

Tukipaaluina toimivien puupaalujen kestävyys laskennallisesti ja koekuormitusten perusteella



RAMBOLL

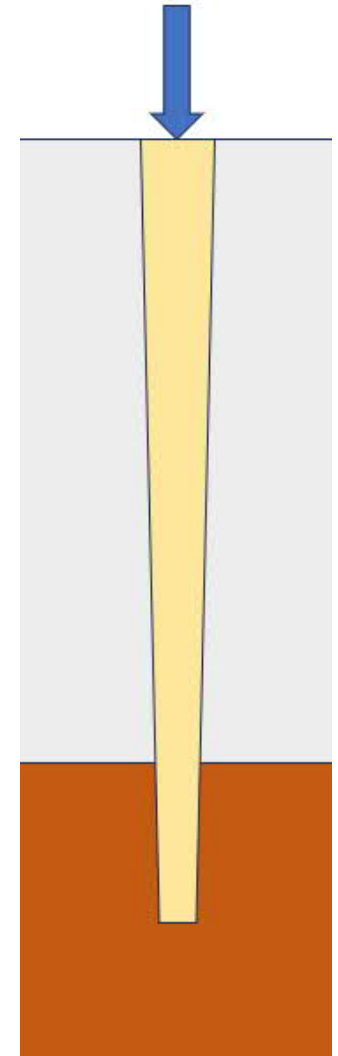
Bright ideas.
Sustainable change.

Helsinki

Antti Larkela, Ramboll Finland Oy
SGY Pohjanvahvistuspäivä 21.8.2025

Yleistä

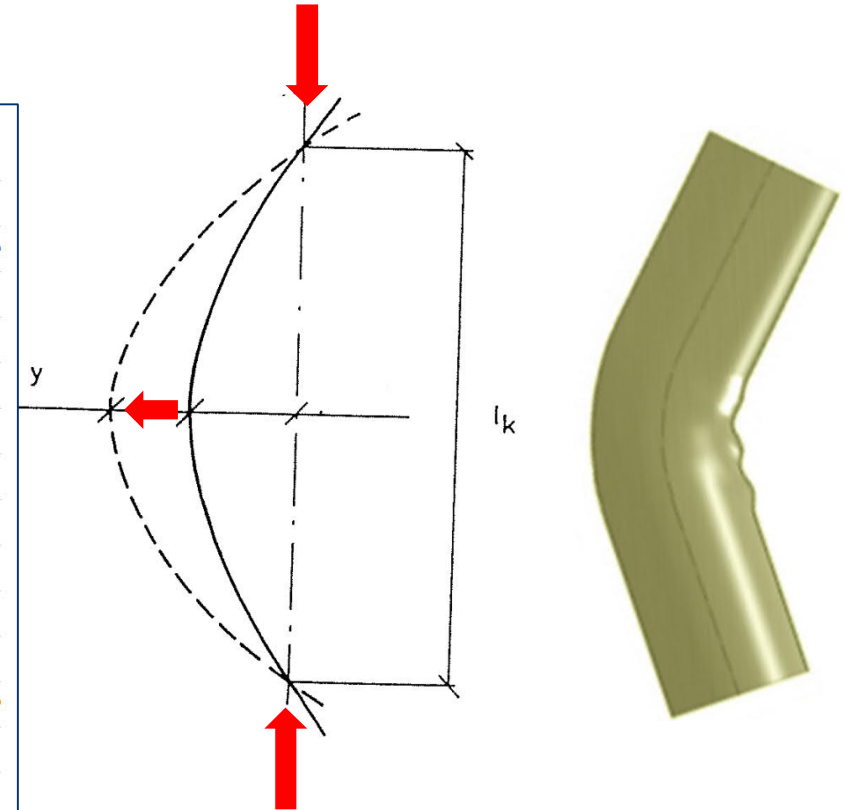
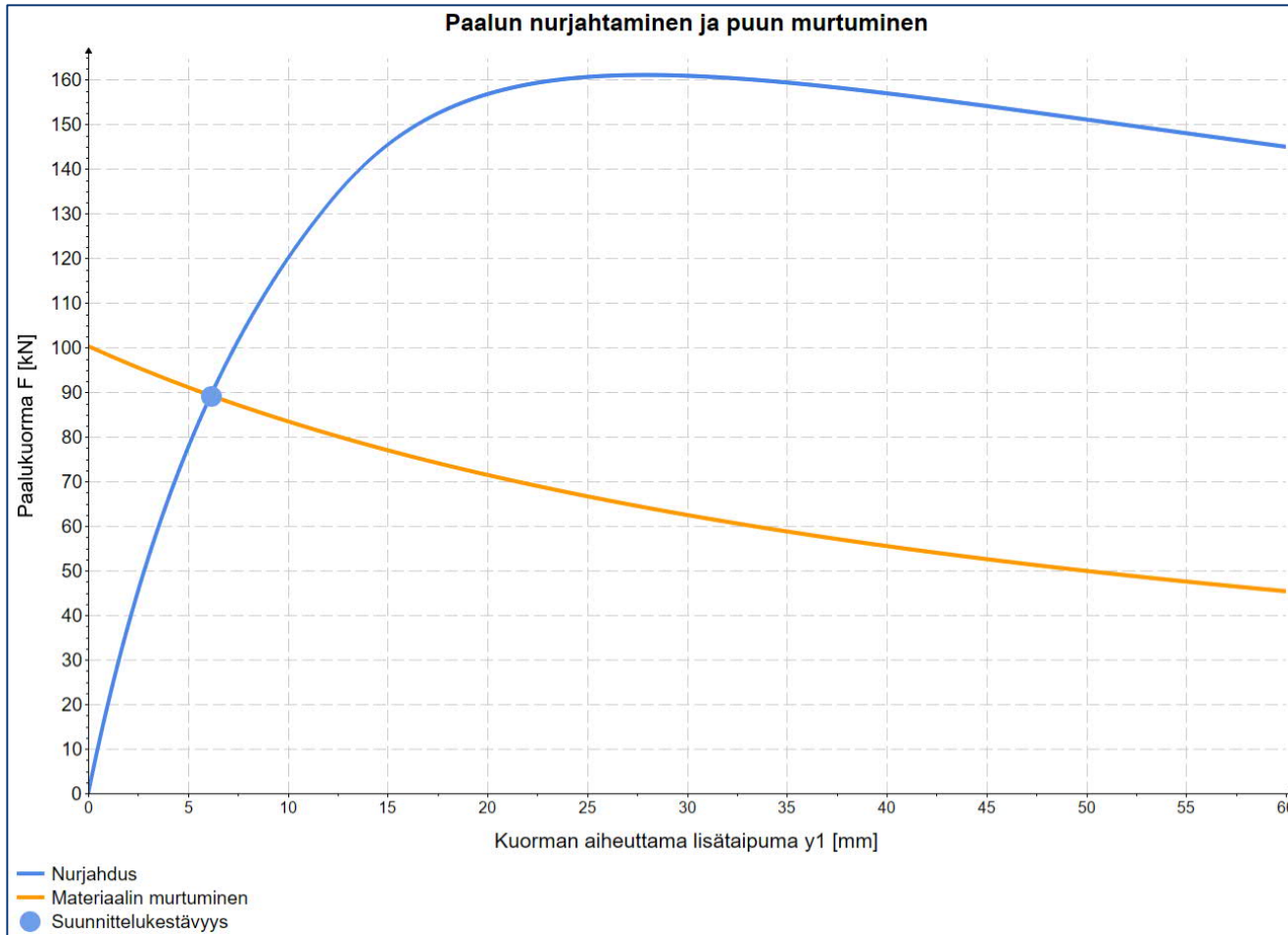
- Kohde Malmin kentän alue Helsingissä
- Tilaaja Helsingin kaupunki
- Toteutus syksyllä 2024
- Kohteeseen rakennettiin puupaalujen varaan perustettu penger
- Suunnittelulähtökohta oli, että kyseessä on koerakenne
- Kohteessa asennettiin 1009 kpl tukipaaluina toimivaa puupaalua
- Paalupituus 10-12 m
- Paalut asennettiin saven läpi, noin 1-2 m hiekkaan/moreeniin
- Paalujen latvan (alapää) minimihalkaisija 15 cm
- Minimihalkaisija katkaisutasossa 25 cm
- Paalut olivat kuorittua mäntyä
- Paalujen asennus saven läpi Movax SG-60 täryvasaralla
- Varsinaiset loppulyönnit kitkamaahan Movax D-H25 hydraulijärkäleellä



Pääasialliset tarkastelut

- Rakenteellinen kestävyys laskennallisesti
 - Paalutusohjeen kaavat ja ruotsalainen iteratiivinen menetelmä
- Geotekninen kestävyys laskennallisesti
 - Kantavuuskaavalla (Meyerhofin paaluille tarkoitettu menetelmä)
 - Loppulyöntivaatimukset ja lyönninkestävyys GRLWEAP -ohjelmalla
 - Loppulyöntivaatimuksen suuruusluokkatarkastelu paalutuskaavalla
 - Paalujen toteutunut kestävyys paalutuspöytäkirjojen perusteella paalutuskaavalla
- Testaus
 - 16 staattista koekuormitusta
 - 31 PDA–mittausta (4 kohtalaisen onnistunutta CAPWAP–analyysia)

Paalun rakenteellinen kestävyys



Murtorajatilän rakenteellinen kestävyys: $R_{d, \text{str}} = 89 \text{ kN}$
Puristava reunajännitys mitoittaa, ei nurjahdus.

Geotekninen kestävyys GRLWEAP

Laskettiin loppulyöntivaatimukset
Movax DH-25 hydraulijärkälle:

Riittävä geotekninen kestävyys saavutetaan,
kun paalun painuma on ≤ 20 cm 10 iskun sarjalla,
järkeen iskukorkeuden ollessa 20 cm
(yksinkertaistettuna).

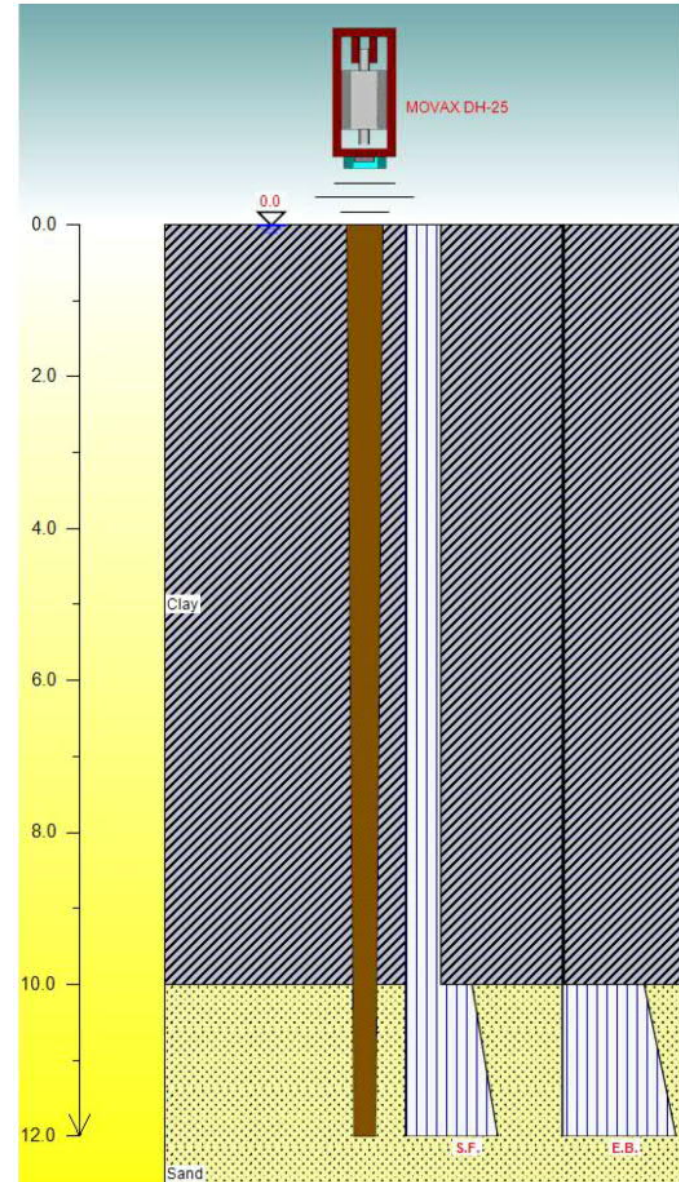
GRLWEAP-ohjelmalla saadaan lisäksi tarkasteltua paalun
rakenteellinen kestävyys iskun aiheuttamaa puristus- ja
vetoaaltoa vastaan.

Rajoitteet:

1. Riittävä geotekninen kestävyys
2. Puun materiaalin puristuskestävyys
3. Jatkoksia ei saa tulla

RAMBOLL

Bright ideas.
Sustainable change.



Toteutus

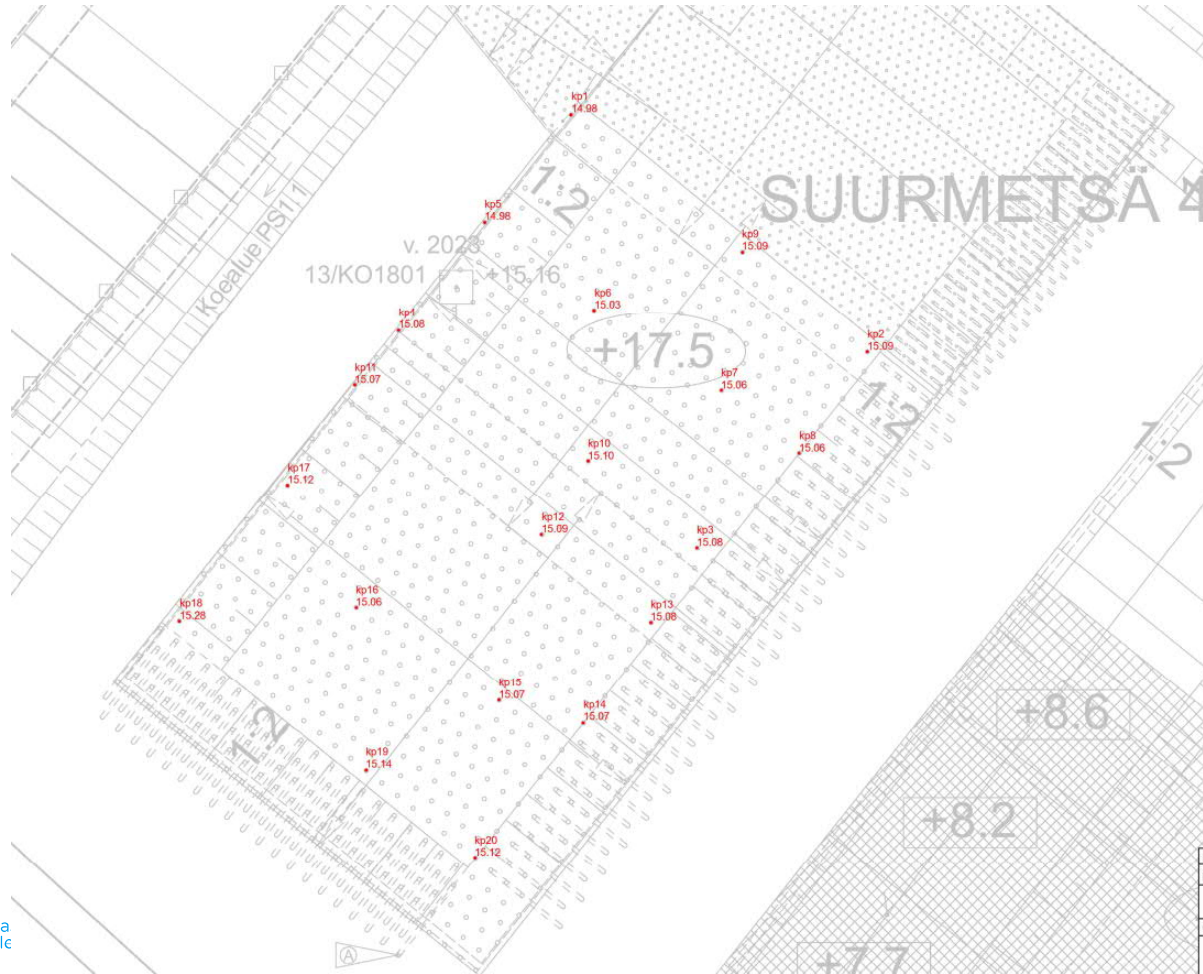
Koepaalutus (20 paalua)

- 5 staattista koekuormitusta
- 10 PDA mittausta (4 CAPWAP-analyysiä)
- Testattiin paaluille suunnitellut kärkivahvikkeet
- Testattiin kahden paalun jatkamista erikseen suunnitelluilla jatkoskappaleilla
- Koepaalutuksella saatiin varmennettua, että GRLWEAP-ohjelmalla lasketut loppulyöntivaatimukset olivat sopivia.

Loput paalut (989 paalua)

- 11 staattista koekuormitusta
- 21 PDA mittausta

Bright idea.
Sustainable.

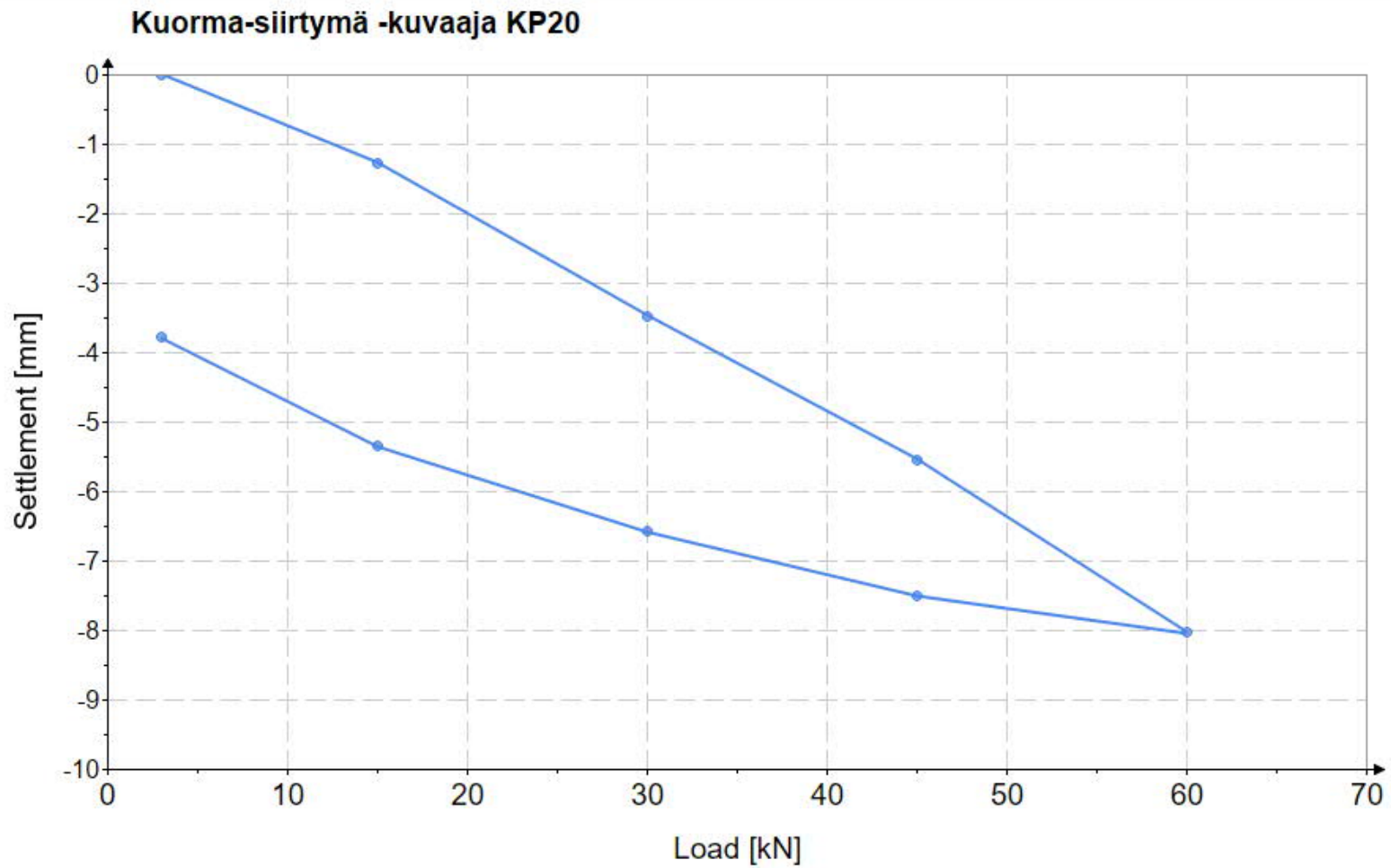


Paalun staattinen koekuormitus (max. kuorma 60 kN)

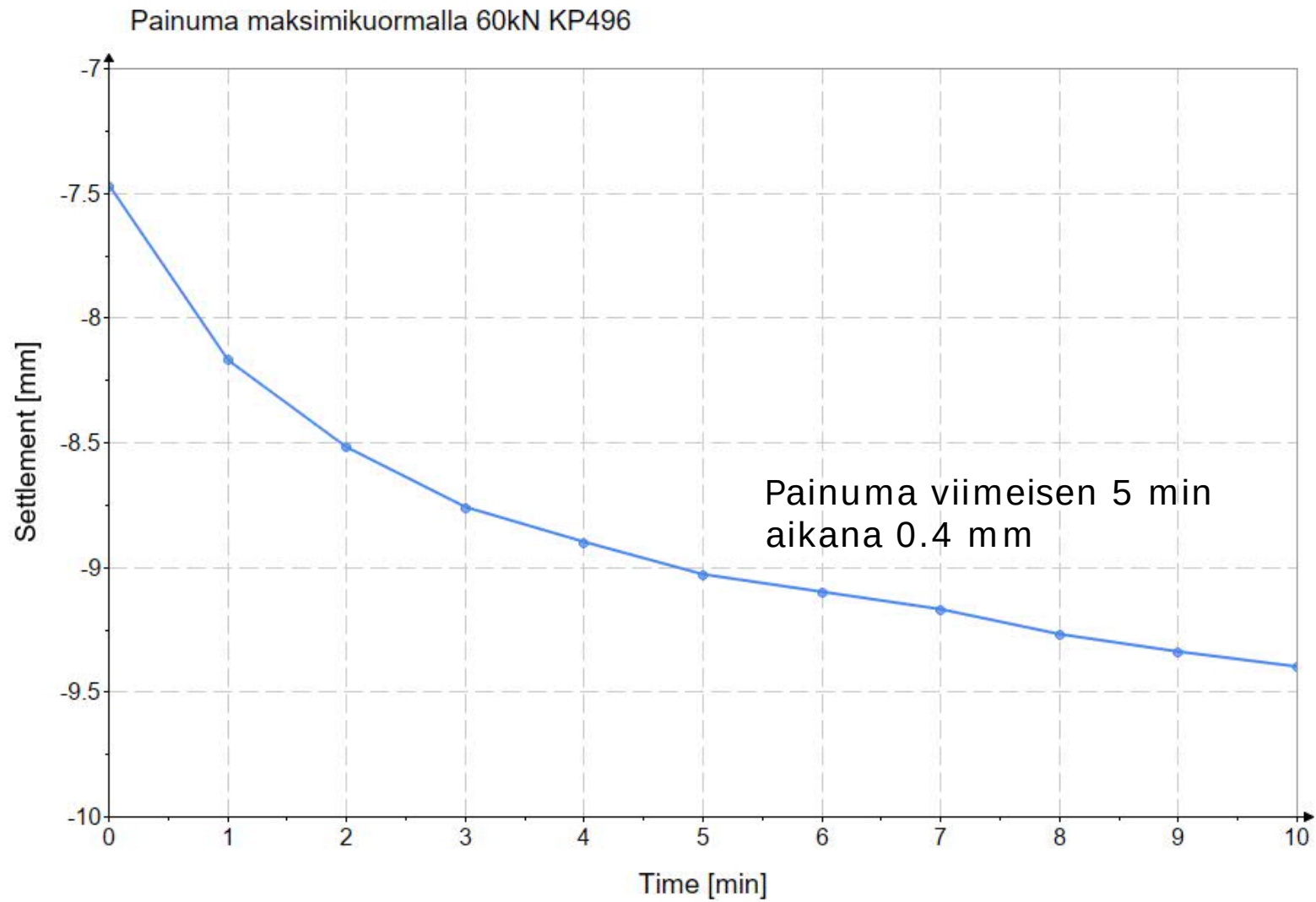


Tyypillinen staattisen koekuormituksen tulos

Staattisilla koekuormituksilla ei saavutettu murtokuormaa.



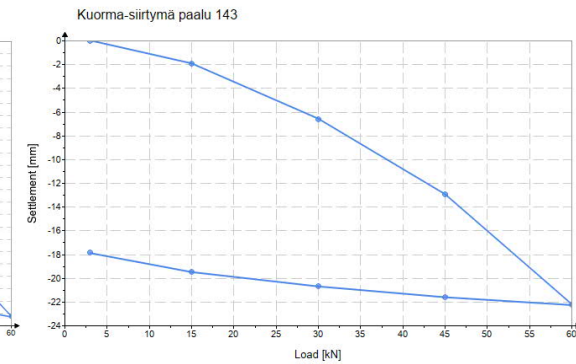
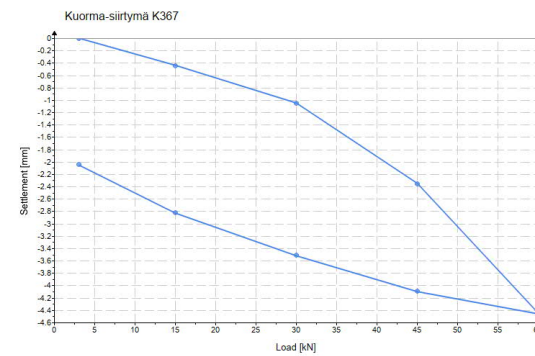
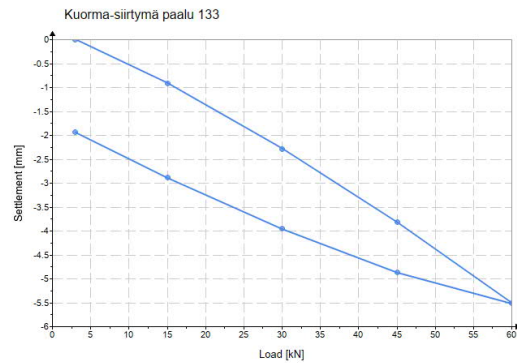
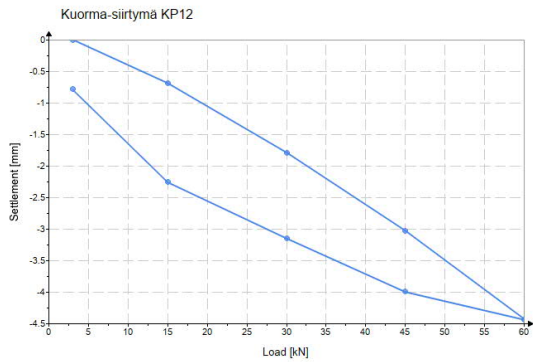
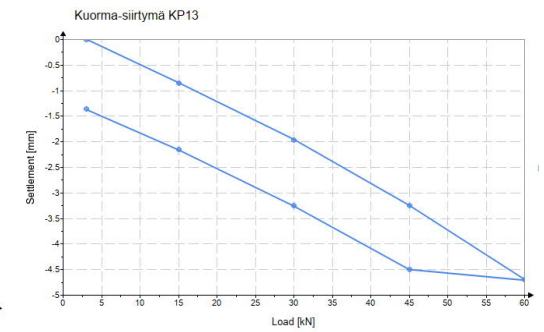
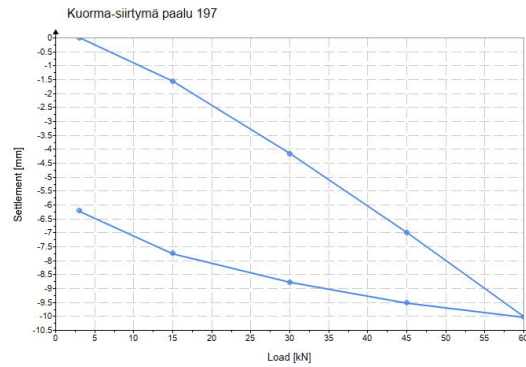
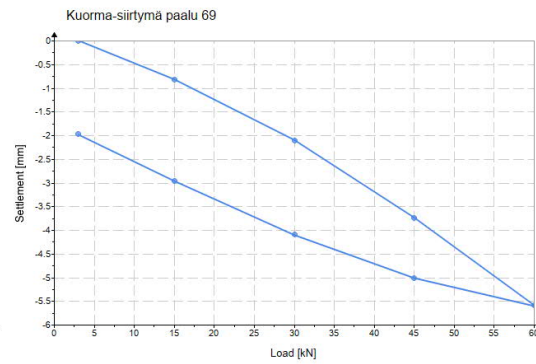
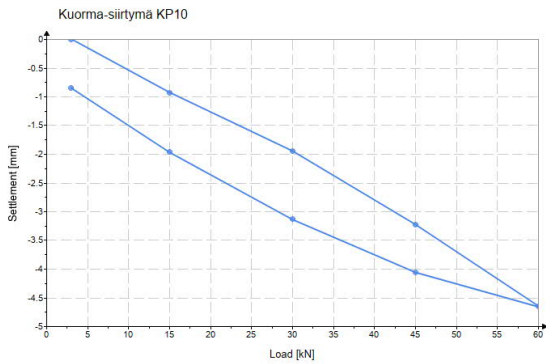
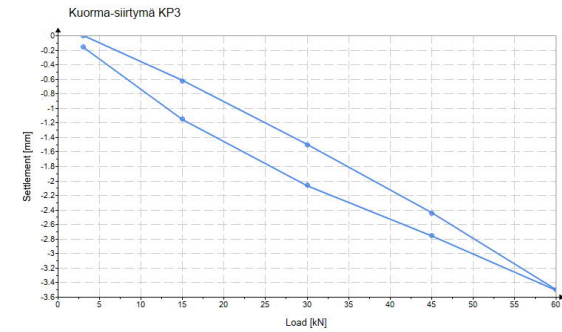
Tyypillinen staattisen koekuormituksen aika-painuma -kuvaaja



Osa staattisten koekuormitusten kuorma-siirtymiä – kuvaajista

Maksimipainuma 60 kN kuormalla 3-22 mm.

Suurin painuma P143, jonka kuvaaja on oikeassa alalaidassa.



Suunnittelukestävyys kaikkien PDA-mittausten perusteella (31 PDA-mittausta)

PDA-mittausten keskiarvo oli $R_{\text{mean}} = 332 \text{ kN}$

PDA-mittausten minimiarvo oli $R_{\text{min}} = 79 \text{ kN}$

$$R_{ck} := \min \left(\frac{R_{cm_mean}}{\xi_{5_to_mean}}, \frac{R_{cm_min}}{\xi_{6_to_min}} \right)$$

jossa:

- $\xi_{5_to_mean} = 1,4 \times 0,9 = 1,26$ (yli 20 mittausta ja CAPWAP)
- $\xi_{6_to_min} = 1,25 \times 0,9 = 1,125$ (yli 20 mittausta ja CAPWAP)

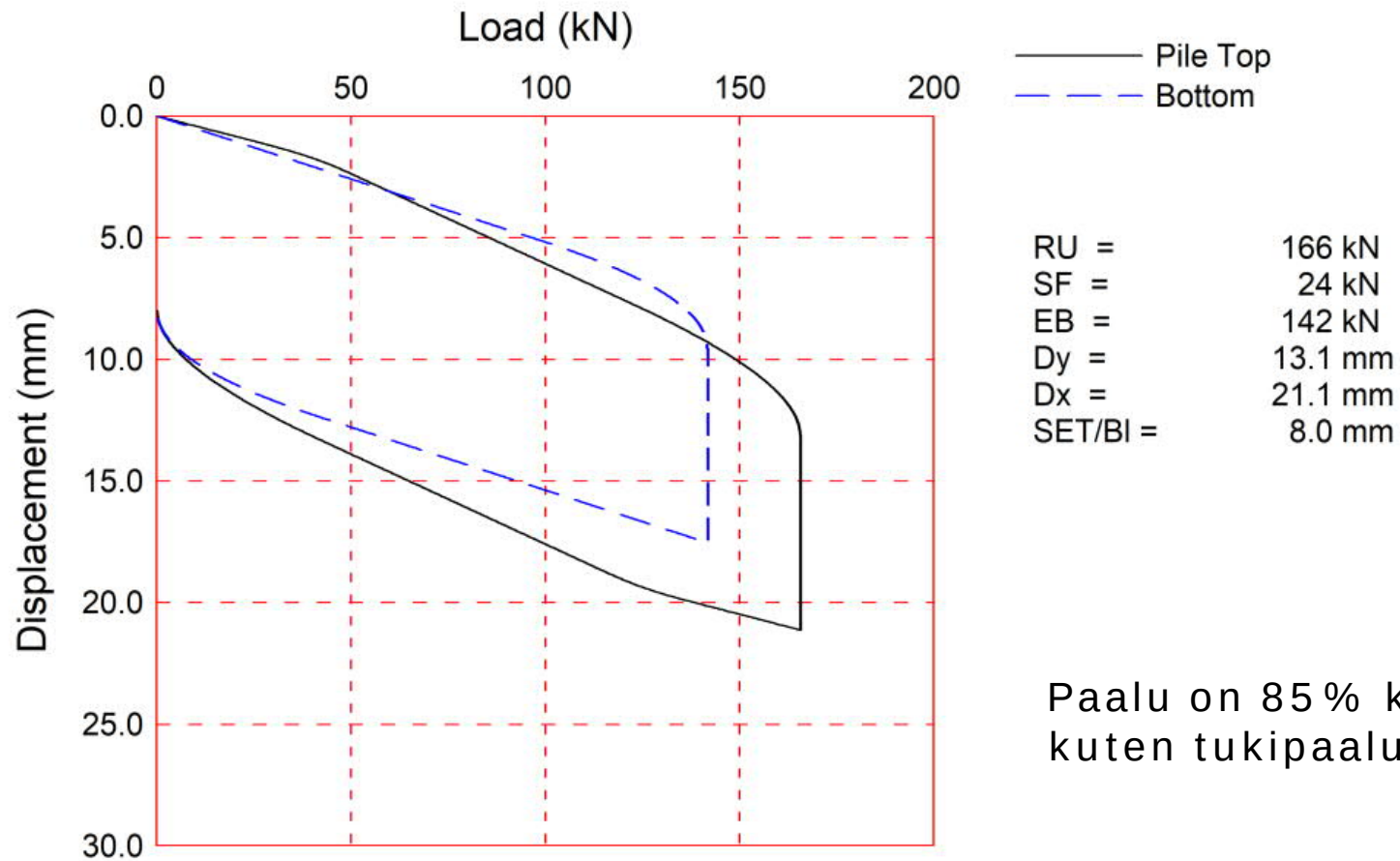
Murtorajatilan suunnittelukestävyys saadaan kaavalla:

$$R_{cd} := \frac{R_{ck}}{\gamma_{total}} = 59 \text{ kN}$$

jossa:

- $\gamma_{total} = 1,2$

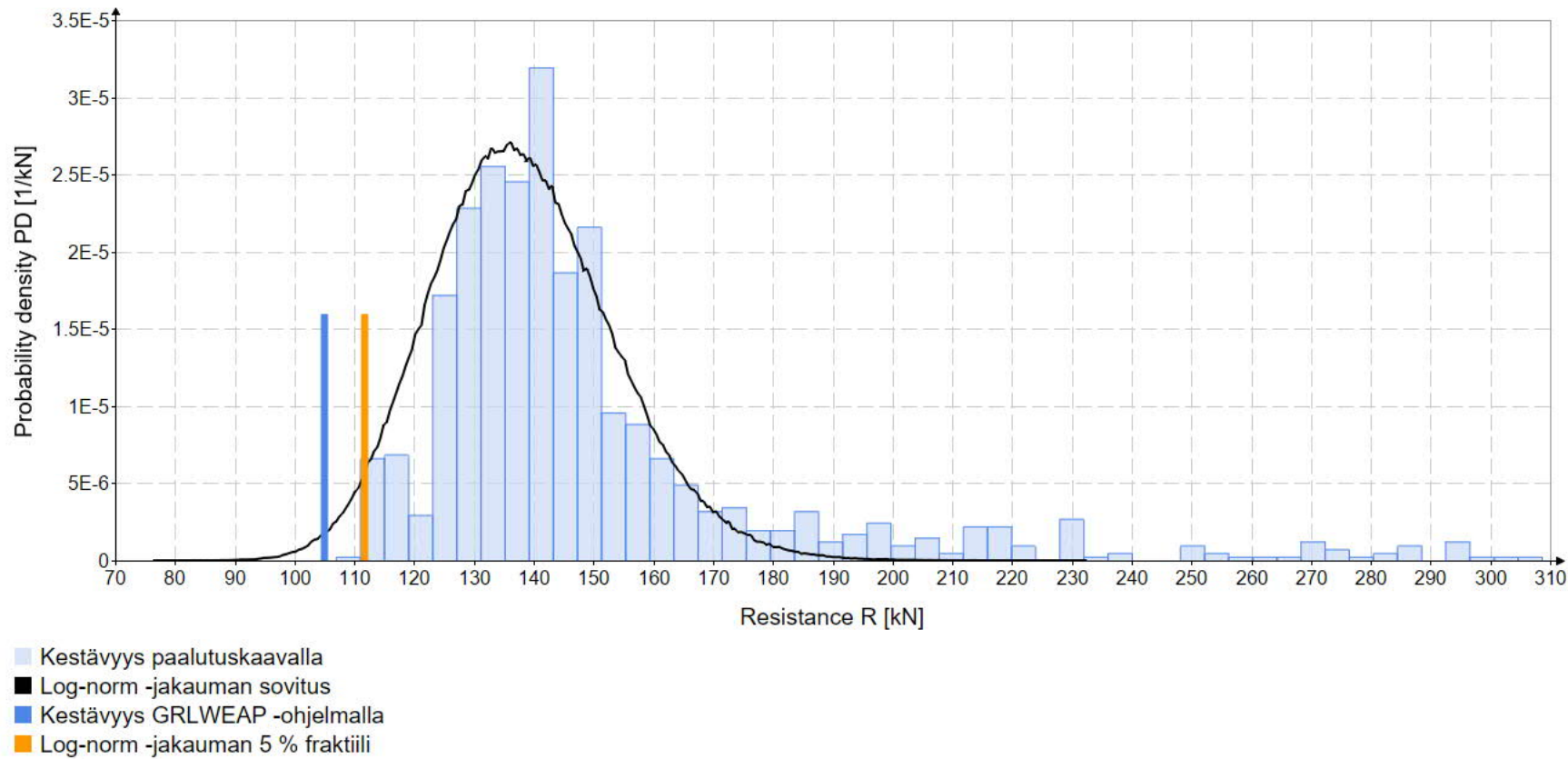
Esimerkki CAPWAP-kuvaajasta



Paalu on 85 % kärjellä kantava,
kuten tukipaalun kuuluukin.

Kaikkien paalujen (1009 kpl) ominaiskestävyys urakoitsijan ilmoittamien loppulyöntipainumien ja paalutuskaavan avulla laskettuna

Kestävyysjakauma näyttää noudattavan log-norm -jakaumaa, koska loppulyöntivaatimus leikkaa jakauman vasemman ”hännän”.



Yksinkertaistettu konservatiivinen yhteenveto

Paalun rakenteellinen kestävyys $R_{cd_str} := 89 \text{ kN}$

Paalun geotekninen kestävyys $R_{cd_geo} := 59 \text{ kN}$

Paalun suunnittelukestävyys $R_{cd} := \min(R_{cd_str}, R_{cd_geo}) = 59 \text{ kN}$

Paalun "sallittu kuorma", jos kuorma on pysyvää $F_{allowed_permanent_load} := \frac{R_{cd}}{1.35} = 43.7 \text{ kN}$

Paalun "sallittu kuorma", jos kuorma on muuttuvaa $F_{allowed_variable_load} := \frac{R_{cd}}{1.5} = 39.3 \text{ kN}$

Yksinkertaistetusti:

Esitetyillä loppulyöntivaatimuksilla asennetun 15 cm kärkihalkaisijaltaan olevan tukipaaluna toimivan puupaalun "sallittu kuorma" on noin 40 kN (≈ 4 tonnia).

Toytota Corollan (noin) massa $m_{auto} := 1400 \text{ kg}$ (pysyvää kuormaa)

$$F_{G_auto} := m_{auto} \cdot g = 13.729 \text{ kN}, \text{ jossa } g = 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Paalun sallittu kuorma autoissa $n_{autoja} := \frac{F_{allowed_permanent_load}}{F_{G_auto}} \quad n_{autoja} = 3.2$

