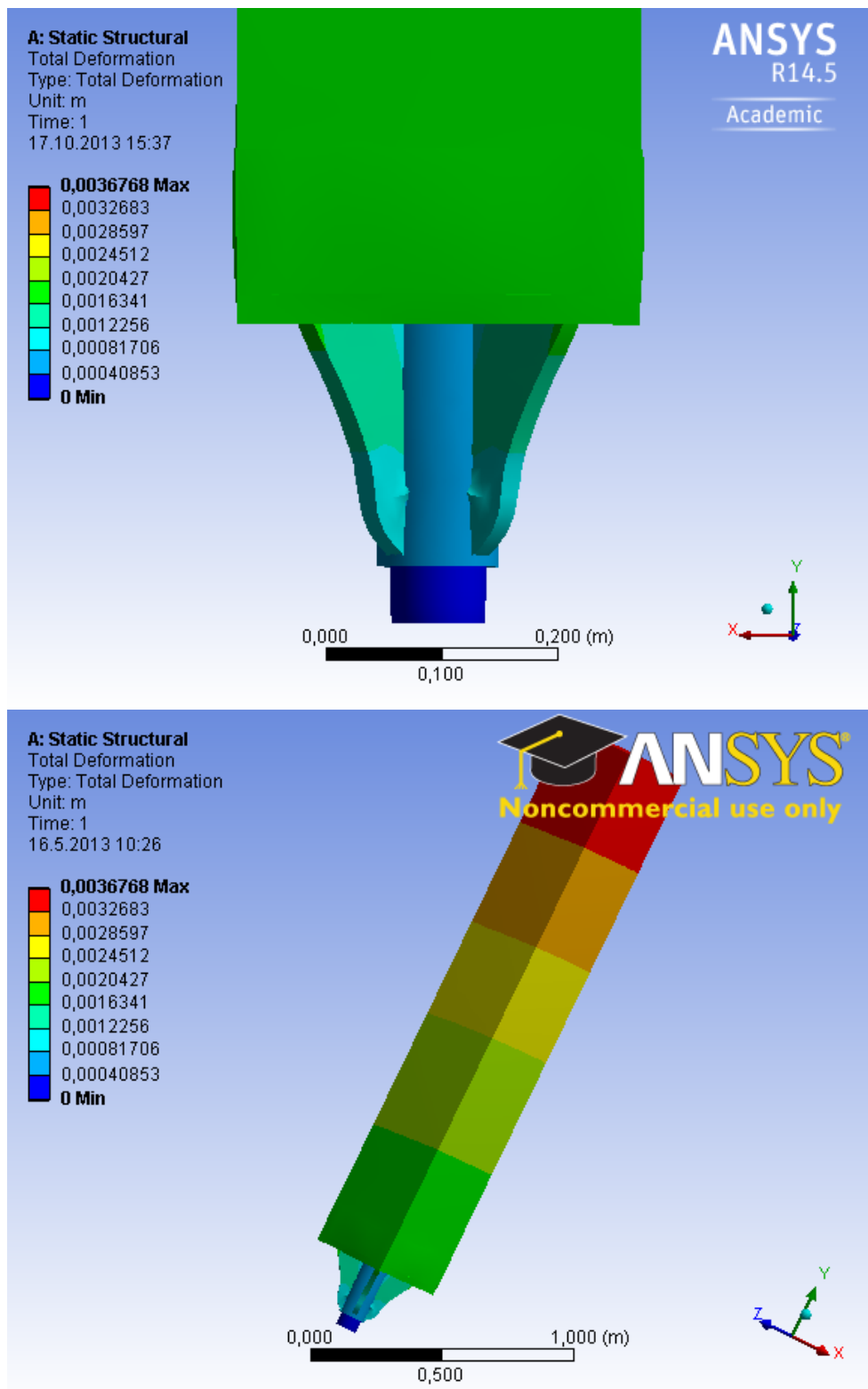
*Kuva L3.8 Paaluun 300x300 syntyvät jännitykset, kun paalua lyödään tasaiseen kallioon jännityksellä 28 MPa.*



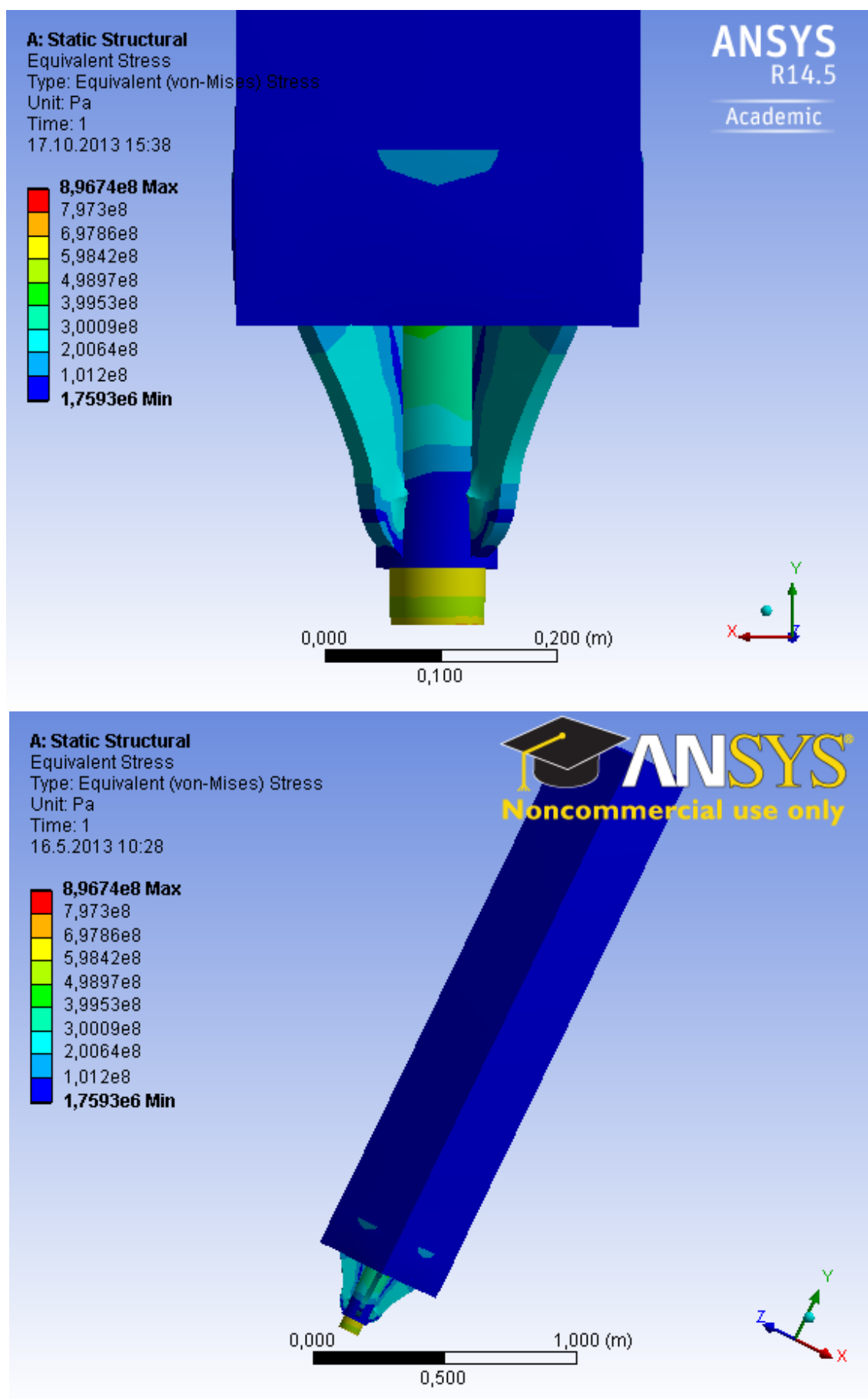
*Kuva L3.9 Paalun 300x300 plastisoituminen, kun paalua lyödään tasaiseen kallioon jännityksellä 28 MPa.*



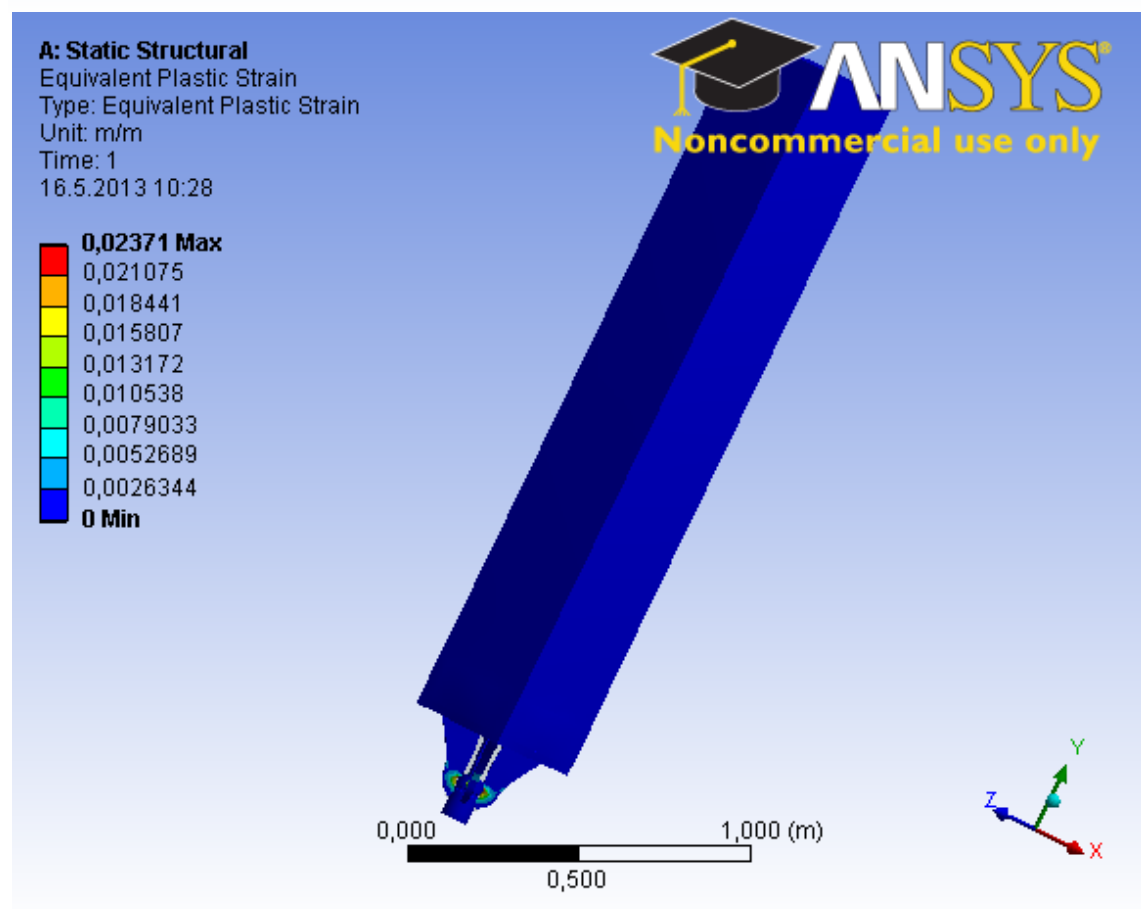
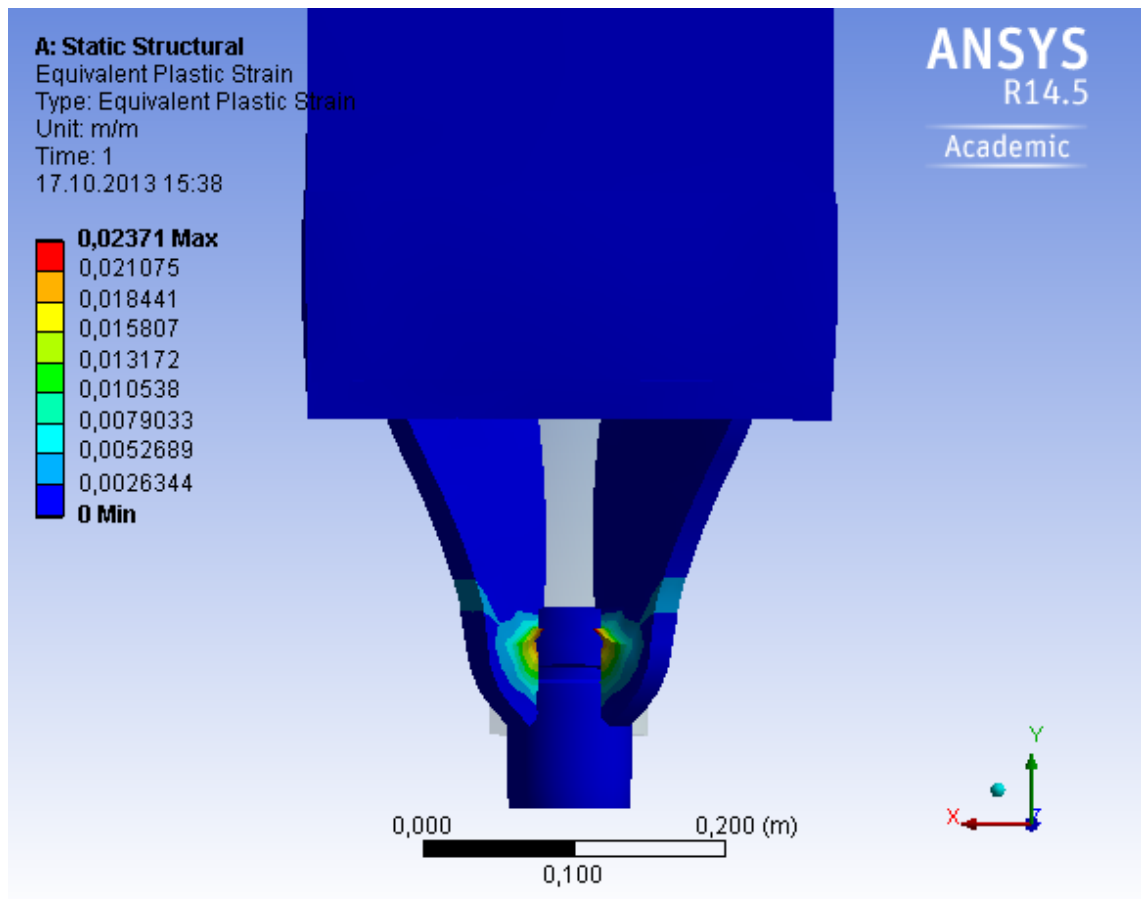
## Paalu 350



*Kuva L3.10 Paaluun 350x350 syntyvät muodonmuutokset, kun paalua lyödään tasaiseen kallioon jännityksellä 28 MPa.*



*Kuva L3.11 Paaluun 350x350 syntyvät jännitykset, kun paalua lyödään tasaiseen kallioon jännityksellä 28 MPa.*



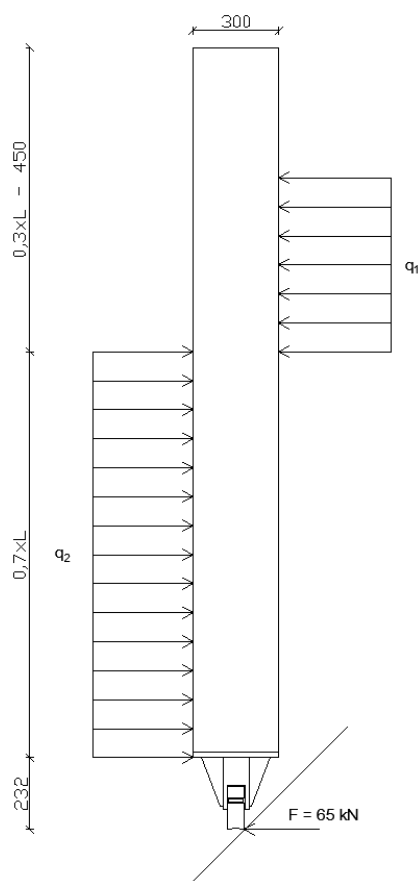
*Kuva L3.12 Paalun 350x350 plastisoituminen, kun paalua lyödään tasaiseen kallioon jännityksellä 28 MPa.*

## Liite IV

### Esimerkkilasku paaluun kohdistuvista rasituksista paalun kärjen liukuessa vinolla kalliopinnalla.

#### Paalu 300 mm x 300 mm

Alla on laskettu esimerkkilasku siitä, miten voimat ovat jakautuneet paaluun, kun sitä lyödään vinoon kallioon. Esimerkkilaskussa ei yksinkertaistuksen vuoksi ole huomioitu lyönnin epäkeskisyyden aiheuttamaa taivutusmomenttia. Kalliokärkeen kohdistuu 65 kN suuruinen vaakavoima, joka on LPO-2005:n mukainen leikkauskestävyysvaatimus 300 x 300 mm<sup>2</sup> paalulle. Paalun pituudeksi on valittu 10 metriä ja halkaisijaksi 300 mm. Esimerkkilaskussa paalua lyödään homogeeniseen hienorakeiseen maahan, jolloin kiertokeskuksen paikka on 30 % asennussyvyydestä, kun paalun sivukuormitus kohdistuu kalliojärkeen.



Lähtöarvot:

Paalun pituus  $L = 10\text{ m}$

Vaakakuorma  $F = 65\text{ kN}$

Paalun halkaisija  $d = 300\text{ mm}$

Kalliokärjen pituus  $c = 232\text{ mm}$

Paalun yläpäähän ei kohdistu sivuvastusta matkalla  $1,5d = 450\text{ mm}$ , joten pituus kuorma  $q_1$  vaikuttaa paaluun pituudella:

$$a = 0,3L - 1,5d = 2550\text{ mm} \quad (\text{L4.1})$$

Kuorma  $q_2$  vaikuttaa paalun pituudella :

$$b = 0,7L = 7000\text{ mm} \quad (\text{L4.2})$$

Kalliokärjen pituus  $c = 232\text{ mm}$

Kokonaispituus

$$L_{\text{kok}} = L + c = 10,232\text{ m} \quad (\text{L4.3})$$

Kuva L4.1 Esimerkkilaskun alkutilanne

Tasapainoehdoista saadaan yhtälöt:

$$q_1 a - q_2 b + F = 0 \quad (\text{Vaakakuormien tasapainosta}) \quad (\text{L4.4})$$

$$q_1 a \cdot \left(\frac{a}{2} + b + c\right) - q_2 b \cdot \left(\frac{b}{2} + c\right) = 0 \quad (\text{Momentti paalun alapäässä}) \quad (\text{L4.5})$$

Ratkaistaan momentinyhtälöstä  $q_1$ :

$$q_1 = \frac{q_2 b \cdot \left(\frac{b}{2+c}\right)}{a \cdot \left(\frac{a}{2} + b + c\right)}$$

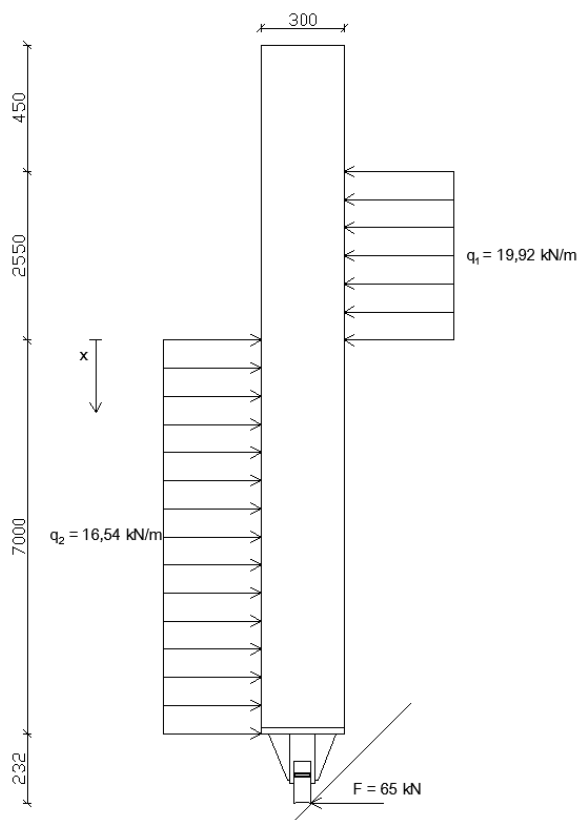
Sijoitetaan  $q_1$  vaakakuormien tasapainoehtoon ja ratkaistaan  $q_2$ :

$$q_1 = \frac{q_2 b \cdot \left(\frac{b}{2+c}\right)}{a \cdot \left(\frac{a}{2} + b + c\right)} \cdot a - q_2 b + F = 0$$

$$q_2 = \frac{Fa + 2Fb + 2Fc}{b^2 + ab} = 16,54 \frac{kN}{m}$$

Ratkaistaan  $q_1$ :

$$q_1 = \frac{q_2 b - F}{a} = 19,92 \frac{kN}{m}$$



Paaluun vaikuttavat voimat:

$$q_1 = 19,92 \frac{kN}{m}$$

$$q_2 = 16,54 \frac{kN}{m}$$

$$F = 65 kN$$

**Kuva LA.2** Esimerkkilaskun mitat ja voimat, joiden avulla määritetään taivutusmomentti- ja leikkausvoimakuviot

Lasketaan leikkausvoimat ja taivutusmomentin maksimi:

Leikkausvoima kuormien  $q_1$  ja  $q_2$  välissä:

$$Q_1 = -q_1 a = -50,80 \text{ kN} \quad (\text{L4.10})$$

Leikkausvoima paalun päässä:

$$Q_2 = F = 65 \text{ kN} \quad (\text{L4.11})$$

Taivutusmomentin maksimikohta on leikkausvoiman nollakohdassa, joten lasketaan leikkausvoiman nollakohdan sijainti:

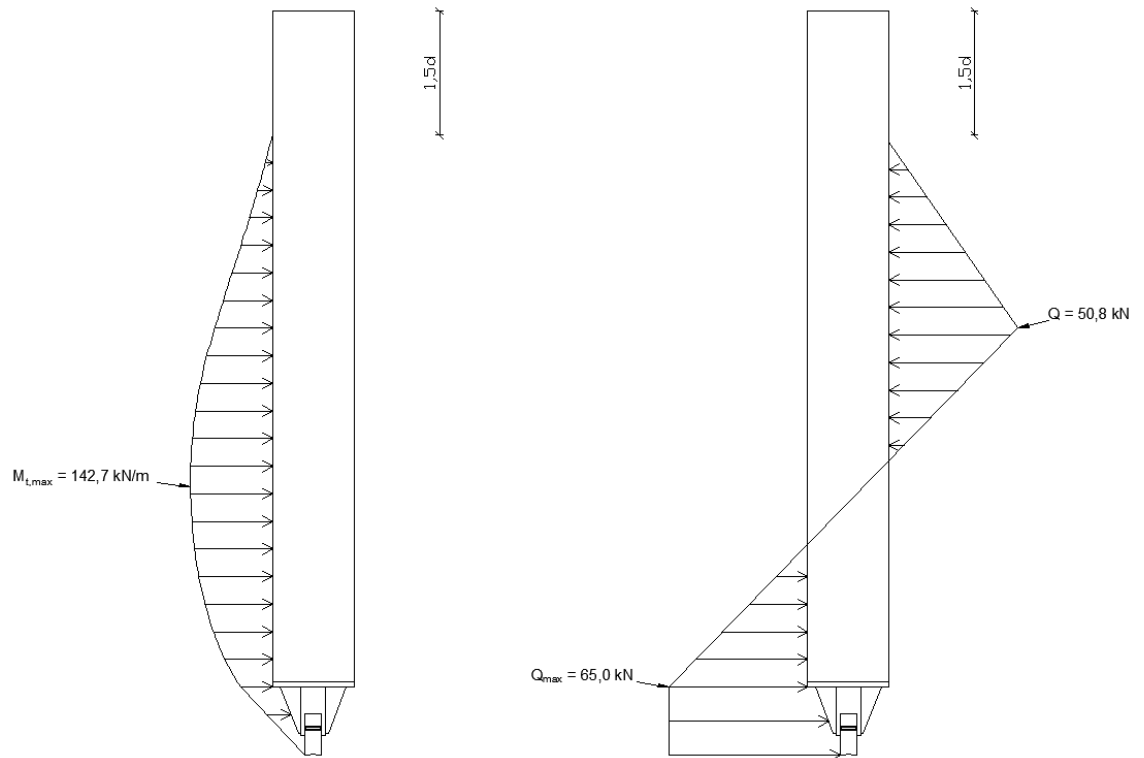
$$-q_1 a + q_2 x = 0 \quad (\text{L4.12})$$

Ratkaistaan yhtälöstä  $x$ :

$$x = \frac{q_1 a}{q_2} = 3,07 \text{ m}$$

Maksimimomentti on tällöin:

$$M_{max} = q_1 a \left( \frac{a}{2} + x \right) - q_2 x \cdot \frac{x}{2} = 142,78 \text{ kNm}$$



**Kuva L4.3** Vasemmalla on esimerkkilaskun mukainen taivutusmomenttikuvaaja ja oikealla leikkausvoimakuvaaja. Huomioitavaa on se, että taivutusmomenttikuvaajan arvo on todella suuri, mistä johtuen paalu todennäköisesti murtuisi varresta ennen kuin leikkausvoimavaatimus täyttyy.

## Liite V

### Esimerkkilasku paalun geoteknisen kestävyuden $R_{k;geo}$ laskennasta Paalu 300b

Esimerkkilasku geoteknisen kestävyuden laskennasta Rakennusteollisuuden tuotelehden mukaiselle paalulle 300b Paalutustyöluokassa PTL3. Laskenta on tehty Paalutusohjeen PO-2011 mukaan. [1, s. 100-104, 117-120]

Betonin puristuskestävyys:  $f_{ck} = 35MPa$

Betonipoikkileikkauksen pinta-ala:

$$A_c = 300mm \cdot 300mm = 90000mm^2 \quad (L5.1)$$

Suurin sallittu puristusrasituksen aikaansaava keskeinen lyöntivoima asennettaessa:

$$F_{c;lyönti} = 0,8 \cdot f_{ck} \cdot A_c = 2520 kN \quad (L5.2)$$

Suurin kestävyuden ominaisarvo:

$$R_{k;geo;max} \leq F_{c;lyönti} \Rightarrow R_{k;geo;max} = 2520kN \quad (L5.3)$$

Suurin mahdollinen vetolyöntivoima asennettaessa  $F_{t;lyönti}$ :

Teräksen myötölujuus:  $f_{yk} = 700 MPa$

$$\text{Terästen pinta-ala (pääteräkset 4T16): } A_s = 4 \cdot \pi \cdot r^2 = 804 mm^2 \quad (L5.4)$$

Suurin mahdollinen vetolyöntivoima asennettaessa  $F_{t;lyönti}$ :

$$F_{t;lyönti} = 0,9 \cdot f_{yk} \cdot A_s = 506,68 kN \quad (L5.5)$$

Suhteellinen teräsmäärä:

$$\rho = \frac{A_s}{A_c} = 0,89 \%$$



Redusoitu pintahitaussäde:

$$i_{red} = k_{red} \left( \frac{I}{6A} \right)^{0.5}$$

Kerroin:

$$k_{red} = 0,57 \cdot \left( \frac{f_{yk}}{500MPa} \right) \cdot \rho + 0,57 = 1,28$$

Pintahitausmomentti käyttötilassa:

$$I = \frac{bh^3}{12} = 0,000675 m^4$$

Pinta-ala käyttötilassa:

$$A = 300 mm \cdot 300 mm = 90000 mm^2 \quad (L5.10)$$

Redusoitu pintahitaussäde:

$$i_{red} = k_{red} \left( \frac{I}{6A} \right)^{0.5} = 0,045 m$$

Paalun varren momenttikestävyys:

$$M_k = 0,9 \cdot F_{c,lyönti} \cdot i_{red} = 102,89 kN \quad (L5.11)$$

Tarkistetaan poikkileikkauksen momentinkestävyden ominaisarvo [17 s.60-69]. Rakenteen on kestävä momentti taivutuskokeessa. Laskennassa käytetään lujuuksien ominaisarvoja:

$$\alpha_{cc} = 1, \quad \gamma_c = 1, \quad \gamma_s = 1$$

Lasketaan paalun 300b varren laskennallinen momentinkestävyys ( $M_k$ ).

Paalun leveys:  $b = 300 mm$

Paalun korkeus:  $h = 300 mm$

Puristuserästen etäisyys paalun puristuspinnaasta:

$$t_{sc} = 30\text{mm} + \frac{16\text{mm}}{2} + 5\text{mm} = 43\text{mm}$$

Vetoterästen etäisyys paalun alapinnasta:

$$t_{st} = 30\text{mm} + \frac{16\text{mm}}{2} + 5\text{mm} = 43\text{mm}$$

Tehollinen korkeus:

$$d = h - t_{st} = 257\text{mm}$$

Puristuserästen pinta-ala 2T16:  $A_{sc} = 2 \cdot \pi \cdot r^2 = 402,12\text{mm}^2$  (L5.14)

Vetoterästen pinta-ala 2T16:  $A_{st} = 2 \cdot \pi \cdot r^2 = 402,12\text{mm}^2$

Raudoituksen myötölujuus:  $f_{yk} = 700\text{MPa}$

Betonin puristuslujuus:  $f_{ck} = 40\text{MPa}$

Betonin murtopuristuma:  $\varepsilon_{cu} = 0,0035$

Raudoituksen kimmokerroin:  $E_s = 200000\text{MPa}$

Terästen myötörajavienymä:

$$\varepsilon_{yk} = \frac{f_{yk}}{E_s} = 0,0035$$

Neutraaliakselin paikka  $x$ , kun  $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$ :

Puristuspinnan tehollinen korkeus:

$$y = 0,8 \cdot x$$

Puristuserästen venymä:

$$\varepsilon_{sc} = \frac{\varepsilon_s \cdot (t_{st} - x)}{x}$$

Betonin puristuskapasiteetti:

$$N_c = b \cdot y \cdot f_{ck} \quad (\text{L5.18})$$

Vetoterästen vetovoimakapasiteetti:

$$N_s = A_{st} \cdot f_{yk} = 281,49 \text{ kN} \quad (\text{L5.19})$$

Puristusterästen kapasiteetti:

$$N_{sc} = E_s \cdot \varepsilon_{sc} \cdot A_{sc} \quad (\text{L5.20})$$

Tasapainoehto

$$N_c = N_s + N_{sc} \quad (\text{L5.21})$$

Ratkaistaan tasapainoehdosta yhtälöiden L5.16 – 5.20 avulla neutraaliakselin paikka  $x$ :

$$x = 38 \text{ mm}$$

Ratkaistaan  $x$ :n avulla puristuspinnan tehollinen korkeus, puristusterästen venymä, betonin puristuskapasiteetti ja puristusterästen kapasiteetti:

$$y = 30,37 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{sc} = 0,00047$$

$$N_c = 318,86 \text{ kN}$$

$$N_{sc} = 37,38 \text{ kN}$$

Tarkistetaan tasapainoehto:

$$N_c = N_s + N_{sc} = 318,86 \quad \text{OK}$$

Sisäinen momenttivarsi:

$$z = d - \frac{y}{2} = 241,82 \text{ mm}$$

Momenttikapasiteetti:

$$M_{k,L} = N_s \cdot z + N_{sc} \cdot \left( t_{sc} - \frac{y}{2} \right) = 69,11 \text{ kNm}$$

Paalua ei voida lyödä paalutustyöluokan PTL3 geotekniseen kestävyysluokkaan 2520 kN, joten redusoidaan geotekninen kestävyys vastaamaan momenttikestävyttä  $M_{k,L}$ .

$$R_{k,geo,max} = F_{c,lyönti} \cdot \frac{M_{k,L}}{M_k} = 2520 \text{ kN} \cdot \frac{69,11 \text{ kNm}}{102,89 \text{ kNm}} = 1692,65 \text{ kN}$$

Geoteknisen kestävyysluokan maksimi arvo vastaa keskeistä jännitystä:

$$\sigma = \frac{R_{k,geo,max}}{A} = \frac{1692,65 \text{ kN}}{0,09 \text{ m}^2} = 18,81 \text{ MPa}$$

Tarkistetaan, että lyönninaikaiset vetorasitukset eivät ole liian suuret.

Vetovoima ei ylitä arvoa:  $F_{t,lyönti} = 506,68 \text{ kN}$

$$f_{t,lyönti} = \frac{F_{t,lyönti}}{A} = 5,63 \text{ MPa}$$

Keskeinen puristusvoima ei ylitä arvoa:  $F_{c,lyönti} = 2520 \text{ kN}$

$$f_{c,lyönti} = \frac{F_{c,lyönti}}{A} = 28 \text{ MPa}$$

Jaetaan laskettu  $R_{k,geo,max}$  määrittävästä riippuvalla korrelaatiokerroimella  $\xi$ , niin saadaan paalun geoteknisen kestävyysluokan ominaisarvo. Esimerkkilaskussa paalujen geotekninen kestävyys on koestettu viiden paalun dynaamisella koekuormituksella, joka edustaa 5-40 % koestusotosta. Tällöin korrelaatiokerroin  $\xi_5 = 1,5$ . Geoteknisen kestävyysluokan ominaisarvoksi saadaan:

$$R_{c;k} \leq \frac{R_{k,geo,max}}{\xi_5} = \frac{1692,65 \text{ kN}}{1,5} = 1128,44 \text{ kN}$$

Jaetaan geoteknisen kestävyuden ominaisarvo kokonaiskestävyyden osavarmuusluvulla  $\gamma_t = 1,2$ . Lyömällä asennetun paalun 300b geoteknisen kestävyuden mitoitusarvo paalutustyöluokassa PTL3 saa olla enintään:

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} = 752,29 \text{ kN}$$