



Teräsbetonipaalun rakenteellinen mitoitus

Betoniteollisuuden paaluseminaari
19.11.2015

Jukka Haavisto, TTY

Sisältö

- Tutkimusprojekti paalumitoituksesta
- Tb-paalujen mitoitus
 - Asennusaikainen kestävyys
 - Käytönaikainen kantokyky
- Tutkimuksen mahdolliset jatkovaiheet



Tutkimusprojekti teräsbetoni-paalumitoituksesta

- Betoniteollisuus ry:n paalujaoksen rahoittama
- Tutkimuksen toteuttaja TTY:n rakennustekniikan laitos, vaativien rakenteiden tutkimusryhmä
- Projekti käynnistyi alkuvuonna 2015
- Tavoitteena kehittää mitoitusmenettelyä sekä luoda taustamateriaalia mitoitusohjeiden uudistustöihin
- Toteutetaan vaiheittain

Tutkimuksen taustaa

- Kansallinen ohjeistus ei anna nykyisellään riittävästi perusteita rakenteelliseen mitoittamiseen
- Erot paalujen kantokyvyssä Suomen ja mm. Ruotsin välillä
- Paalutusohje 2011:n uudistustyö

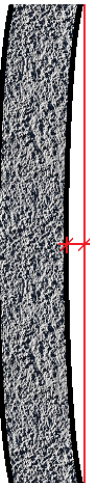
Tutkimuksen raja

- Aksiaalisesti kuormitettu kärjellään kantava tb-paalu
- PO-2011:ssä esitetyn tavan mukaan määritetään
 - Paalun alkutaipuma
 - Hienorakeisen maan alustaluku
 - Hienorakeisen maan sivuvastuksen ääriarvo

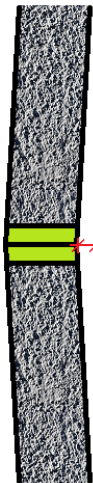
PO-2011:n otaksumat

Alkutaipuma

JATKAMATON



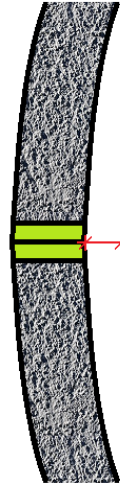
$L_{cr} / 300$



$L_{cr} / 300$

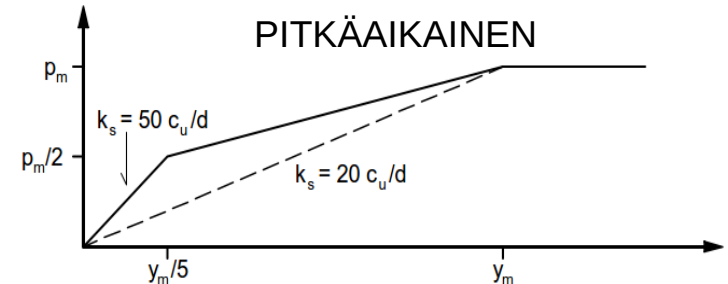
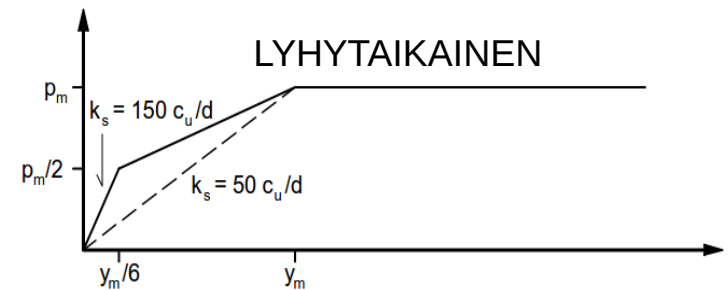


JATKETTU



$L_{cr} / 150$

Hienorakeisen maan sivupaine-siirtymäyhteys



Hienorakeisen maan sivuvastuksen ääriarvo:

$$p_m = 6 \dots 9c_u$$

Esiselvitysvaihe

- Teräsbetonipaalujen rakenteellisen mitoituksen teorioihin sekä olemassa oleviin suunnitteluohjeisiin perehtyminen
- Kirjallisuustutkimus
 - Pålkommissionen rapportit
 - Suomen paalutusohjeet
 - Peleveiledningen 2012
 - Kv. tutkimukset



Esiselvitysvaihe

- Tavoitteena:
 - Tunnistaa paalumitoituksessa vaikuttavat ilmiöt
 - Tunnistaa nykyisen paalutusohjeen puutteet ja kehitystarpeet
 - Selvittää millaisilla tutkimusmenetelmillä varsinaista tutkimusongelmaa voidaan lähestyä ja laatia jatkovaiheesta tutkimussuunnitelma
- Tällä hetkellä ollaan esiselvitysvaiheen loppusuoralla

Esiselvitysvaihe - tuloksia

- Asennuksen aikaiselle momenttikestävyysvaatimukselle ei todettu olevan selkeitä perusteita
 - Reunajännitysten rajoittaminen perustellumpaa
- Teräsbetonipaalujen rakenteelliselle mitoittamiselle tulisi olla paalutusohjeessa selkeämmät menettelytavat
- Paalujatkoksen alkuväljyydelle tulisi olla vaatimukset
 - ⇒ Vaikuttaa suoraan mitoitusmallin alkuepäkeskisyyksiin
- Rakenteen ja maan vuorovaikutuksessa etenkin osavarmuusluvun käyttöä paalua ympäröivän maan ominaisuuksiin tulisi selkeyttää
- Asennustyön aiheuttaman väsymisen huomioonotto rakenteellisessa mitoituksessa?

Yleistä tb-paalujen mitoituksesta

Geotekninen kestävyys

- Paalua ympäröivän maa- ja kallioperän kyky ottaa vastaan paaluilta tulevat kuormat
- Varmistetaan esim. loppulyöntiehdoilla, dynaamisilla koekuormituksilla, staattisilla koekuormituksilla

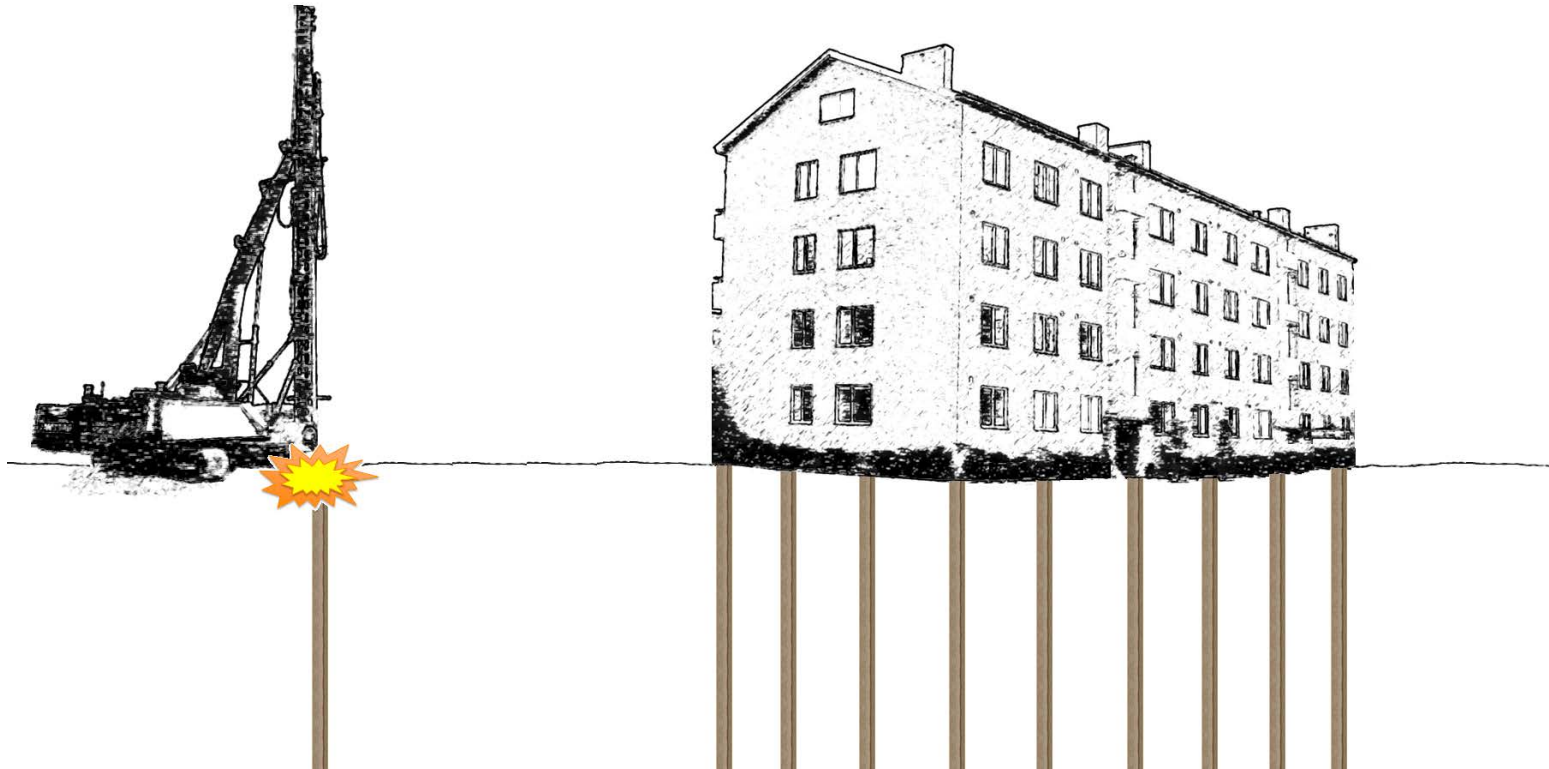
Rakenteellinen kestävyys

- Käytönaikainen kestävyys
 - Poikkileikkauksen N-M -kapasiteetti
 - Stabiiliteetin menetys
- Asennusaikainen kestävyys
- Lisäksi kestävyys nostoille sekä käyttörajan mitoitus

Yleistä tb-paalujen mitoituksesta

Asennusaikainen kestävyys – Käytönaikainen kestävyys

Dynaaminen kuormitus – Staattinen kuormitus
millisekunteja – kymmeniä vuosia



Asennusaikainen kestävyys PO-2011:ssa

- Suurin sallittu puristusrasituksen aikaansaava keskeinen lyöntivoima asennettaessa

$$F_{c;lyönti;max} = 0,8 * f_{ck} * A_c$$

- Suurin mahdollinen ominaisarvo paalun geotekniselle kestävyydelle

$$R_{k;geo;max} = F_{c;lyönti} \quad (\text{PTL3})$$

$$R_{k;geo;max} = 0,8 * F_{c;lyönti} \quad (\text{PTL2})$$

$$R_{k;geo;max} = 0,6 * F_{c;lyönti} \quad (\text{PTL1})$$

Asennusaikainen kestävyys PO-2011:ssa

$$M_k \geq R_{k;geo} \cdot i_{red}$$

$$i_{red} = k_{red} \left(\frac{I}{6A} \right)^{0,5}$$

$$k_{red} = 0,57 \cdot \frac{f_{yk}}{500} \cdot \rho + 0,57$$



Empiiris-analyyttistä

$$M_{k;vaad} = 0,9 * R_{k;geo} * i_{red} \quad (\text{PTL3})$$

$$M_{k;vaad} = 1,0 * R_{k;geo} * i_{red} \quad (\text{PTL2})$$

$$M_{k;vaad} = 1,1 * R_{k;geo} * i_{red} \quad (\text{PTL1})$$

Asennusaikainen kestävyys

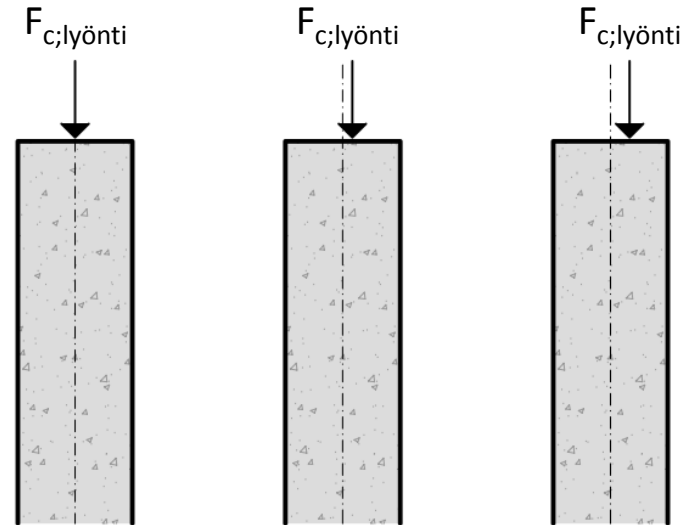
- Toteutusstandardi EN 12699 määrää, että lyöntien aikana paalun betoniin saa kohdistua maksimissaan $0,8 \cdot f_{ck}$ suuruinen puristusjännitys
- Vetovoima maksimissaan 90% pääterästen nimelliskapasiteetista
- 10 % ylitys sallitaan mikäli jännityksiä mitataan lyöntien aikana
- Betonin puristuskapasiteetti nopeille iskuille
- Väsymisvaikutus
- Reunajännitykset



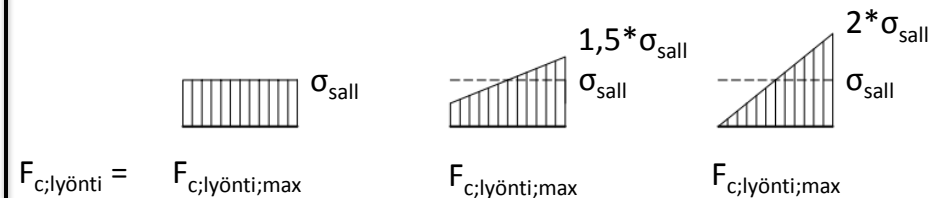
Reunajännitykset

- PO-2011:ssa huomioitu jollain tavalla taivutusmomentti-vaatimuksen kautta
- Reunajännityksen ei tule ylittää betonille sallittua maksimijännitystä
- Reunajännityksiä muodostuu itse lyönnin lisäksi mm. maassa olevista kivistä ja lohkarista, iskutyynystä, vinosta kalliopinnasta ja paalun käyryydestä ja yläpään vinoudesta
- Suuret reunajännitysvaihtelut pienentävät maksimilyöntivoimaa
⇒ Geotekninen kapasiteetti pienenee

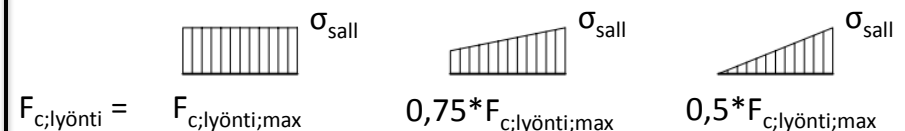
TEOREETTINEN TARKASTELU



JOS LYÖNTIVOIMA VAKIO (MAX. KESK. LYÖNTIVOIMA)



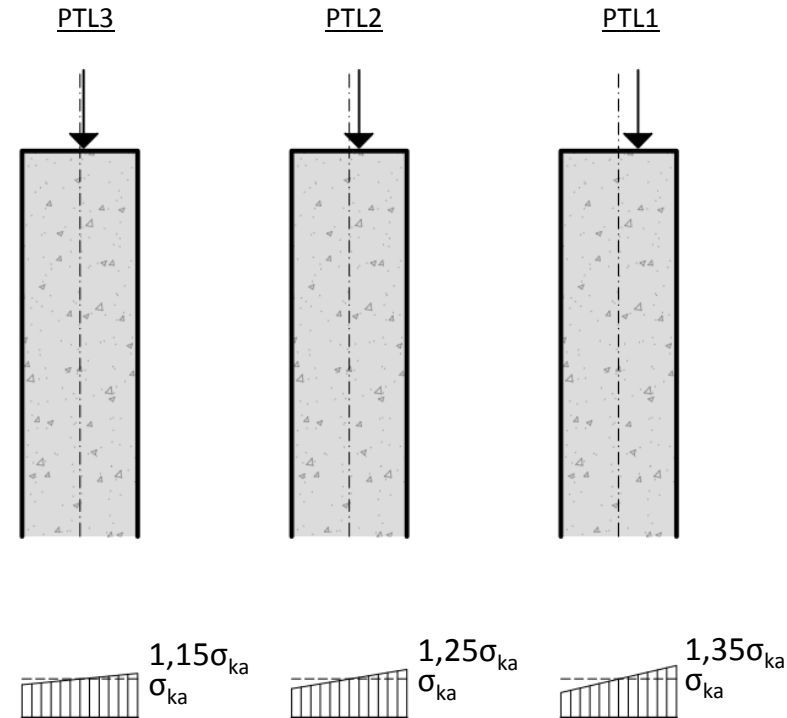
JOS MAX.REUNAJÄNNITYS VAKIO (SALL. REUNAJÄNNITYS)



Reunajännitykset

- PO-2011:n sallimat reunajännityksen ylitykset keskimääräisestä jännityksestä
 - PTL3: 15 %
 - PTL2: 25 %
 - PTL1: 35 %
- Paaluttajalla vastuu reunajännitysten pitämisessä sallitulla tasolla
- Paalutustyön reunajännitysten suuruudesta ei riittävästi tutkittua tietoa

PO-2011 MAX.REUNAJÄNNITYKSET



Reunajännitysvaihteluja lyöntikokeissa

Otanta lyöntikokeista – hieman kättä pidempää
reunajännitysvaihteluista lyöntien aikana

- TTY:llä suoritetuista jatkosten ja kalliokärkien lyöntikokeista valittu melko satunnaisesti 20 paalua
 - Eri paalutyyppejä, eri valmistajia, eri lyöjiä
- Jokaista paalua lyöty 1000 kertaa väh. 28 MPa keskimääräisellä jännityksellä
 - Aivan jokaista lyöntiä mittauslaite ei kyennyt rekisteröimään
- Paaluissa venymäanturi paalun jokaisella sivulla

Reunajännitysvaihteluja lyöntikokeissa

Otanta lyöntikokeista – hieman kättä pidempää
reunajännitysvaihteluista lyöntien aikana

- Kaikista mittaustuloksista max.reunajännitykset ylittivät keskimääräisen jännityksen **n. 30 %** keskiarvolla
- Maksimissaan yksittäisen paalun (1000 lyöntiä) osalta max.reunajännitykset ylittivät keskimääräisen jännityksen **n. 50 %** keskiarvolla
- Yksittäisen lyönnin osalta max.reunajännitykset ylitti keskimääräisen suurimmillaan **n. 80 %**
- Voidaanko paaluttajalta vaatia pysymistä esim. max 15 % (PTL3) reunajännityksissä keskimääräisestä?

Käytönaikainen kantokyky PO-2011:ssa

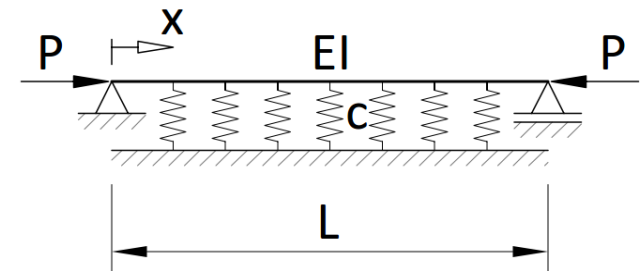
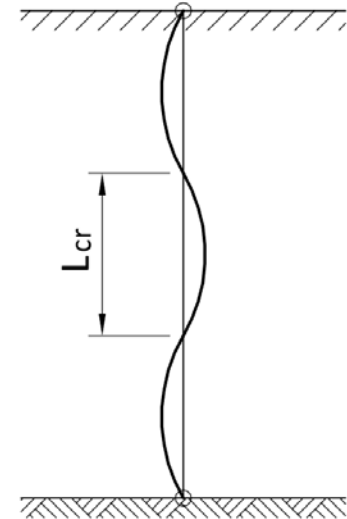


- Selkeät ohjeet nurjahdusmurtokestävyyden laskentaan maan murtuessa löytyy
 - Mutta paalupoikkileikkauksen rakenteellisen kapasiteetin laskentaan pelkästään viittaus EN1992:een
 - ⇒ Maan tukivaikutuksen huomioonottamiselle ei ohjeistusta
- Mielestämme maan murtoa, stabiliteetin menetystä tai poikkileikkauksen kapasiteettia ei tulisi käsitellä erikseen vaan kaikki nämä ovat keskinäisessä vuorovaikutuksessa



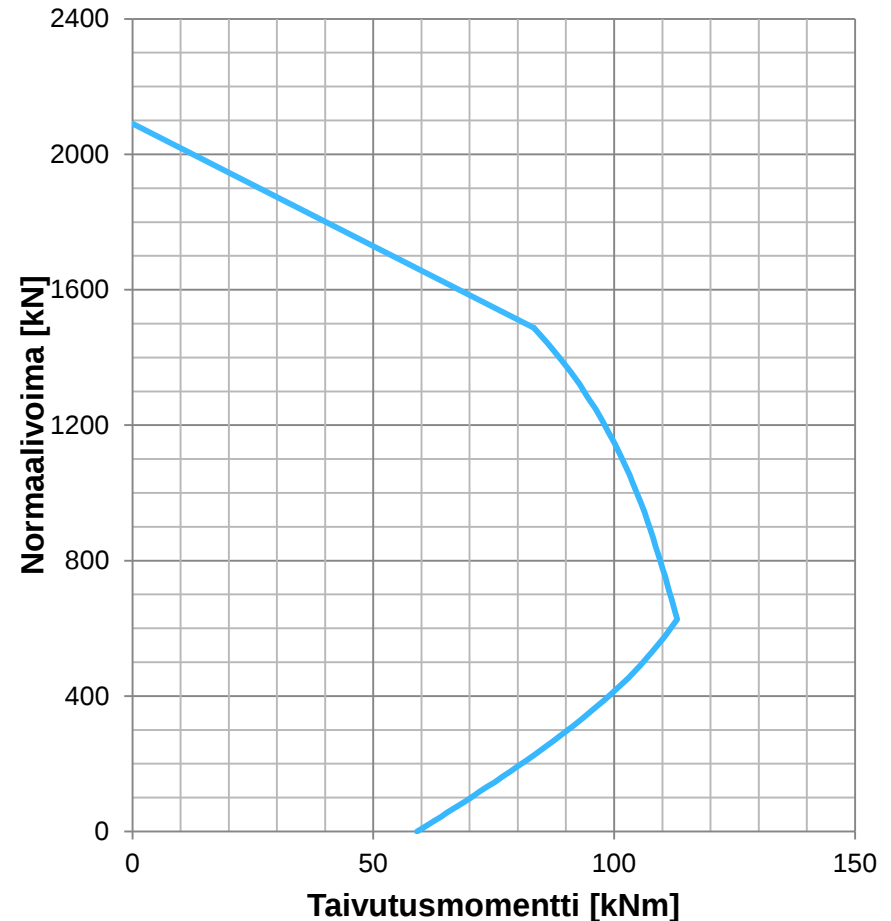
Käytönaikainen kantokyky - periaate

- Paalu ajatellaan taipuvan maassa sinikäyrän muotoisesti
- Samoin alkutaipuma oletetaan samavaiheiseksi sinikäyräksi
- Kimmoisella alustalla päistään kuormitettu palkki
 - Winklerin alusta
$$p(x) = c * y(x)$$



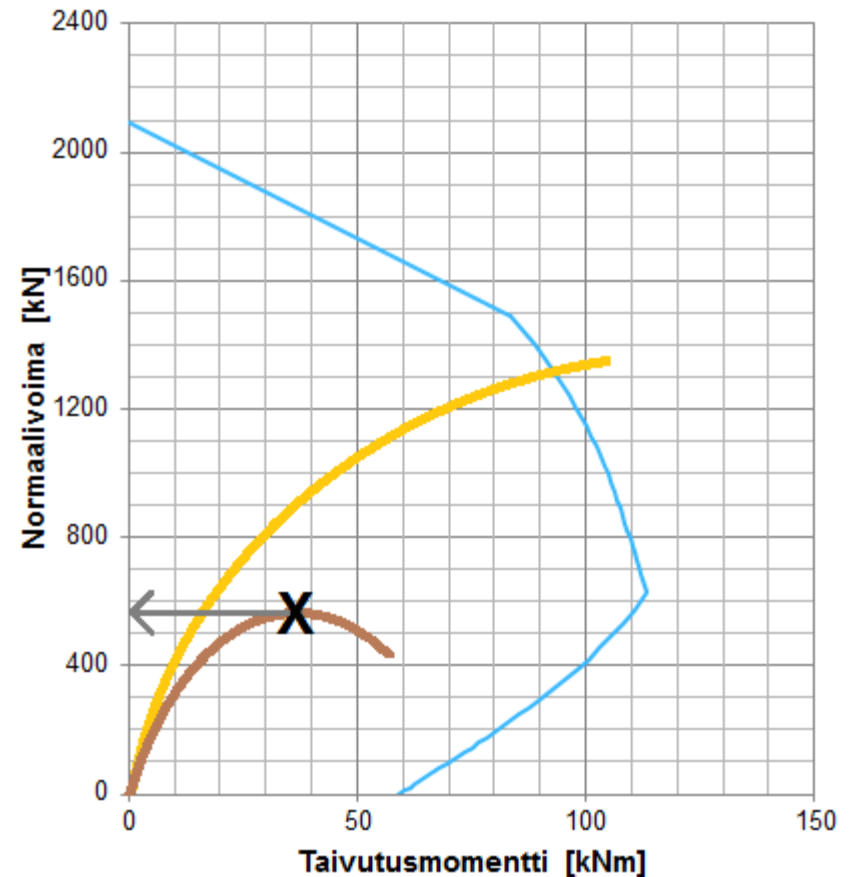
Käytönaikainen kantokyky - kapasiteetti

- Maahan asennettu paalu ajatellaan maan sivutukemana pilarina
- Normaalivoima-taivutusmomentti-yhteisvaikutus
- Mitoitetaan määrääviin suuntiin
 - Diagonaalinsuuntainen
 - Sivunsuuntainen



Käytönaikainen kantokyky - rasitukset

- Aksiaalisesti kuormitetulla paalulla ulkoisena kuormana pelkästään normaalivoimaa
- Taivutusmomentti alkutaipumasta sekä toisen kertaluvun vaikutuksesta
- Maan tuki pienentää taivutusmomenttia

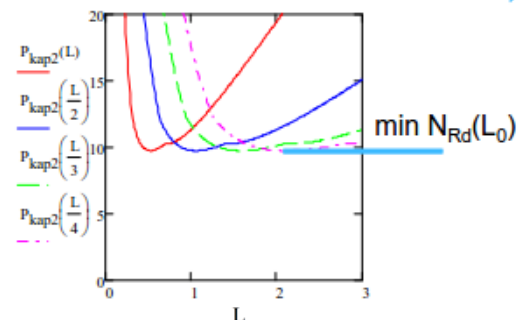
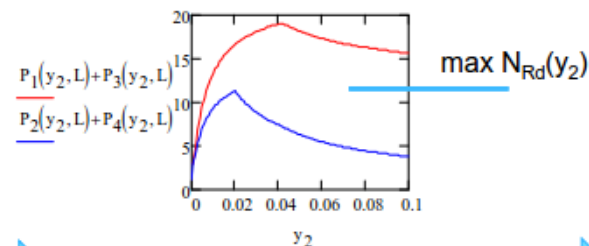
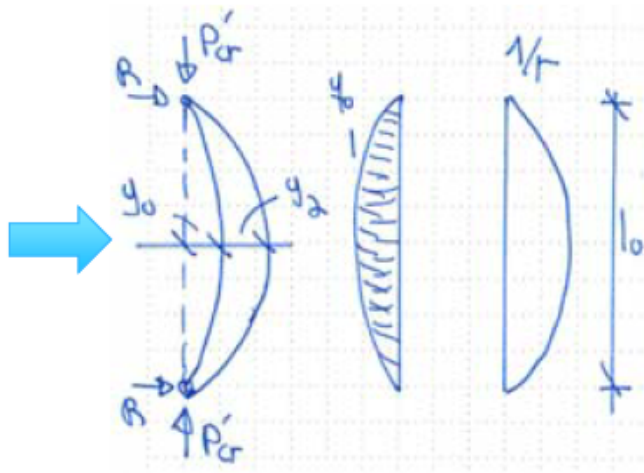


Tutkimuksen jatkovaiheet?

Ykkösprioriteetti:

- Mekaanisen toimintamallin kehittäminen kuormankantokyvyn määrittämiseen
- Tarkemmasta mallista mahdollisesti konservatiiviset käsinlaskentakaavat
- Mekaaniseen malliin pohjautuva menettely helposti omaksuttavissa insinööriyössä

A_s
 d
 f_c
 φ
 N_{qp}
 $p-\Delta$
 q_v



N_{Rd}

Tutkimuksen jatkovaiheet?

Lisäksi:

- Löynnistä aiheutuvan väsymisvaikutuksen huomiointi materiaaliominaisuuksissa
 - Lööntitapahtuma saattaa heikentää paalujen rakenteellista kapasiteettia
 - Ruotsissa materiaalilujuuksia pienennetään asennuksen heikentävän vaikutuksen takia vähintään 10 %
- Ilmiön tutkiminen kokeellisesti
 - Paalujen koekuormittaminen kentällä eri jännitystasoilla ja lyöntimäärillä
 - Löynnissä dynaamisesti kuormitettujen paalujen koekuormittaminen rakennelaboratoriossa
 - Puristus
 - Taivutus
 - Yhteisvaikutus

