



# **KÄRJELLÄ KANTAVAN PAALUN NURJAHDUSTARKASTELU**

Ilkka Isokangas

Opinnäytetyö  
Elokuu 2015  
Rakennustekniikka  
Infratekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tampere University of Applied Sciences

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikka  
Infrarakentamisen suuntautumisvaihtoehto

ISOKANGAS, ILKKA:  
Kärjellä kantavan paalun nurjahdustarkastelu

Opinnäytetyö 59 sivua  
Elokuu 2015

---

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin lyötävien teräsputkipaalujen eri nurjahdustarkasteluita. Työssä on myös esitetty yleisesti teräsbetonipaalujen nurjahduslaskentatapa. Merkittävimpänä osana työtä oli verrata paalun nurjahduslaskentamentelmien eroja maittain. Vertailumaina käytettiin Suomea, Ruotsia ja Saksaa. Aluksi käsiteltiin nurjahduslaskentamentelmät maittain, jonka jälkeen maiden väliset erot havaittiin esimerkkilaskujen kautta. Vertailulaskelmat tehtiin samoja lähtöarvoja käyttäen.

Työssä vertailtiin myös SSAB:n kehittämän Rrpilecalc:in Advanced FEM -lisäosion tuloksien arvoja Paalutusohjeen 2011 saatuihin käsinlaskentamentelmien tuloksiin. Tuloksissa verrattiin paalun nurjahduskapasiteetin ja murtumistavan eroja menetelmien välillä.

Työssä otettiin myös kantaa laskettujen alustalukujen vaikutusta nurjahduskestävyyteen, kun kohteesta on määritetty tarkemmat pohjatutkimukset. Kohteen lähtöarvot perustuvat todellisen kohteen tutkimuksiin.

Lopuksi laskettiin lähtöarvoja paalujen nurjahdustutkimuksiin. Tampereen teknillisellä yliopistolla tullaan tutkimaan jatkosten vaikutusta paalujen nurjahduskestävyyteen ja tutkimusta varten on tämän työn yhteydessä laskettu lähtötietoarvoja koekappaleille. Työssä käytettiin taustatietona maiden kansallisia ohjeita ja määräyksiä sekä eurokoodeja.

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Structural Engineering  
Civil Engineering

ISOKANGAS, ILKKA:  
Buckling analysis for load-bearing pile

Bachelor's thesis 59 pages  
August 2015

---

The purpose of this thesis was to investigate different buckling examinations for driven steel piles. Reinforced concrete pile buckling has also presented generally in this thesis. The most significant part of the work was to compare the differences to the pile buckling calculation methods by country. Finland, Sweden and German was used as reference countries. The first part of the thesis covers buckling calculation methods by country, after which the differences between countries were observed from example sums. Comparison calculations were made by using the same starting values.

Second part of the thesis covers the differences between the Rrpilecalc's supplement Advanced FEM calculation results to the values obtained from piling manual, "Paalutuohje 2011". Differences between the methods was to compare the pile buckling resistance and failure modes.

Third part of the thesis takes stand on stiffness of the beddings impact to the calculated buckling resistance when target is determined by detailed ground surveys. Targets starting values are based on actual surveys.

Lastly there was calculated starting values for buckling research what will be examined in Tampere University of Technology.

---

Key words: driven steel piles, buckling, calculation method, comparison

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	NURJAHDUSLASKENTATAPOJEN VERTAILU.....	6
2.1	Teräsputkipaalun geometriset poikkileikkaussuureet ja kapasiteetti .....	6
2.2	Teräsbetonipaalu­jen geometriset poikkileikkaussuureet ja kapasiteetti ....	8
2.3	Paalutusohjeen 2011 mukainen laskentatapa.....	12
2.3.1	Taipuneen paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa ....	16
2.3.2	Paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys.....	17
2.4	Pålkommissionen raporttien mukainen laskentatapa.....	17
2.4.1	Taipuneen paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa ....	19
2.4.2	Paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys.....	21
2.5	Stefan Vogt:in mukainen laskentatapa.....	23
2.5.1	Taipuneen paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa ....	24
2.5.2	Paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys.....	25
2.6	Laskentamenetelmien eroavaisuudet .....	28
2.6.1	Osavarmuuskertoimet .....	29
2.6.2	Alustalukujen erot maittain .....	29
2.6.3	Nurjahduskestävyys maan murtuessa .....	30
2.6.4	Paalun taivutusmurtokestävyys .....	34
2.6.5	Paalun mitoittava nurjahduskapasiteetti.....	41
2.7	Rrpilecalc .....	43
2.7.1	Advanced FEM .....	43
2.7.2	Taivutusmurtokestävyiden erot .....	44
3	ALUSTALUVUT.....	47
3.1	Karkearakeisen maan alustaluku .....	47
3.2	Hienorakeisen maan alustaluku .....	48
3.2.1	Pohjatutkimuksien vaikutus tuloksiin .....	48
3.3	Nurjahduksen tarpeellisuuden tarkistaminen.....	51
4	LÄHTÖTIEDOT PAALUJEN NURJAHDUSTUTKIMUKSIIN.....	53
4.1	Nurjahduskuormat .....	53
4.2	Vaakasiirtymä FEM.....	54
5	POHDINTA.....	57
	LÄHTEET.....	59

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyö tehtiin SSAB Europe Oy:lle. SSAB on maailmanlaajuisesti toimiva teräs-yhtiö. Tuotantolaitokset sijaitsevat Suomessa, Ruotsissa ja Yhdysvalloissa. SSAB on jaettu viiteen eri divisioonaan: SSAB Special Steels, SSAB Europe, SSAB Americas, Tibnor ja Ruukki Construction. SSAB on maailmanmarkkinoiden johtava tuottaja karkaistuissa ja päästetyissä teräksissä, nauha-, kvarttolevy- ja putkituotteissa sekä rakentamisen ratkaisuihin. (www.ssab.com)

Paaluperustusta käytetään yleensä sellaisissa kohteissa missä maan kantavuus on heikko ja rakenteilta tulevat kuormat siirretään kantavaan maaperään tai kallioon. Paalutyypit valitaan yleensä pohjaolosuhteiden, kuormitusten sekä ympäröivien rakenteiden perusteella. Näin halutaan löytää mahdollisimman kustannustehokkain ratkaisu.

Paalutyypit voidaan jakaa maata syrjäyttäviin ja maata syrjäyttämättömiin paaluihin. Maata syrjäyttäviin paaluihin voidaan katsoa teräsbetoniset lyöntipaalut, teräksiset lyöntipaalut, puupaalut sekä lyötävät avoimet paalut. Maata syrjäyttämättömiin paaluihin kuuluvat: kaivinpaalut, porattavat teräspaalut ja CFA-paalut. Tässä työssä tarkastellaan pelkästään lyötäviä teräspuutkipaaluja. (Paalutusohje 2011, 2011, 15)

Paalun suunnittelussa voidaan huomioida mm. seuraavia mitoitusrajatiloja: paaluperustuksen geotekninen kestävyys, vetokestävyys, nousu tai paalun nurjahtaminen (Paalutusohje 2011, 2011, 47). Tässä työssä keskitytään pelkästään paalun nurjahdustarkasteluihin. Mitoituksessa paalut kuormitetaan pelkästään pystykuormille ja poikittaiskuormia ei oteta huomioon.

Opinnäytetyö sisältää paalun eri nurjahdustarkasteluita. Merkittävämpänä osana työtä on selvittää nurjahduslaskentamenetelmien eroja maittain. Vertailumainaan käytetään Suomea, Ruotsia sekä Saksaa. Tavoitteena on löytää maittain eroja välivaiheissa sekä lopullisessa mitoittavassa nurjahduskapasiteetissa. Työ sisältää myös muita tarkasteluita, kuten alustalukujen vaikutusta paalun nurjahduskestävyyteen ja Rrpilecalcin Advanced FEM lisäosan tuloksien eroja Paalutusohjeen 2011 tuloksiin.

Opinnäytetyö suoritetaan kirjallisuustutkielmana. Taustatutkimus suoritetaan tutustumalla rakennusalan julkaisuihin, kirjoihin, artikkeleihin ja internet-sivustoihin.

## 2 NURJAHDUSLASKENTATAPOJEN VERTAILU

Kun verrataan maiden välisiä maakohtaisia kansallisia ohjeita ja määräyksiä, on selvää että laskentatavoista syntyy eroja. Olosuhteet maiden välillä ovat erilaiset ja kunkin maan ohjeet ovat syntyneet kokemuksen ja tarpeiden mukaisesti. Tässä työssä tarkastellaan Suomen ja Ruotsin kansallisten ohjeiden ja määräysten sekä Saksassa toteutettujen koe-kuormitusten perusteella laadittujen mitoitusohjeiden eroja paalun nurjahduskestävyyttä laskiessa. Tarkasteltavina kohteina ovat lyötävät teräspuikipaalut, mutta työssä otetaan myös yleisesti kantaa teräsbetonipaalujen nurjahduskestävyyden laskentatapaan.

### 2.1 Teräspuikipaalun geometriset poikkileikkaussuureet ja kapasiteetti

Paalun nurjahdusmurtokestävyyttä varten on laskettava paalun geometriset poikkileikkaussuureet ja kapasiteetti puristukselle sekä taivutukselle. Tässä kappaleessa on esitetty teräspuikipaalun poikkileikkauksen kapasiteetin sekä tehollisten poikkileikkaussuureiden laskenta.

Nurjahduskestävyyttä laskettaessa tarvittavat poikkileikkaussuureet ovat paaluputken poikkileikkauksen pinta-ala, jäyhyysmomentti sekä taivutusvastus.

Paaluputken poikkileikkauksen pinta-ala voidaan laskea seuraavasti:

$$A_{s1} = \frac{\pi}{4} * (d_{eff}^2 - (d - 2 * t_{eff})^2) \quad (1)$$

$d_{eff}$  = putken ulkohalkaisija korroosiovähennys huomioituna

$d$  = putken ulkohalkaisija

$t_{eff}$  = putken seinämän paksuus sisäpuolinen korroosiovähennys huomioituna

Paaluputken jäyhyysmomentti saadaan kaavasta:

$$I_{s1} = \frac{\pi}{64} * (d_{eff}^4 - (d - 2 * t_{eff})^4) \quad (2)$$

Teräsputken kimmainen taivutusvastus saadaan kaavasta:

$$W_{el} = 2 * I_{s1} / d_{eff} \quad (3)$$

Kun tarvittavat poikkileikkaussuureet on laskettu, paalun poikkileikkauksen puristuskestävyys  $F_{c;u}$  ja taivutuskestävyys  $M_u$  murtorajatilassa voidaan laskea seuraavasti:

$$F_{c;u} = f_{yd} * A_{s1} \quad (4)$$

$$M_u = n * W_{el} * f_{yd} \quad (5)$$

$f_{yd}$  = teräksen puristuslujuuden mitoitusarvo

$A_{s1}$  = teräspaalun poikkileikkauksenpinta-ala

$n$  = poikkileikkausluokasta riippuva muotokerroin

Poikkileikkausluokasta riippuvalla muotokertoimella muutetaan kimmainen taivutusvastus plastiseksi. Ruotsissa kertoimen arvona käytetään  $n = 1,25$ , kun taas Suomessa kertoimen arvona käytetään  $n = 1,2$ .

Teräksen puristuslujuuden mitoitusarvo Suomessa ja Ruotsissa voidaan laskea seuraavasti:

$$f_{yd} = \gamma_s * f_{yk} \quad (6)$$

$\gamma_s$  = paalumateriaalin osavarmuusluku (Suomessa = 1,0 Ruotsissa = 0,9)

$f_{yk}$  = teräksen puristuslujuuden ominaisarvo

Taulukko 1. Ruotsin osavarmuuskerroin teräksen mitoituslujuudelle

Betongpålar	$\mu_c = 0,6 - 0,9$
Stålpålar	$\mu_s = 0,7 - 0,9$

Teräksen puristuslujuuden mitoitusarvo Saksassa voidaan laskea seuraavasti:

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s \quad (7)$$

$\gamma_s$  = paalumateriaalin osavarmuusluku (Saksassa = 1,1)

$f_{yk}$  = teräksen puristuslujuuden ominaisarvo

## 2.2 Teräsbetonipaalujen geometriset poikkileikkaussuureet ja kapasiteetti

Teräsbetonipaalun nurjahduskestävyys lasketaan samalla periaatteella kuin teräspaalun. Teräsbetonipaaluilla taivutusjäykkyyden, poikkileikkauksen puristuskestävyyden ja taivutuskestävyyden määrittäminen eroaa kuitenkin huomattavasti teräspaaluista. Tässä kappaleessa on käyty yleisesti läpi teräsbetonipaalun taivutusjäykkyyden sekä poikkileikkauksen kapasiteetin laskeminen.

Teräsbetonipaalun taivutusjäykkyys saadaan kaavasta:

$$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s \quad (8)$$

$E_{cd}$  = betonin kimmokertoimen mitoitusarvo

$I_c$  = betonipoikkileikkauksen jäyhyysmomentti

$E_s$  = raudoituksen kimmokertoimen mitoitusarvo (210 000 N/mm<sup>2</sup>)

$I_s$  = raudoituksen jäyhyysmomentti betonin painopisteen suhteen

$K_c$  = halkeilun, virumisen ym. vaikutusten kerroin

$K_s$  = raudoituksen vaikutuksen kerroin (SFS-EN 1992-1, 5.8.7.2)

Betonin jäyhyysmomentti  $I_c$  ja raudoituksen jäyhyysmomentti  $I_s$  saadaan kaavoista:

$$I_c = \pi * \frac{b^4}{12} \quad (9)$$

$$I_s = \frac{A_s}{4} * (d - d_c)^2 \quad (10)$$

$A_s$  = terästen pinta-ala

$d_c$  = terästen betonipeite

$d$  = terästen etäisyys ulkopinnasta

$b$  = paalun sivumitta

Betonin kimmokertoimen mitoitusarvo  $E_{cd}$  saadaan kaavasta:

$$E_{cd} = E_{cm} * \gamma_{ce} \quad (11)$$

missä  $E_{cm}$  on betonin sekanttikerroin ja  $\gamma_{ce}$  on betonin osavarmuusluku (SFS-EN 1992-1, 5.8.6)

$K_c$  ja  $K_s$  ovat kertoimia mitkä ovat riippuvaisia raudoituksen ja betonipoikkileikkauksen alan suhteesta  $\rho$

$$\rho = A_s / A_c \quad (12)$$

missä,

$A_s$  = raudoituksen kokonaisala

$A_c$  = betonipoikkileikkauksen ala (SFS-EN 1992-1, 5.8.7.2)

Jos  $\rho \geq 0,002$  niin voidaan käyttää seuraavia kertoimia:

$$K_s = 1$$

$$K_c = \frac{k_1 k_2}{1 + \varphi_{ef}} \quad (13)$$

missä  $k_1$  betonin lujuusluokasta riippuvainen kerroin ja  $k_2$  on normaalivoimasta ja hoikkukuudesta riippuvainen kerroin

$$k_1 = \sqrt{f_{ck}/20} \quad (14)$$

$$k_2 = n * 0,30 \leq 0,20 \quad (15)$$

missä,

$f_{ck}$  = betonin lieriölujuus

$$n = N_{ed}/(A_c f_{cd}) \text{ (SFS-EN 1992-1, 5.8.7.2)} \quad (16)$$

Jos  $\rho \geq 0,01$  niin voidaan käyttää seuraavia kertoimia:

$$K_s = 0$$

$$K_c = 0,3(1 + \varphi_{ef}) \quad (17)$$

missä  $\varphi_{ef}$  on virumisaste (SFS-EN 1992-1, 5.8.4)

Teräsbetonipaalun poikkileikkauksen kapasiteetti murtorajatilassa:

$$N_u = A_c * f_{cd} + A_s * f_{yd} \quad (18)$$

$$M_u = N_s * z + N_{sc} * (t_{sc} - \frac{y}{2}) \quad (19)$$

$N_u$  = puristuskestävyys murtorajatilassa

$M_u$  = taivutuskestävyys murtorajatilassa

$A_c$  = betonin poikkileikkauspinta-ala

$A_s$  = raudituksen poikkileikkauspinta-ala

$f_{cd}$  = betonin puristuslujuuden mitoitusarvo

$f_{yd}$  = raudituksen lujuuden mitoitusarvo

$t_{sc}$  = puristusterästen etäisyys paalun puristuspinnoista

$z$  = sisäinen momenttivarsi

Poikkileikkauksen taivutuskestävyyttä varten lasketaan neutraaliakselin  $x$  paikka, joka ratkaistaan tasapainoehdosta yhtälön 20 sekä yhtälöiden 21 - 25 avulla. Tämän jälkeen voidaan ratkaista puristuspuunnan tehollinen korkeus, puristuserästen venymä, betonin puristuskapasiteetti ja puristuserästen kapasiteetti. (Utarainen, V, 2013, Teräsbetonipaalun kalliokärjen laatuvaatimukset, 95-99)

Tasapainoehto, josta ratkaistaan neutraaliakselin  $x$  paikka

$$N_c = N_s + N_{sc} \quad (20)$$

Tasapainoehdosta betonin puristuskapasiteetti lasketaan seuraavasti:

$$N_c = b * y * f_{cd} \quad (21)$$

Puristuspuunnan tehollinen korkeus määritetään seuraavasti:

$$y = 0,8 * x \quad (22)$$

$x$ =neutraaliakseli

$y$ =puristuspuunnan tehollinen korkeus

Tasapainoehdosta vetoterästen vetovoimakapasiteetti lasketaan seuraavasti:

$$N_s = A_{st} * f_{yd} \quad (23)$$

Tasapainoehdosta puristuserästen kapasiteetti lasketaan seuraavasti:

$$N_{sc} = E_s * \varepsilon_{sc} * A_{sc} \quad (24)$$

$N_{sc}$  = puristuserästen kapasiteetti

$E_s$  = raudoituksen kimmokerroin

$\varepsilon_{sc}$  = puristuserästen venymä

$A_{sc}$  = puristuserästen pinta-ala

Puristuserästen venymä määritetään seuraavasti:

$$\varepsilon_{sc} = \frac{\varepsilon_s \cdot (t_{st} - x)}{x} \quad (25)$$

$\varepsilon_s$  = vetoterästen venymä

$t_{st}$  = vetoterästen etäisyys paalun alapinnasta

$\varepsilon_{sc}$  = puristuserästen venymä

Kun paalun taivutuskestävyyttä varten on saatu laskettua vetoterästen vetovoimakapasiteetti, puristuserästen kapasiteetti, puristuserästen etäisyys paalun alapinnasta ja puristuspinnan tehollinen korkeus, lasketaan vielä sisäinen momenttivarssi. Tämän jälkeen voidaan laskea paalun taivutuskestävyys murtorajatilassa.

Paalun sisäinen momenttivarssi saadaan yhtälöstä:

$$z = d - \frac{y}{2} \quad (26)$$

$d$  = paalun tehollinen korkeus

$y$  = puristuspinnan tehollinen korkeus

Paalun tehollinen korkeus saadaan yhtälöstä:

$$d = h - t_{st} \quad (27)$$

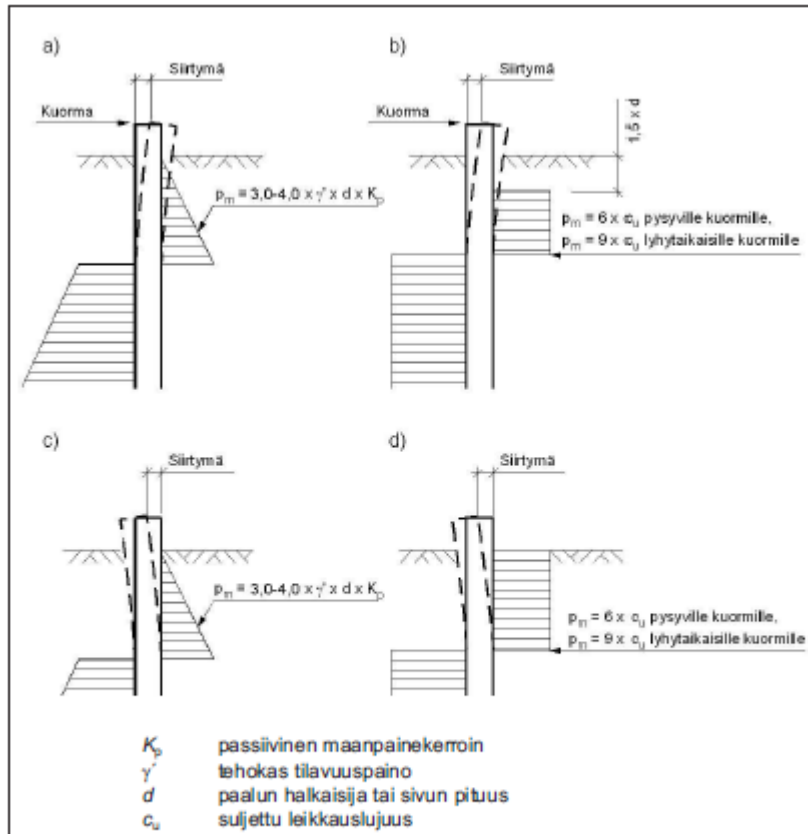
$d$  = paalun korkeus

$t_{st}$  = vetoterästen etäisyys paalun alapinnasta

### 2.3 Paalutusohjeen 2011 mukainen laskentatapa

RILin julkaisemassa ”Paalutusohje 2011” esitetään Suomessa käytettävä käsinlaskentamenetelmä aksiaalisesti kuormitetun paalun nurjahduskestävyydelle. Puristuskestävyys nurjahduksen suhteen tarkistetaan sellaisissa olosuhteissa, missä paalut saattavat nurjahduttaa riittävän sivutuen puuttuessa. (Paalutusohje 2011, 2011, 106)

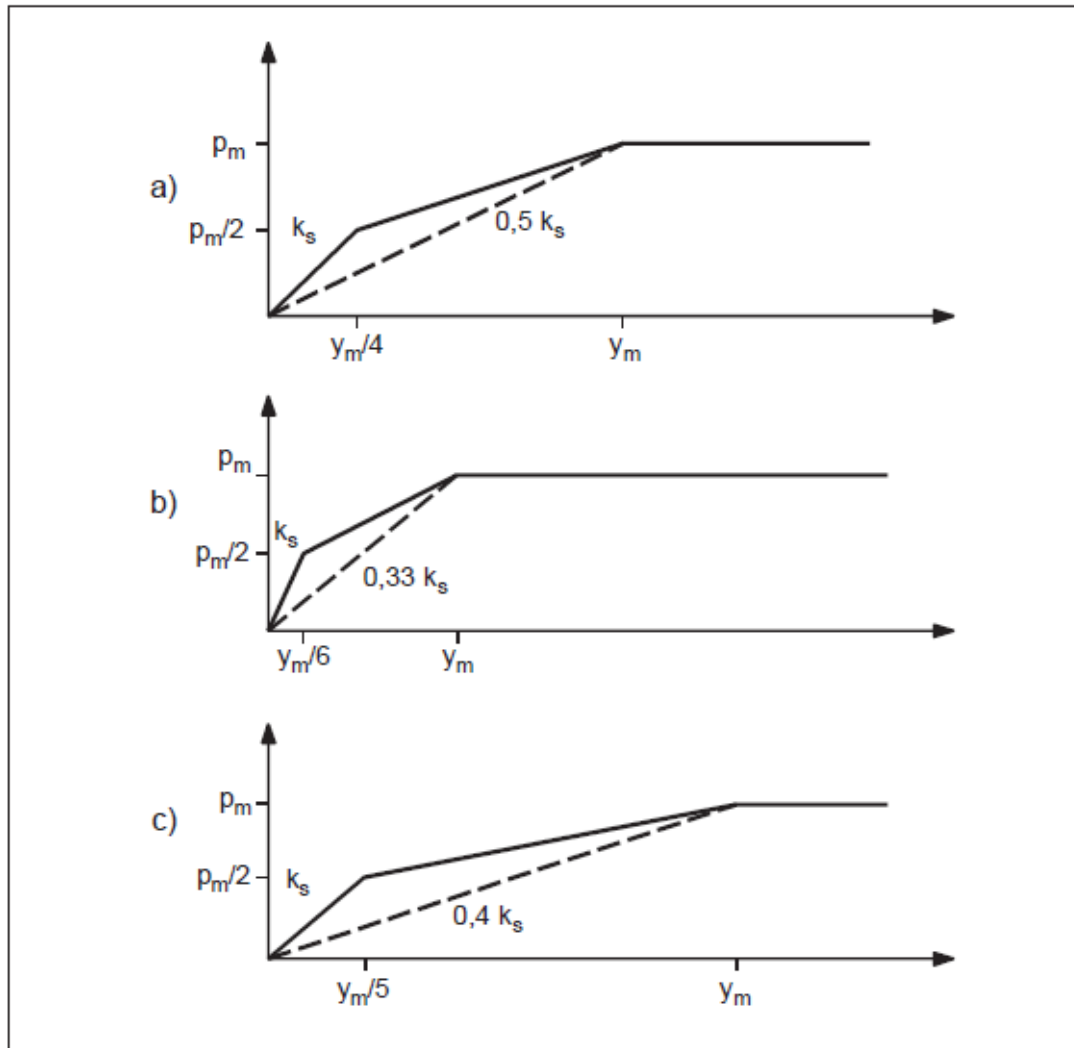
Paalun nurjahduskestävyyttä tarkastellaan kahdessa tapauksessa, kun paalun taipumasta aiheutuva sivupaine ylittää maan sivuvastuksen murtoarvon  $p_m$  tai paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys ylittyy. Maan sivuvastuksen murtoarvo  $p_m$  voidaan määrittää kuvasta 1. (Paalutusohje 2011, 2011, 109)



Kuva 4.11. Sivuvastuksen ääriarvot  $p_m$  (ominaisarvot) jäykälle paalulle; a) karkearakeisessa maassa, b) hienorakeisessa maassa ja sivukuormituksen murtoarvot jäykälle paalulle; c) karkearakeisessa maassa, d) hienorakeisessa maassa.

Kuva 1. Sivuvastuksen ääriarvot (Paalutusohje 2011, 2011, 109)

Nurjahdustarkasteluissa käytetään ns. alustalukumenetelmää. Paalun ympäröivä maaperä kuvataan jousisarjana, missä jousien jäykkyys esitetään alustaluvuilla. Käsien laskentamenetelmässä jouset lasketaan lineaarisina lähtötilanteesta maan murtoon asti. Tämä on esitetty katkoviivana kuvassa 2. Tietokoneilla jouset voidaan mallintaa epälineaarisina, joka kuvataan kuvassa 2 ehjänä viivana.



Kuva 4.13. Paalun sivupaine-siirtymäyhteys a) karkearakeisessa maassa, b) lyhytaikainen kuormitus hienorakeisessa maassa ja c) pitkäaikainen kuormitus hienorakeisessa maassa.

Kuva 2. Paalun sivupaine-siirtymäyhteys (Paalutusohje 2011, 2011, 95)

Alustaluku  $k_s$  voidaan Paalutusohjeen mukaan määrittää hienorakeisessa maassa ja vaativissa pohjarakennuskohteissa (GL2) suljetun leikkauslujuuden  $c_u$  perusteella seuraavasti:

Pitkäaikaisessa kuormituksessa

$$k_s = 20 \dots 50 * \frac{c_u}{d} \quad (28)$$

Lyhytaikaisessa kuormituksessa

$$k_s = 50 \dots 150 * \frac{c_u}{d} \quad (29)$$

Nurjahdustarkasteluissa paalulle määritetään asentamisen jälkeinen alkutaipuma ennen kuormitusta. Kuormittamattoman paalun käyryys riippuu paalun ja jatkosten mittapoikkeamista, paalun jatkosten määrästä, paalun mitoista, paalun asennustavasta ja pohjasuhteista.

Nurjahdustarkasteluissa paalun alkutaipuma voidaan laskea geometrisen ja fiktiivisen alkutaipuman summana. Geometrinen alkutaipuma nurjahdustarkasteluissa voidaan määrittää taulukon 2 perusteella. Kokemuksen mukaan teräksisten lyöntipaalujen kaarevuussäteet ovat vaikeissa olosuhteissa ja lyhyitä paaluelementtejä käyttäessä pienimmillään  $1000 \cdot d$ . Kun taas helpoissa olosuhteissa ja käyttäessä pitkiä paaluelementtejä kaarevuussäteet ovat olleet noin  $2000 \dots 2500 \cdot d$ . (Paalutusohje 2011,2011,107)

Taulukko 2. Paalun geometrinen alkutaipuma (Paalutusohje 2011, 2011, 107)

**Taulukko 4.21.** Paalun geometrinen alkutaipuma nurjahdustarkasteluissa.

	Jatkamaton paalu	Jatkettu paalu
Alkutaipuma $\delta_g$ [m] (taipuma tarkastettavissa, esim. avoin profiili)	$L_{cr}/300 - L_{cr}/600$	$L_{cr}/200 - L_{cr}/400$
Alkutaipuma $\delta_g$ [m] (taipumaa ei voida tarkastaa, esim. umpiprofiilit)	$L_{cr}/300$	$L_{cr}/150$

Fiktiivisessä alkutaipumassa otetaan huomioon teräksen valmistuksesta johtuvat jäännösjännitykset ja alkukäyryys. Fiktiivinen alkutaipuma voidaan laskea taulukosta 3, missä ryhmään b kuuluvat pituus- ja kierresaumahitsatut teräsputket ja ryhmään c kuuluvat massiiviset pyörötangot. (Paalutusohje 2011,2011,109)

Taulukko 3. Fiktiivinen alkutaipuma (Paalutusohje 2011,2011,109)

**Taulukko 4.22.** Fiktiivinen alkutaipuma.

Ryhmä	Fiktiivinen alkutaipuma $\delta_f$
a	$0,0003 \cdot L_{cr}$
b	$0,0013 \cdot L_{cr}$
c	$0,0025 \cdot L_{cr}$

Laskennallinen alkutaipuma saadaan fiktiivisen ja geometrisen alkutaipuman summana

$$\delta_0 = \delta_g + \delta_f \quad (30)$$

$\delta_g$  = paalun geometrinen alkutaipuma

$\delta_f$  = paalun fiktiivinen alkutaipuma

Alkutaipumaa määrittäessä täytyy myös laskea kriittinen nurjahduspituus  $L_{cr}$ , missä vaikuttavina tekijöinä ovat paalun taivutusjäykkyys, alustaluku sekä paalun halkaisija.

$$L_{cr} = \pi * \sqrt[4]{\frac{EI}{k_s * d_{eff}}} \quad (31)$$

$EI$  = paalun taivutusjäykkyys

$k_s$  = maan alustaluku

$d_{eff}$  = paalun halkaisijan tehokas leveys ( Paalutusohje 2011, 2011, 107)

### 2.3.1 Taipuneen paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa

Nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa saadaan silloin kun paalun taipumasta aiheutuva sivupaine ylittää paalua ympäröivän maan sivuvastuksen murtoarvon  $p_m$ . Tässä nurjahdustarkastelussa otetaan huomioon suoran paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa, maan alustaluku, geometrinen alkutaipuma ja sivuvastuksen murtoarvo.

Taipuneen paalun nurjahduskestävyys riittävän sivutuen puuttuessa saadaan kaavasta:

$$F_{d,s} = \frac{F_{cr}}{1 + \frac{k_s * \delta_g}{p_m}} \quad (32)$$

$F_{d,s}$  = taipuneen paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa

$F_{cr}$  = suoran paalun nurjahdusmurtokestävyys (Kaava 33)

$\delta_g$  = paalun geometrinen alkutaipuma (Taulukko 2)

$p_m$  = sivuvastuksen ääriarvo (Kuva 1)

$k_s$  = maan alustaluku

Suoran paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa lasketaan seuraavasti:

$$F_{cr} = 2 * \sqrt{k_s * d_{eff} * EI} \quad (33)$$

### 2.3.2 Paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys

Paalun nurjahdustarkasteluissa tarkastellaan myös paalun rakenteen taivutusmurtokestävyys eli tapaus kun paalu murtuu. Poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyudessa otetaan huomioon geometrisen ja fiktiivisen alkutaipuman summa, suoran paalun nurjahdusmurtokestävyys ja poikkileikkauksen kapasiteetti.

Paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys lasketaan kaavasta:

$$P_{d;p} = \frac{B}{2} - \sqrt{\frac{B^2}{4} - C} \quad (34)$$

$B$  ja  $C$  ovat aputermejä, mitkä lasketaan seuraavista kaavoista:

$$B = F_{cr} + F_{c;u} + 0,5 * F_{cr} * \delta_0 * \frac{F_{c;u}}{M_u} \quad (35)$$

$$C = F_{cr} * F_{c;u} \quad (36)$$

$F_{cr}$  = suoran paalun nurjahdusmurtokestävyys (Kaava 33)

$F_{c;u}$  = paalun poikkileikkauksen puristuskestävyys murtorajatilassa (Kaava 4)

$M_u$  = paalun poikkileikkauksen taivutuskestävyys murtorajatilassa (Kaava 5)

$\delta_0$  = alkutaipuma (Kaava 30)

## 2.4 Pålkommissionen rapportien mukainen laskentatapa

Pålkommissionen on ruotsalainen paalukomitea, joka pyrkii jakamaan tietoa paalutuksesta urakoitsijoille, konsulteille, tutkijoille ja muille alan ammattilaisille. Komitea on laatinut Ruotsiin standardoidut paalumateriaalit ja paalutusohjeet. Komitean jäseninä toimivat niin urakoitsijat, paaluvalmistajat, tutkijat kuin konsultit. Komitealla on ollut suuri vaikutus paalutustekniikoiden kehittämiseen ja ohjeisiin Ruotsissa. Uusia raportteja laaditaan ja vanhoja päivitetään jatkuvasti paalutustekniikoiden ja suunnitteluohjeiden

muuttuessa. Kaikki suunnitteluohjeiden raportit on löydettävissä Pålkommissionen verkkosivuilta ja ne voidaan ladata veloitusetta.

Maan alustaluku määritetään samalla periaatteella kuin Suomessa, mutta alustalukuker-  
toimet vaihtelevat. Maan alustaluku Ruotsin normien mukaisesti pitkäaikaisessa kuormi-  
tuksessa saadaan kaavasta:

$$k_d = 50 * c_{ud}/d_{eff} \quad (37)$$

Maan alustaluku lyhytaikaisessa kuormituksessa saadaan kaavasta:

$$k_d = 200 * c_{ud}/d_{eff} \quad (38)$$

$c_{ud}$  = maan suljettu leikkauslujuuden mitoitusarvo

$d_{eff}$  = putken ulkohalkaisija korroosiovähennys huomioon otuna

Alustalukua laskettaessa käytetään maan suljetun leikkauslujuuden mitoitusarvoa

$$c_{ud} = \frac{c_{uk}}{\gamma_n * \gamma_{mk}} \quad (39)$$

$\gamma_n$  = osavarmuuskerroin, joka riippuu turvallisuusluokasta (Taulukko 4)

$\gamma_{mk}$  = suljetun leikkauslujuuden osavarmuusluku ( $\gamma_{mk} = 1,5$ )

Taulukko 4. Osavarmuuskerroin riippuen turvallisuusluokasta (Pålkommissionen, Raport 94, 12)

- $\gamma_n = 1,0$  i säkerhetsklass 1 (SK1)
- $\gamma_n = 1,1$  i säkerhetsklass 2 (SK2)
- $\gamma_n = 1,2$  i säkerhetsklass 3 (SK3)

Kriittinen nurjahduspituus määritetään samaan tapaan kuin Paalutusohjeessa, mutta ruot-  
salaisessa menetelmässä teräksisille lyöntipaaluille käytetään redusoitua kimmokerrointa.  
Porattavilla teräsraudoilla kimmokerrointa ei redusoida.

Kriittinen nurjahduspituus Pålkommissionen raporttien mukaan:

$$l_k = \pi * \sqrt[4]{\frac{E_d * I}{k_d * d}} \quad (40)$$

$E_d$  = redusoitu kimmokerroin ( kaava 41)

$I$  = paalun taivutusjäykkyys

$k_d$  = maan alustaluku

$d$  = paalun halkaisija

Redusoitu kimmokerroin saadaan kaavasta:

$$E_d = 0,9 * \frac{E_k}{\gamma_n * \gamma_m} \quad (41)$$

$E_k$  = teräksen kimmokertoimen ominaisarvo

$\gamma_n$  = osavarmuuskerroin, joka riippuu turvallisuusluokasta (Taulukko 4)

$\gamma_m$  = materiaalin osavarmuuskerroin (teräsraudoilla = 1,0 ratakiskopaalut =1,1)

#### 2.4.1 Taipuneen paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa

Pålkommissionen raporttien ohjeiden mukainen paalun nurjahduskestävyys maan murtuessa ei eroa Paalutusohjeesta merkittävästi. Kaavoja tarkasteltaessa periaate ei muutu, mutta kaavat johdetaan eri tavalla. Paalun nurjahduskestävyys riittävän sivutuen puuttuessa esitetään Pålkommissionen raportissa 84a.

Taipuneen paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa saadaan kaavasta:

$$P = \frac{1-\delta_0}{\delta_0+\gamma_0} * P_k \quad (42)$$

$\delta_0$  = paalun alkutaipuma

$P_k$  = suoran paalun nurjahduskestävyys maan murtuessa

$\gamma_0$  = paalun taipuma maan murtuessa (Kuva 3)

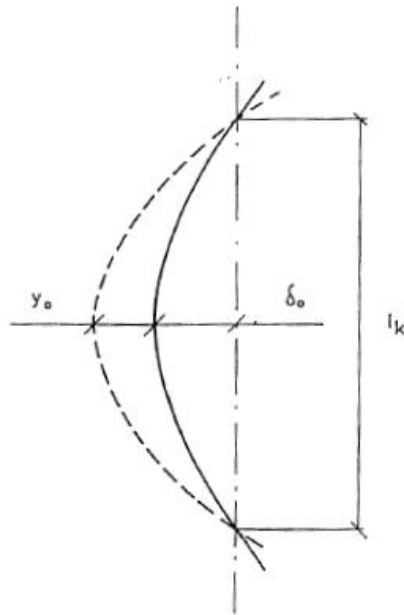


Fig. 5. Antagen initialutböjning vid analytisk beräkningsmetod.

Fig. 5. Assumed initial curvature for the analytical solution.

Kuva 3. Paalun taipuma paalun nurjahtaessa (Pålkommissionen, Raport 84a, 23)

Suoran paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa saadaan kaavasta:

$$P_k = 2 * \sqrt{k_d * d * E_d * I} \quad (43)$$

$k_d$  = maan alustaluvun mitoitusarvo

$d$  = paalun halkaisija

$E_d$  = teräksen redusoitu kimmokerroin

$I$  = paalun taivutusjäykkyys

Paalutusohjeeseen verrattuna ruotsalaisessa menetelmässä otetaan erikseen huomioon myös paalun taipuma maan murtuessa, mikä saadaan seuraavasta kaavasta:

$$\gamma_0 = \frac{q_{bd}}{k_d} * d \quad (44)$$

$q_{bd}$  = maan sivuvastuksen murtoarvo

$k_d$  = maan alustaluku

$d$  = paalun halkaisija

Paalun laskennallinen alkutaipuma saadaan kuten paalutusohjeessa geometrisen ja fiktiivisen alkutaipuman summana (kaava 30). Fiktiivisen alkutaipuman kerroin katsotaan kuten paalutusohjeessa taulukosta 3.

#### 2.4.2 Paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys

Vaikka maan murtokapasiteetti ylittyisikin, laskentaa jatketaan paalun varren 2 kertaluvun kuormituksenä, kunnes paalu murtuu. Paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys lasketaan kaavasta:

$$P = \left(1 - \frac{\delta_0}{\delta_0 + \gamma_{01}}\right) * P_{kl} \quad (45)$$

$$P_{kl} = P_k * \sqrt{\frac{k_{de}}{k_d}} \quad (46)$$

$k_{de}$  = alustaluvun ekvivalentti mitoitusarvo

$k_d$  = alustaluvun mitoitusarvo

$$\frac{k_{de}}{k_d} = \frac{2}{\pi} * (\alpha + 1,5 * \sin(2 * \alpha) - (\pi - 2 * \alpha) * \sin^2 \alpha) \quad (47)$$

$$\alpha = \sinh \frac{0,18 * d}{\gamma_{01}} \quad (48)$$

$d$  = paalun halkaisija

$\gamma_{01}$  = paalun taipuma ( $\gamma_{01} > \gamma_0$ )

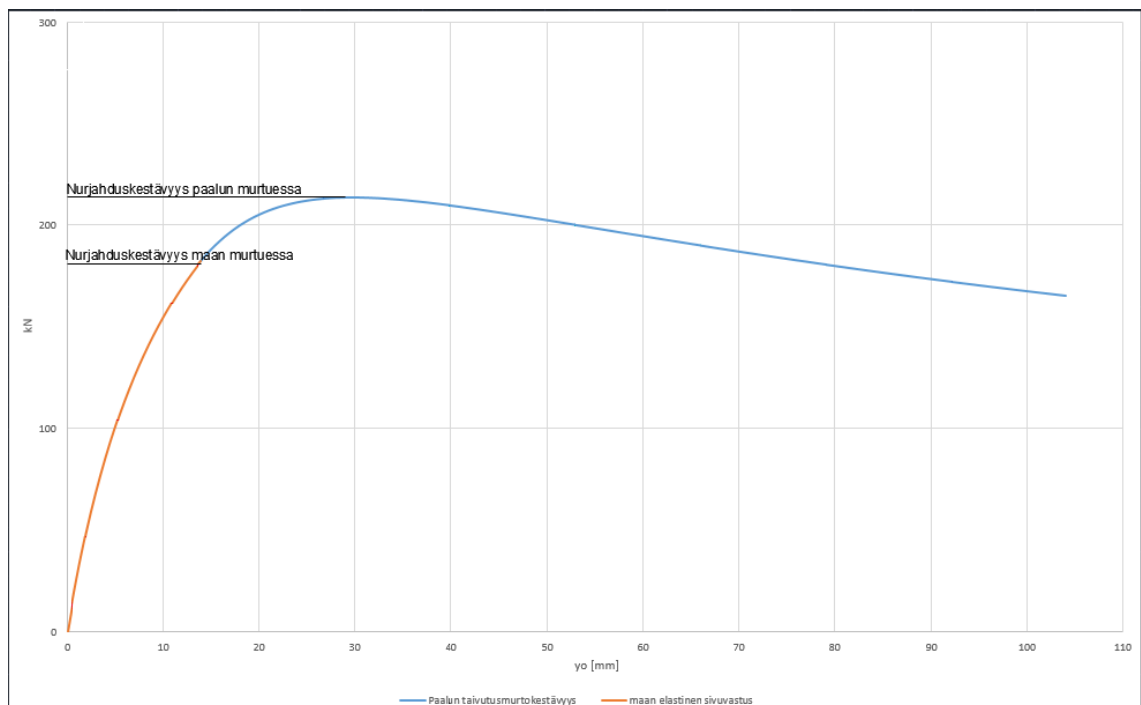
Paalun nurjahduskestävyyden kapasiteettia tarkastellaan kuvaajan 1 mukaisesti. Laskentavaiheet kuvaajalle voidaan jakaa seuraavasti:

### Nurjahduskestävyys maan murtuessa

- Lasketaan taipuneen paalun nurjahduskestävyys maan murtuessa (yhtälö 42).
- Lasketaan taipuneen paalun sivusiirtymä maan murtuessa (yhtälö 44).
- Kun tiedetään taipuneen paalun nurjahduskestävyys maan murtuessa ja sivusiirtymä maan murtuessa, lasketaan käyrän väliarvot muuttamalla paalun sivusiirtymää yhtälössä 42.
- Paalun sivusiirtymä on oltava pienempi tai yhtä suuri kuin paalun sivusiirtymä maan murtuessa.
- Tästä saadaan kuvaajan 1 punainen käyrä.

### Nurjahdusmurtokestävyys paalun murtuessa

- Kun saadaan kuvaajan 1 punainen osuus paalun nurjahduskestävyydelle maan murtuessa, jatketaan laskentaa paalun toisen kertaluvun kuormituksena. Käytetään yhtälöitä 45-48.
- Paalun taipumaa  $y_{01} > \gamma_0$  muutetaan yhtälössä 48 ja muodostetaan siniselle käyrälle väliarvoja. Tätä toistetaan kunnes käyrä alkaa laskemaan.
- Tästä saadaan kuvaajan 1 sininen käyrä.



Kuvaaja 1. Nurjahdusmurtokestävyys – sivusiirtymä muutos

Punaisen käyrän huippuarvo edustaa kuvaajassa 1 paalun nurjahduskestävyyttä maan murtuessa. Sinisen käyrän huippuarvo edustaa kuvaajassa 1 paalun nurjahduskestävyyttä paalun murtuessa.

## 2.5 Stefan Vogt:in mukainen laskentatapa

Laskentakaavat perustuvat Stefan Vogtin julkaisemaan artikkeliin ” Buckling of slender piles in soft soils ”. Artikkelissa tutkitaan pienpaalujen nurjahdustarkastelun tarpeellisuutta, kun maan suljettu leikkauslujuus on yli 15 kPa tai 10 kPa. Suoritetuissa koekuorituksissa käytettiin 4m pitkiä pienpaaluja, jotka olivat upotettu pehmeään saveen. Artikkelin laskentakaavat perustuvat suoritettuihin paalutesteihin.

Maan alustaluku määritetään kaavasta:

$$60 * c_u \leq k_l \leq 100 * c_u \quad (49)$$

Maan sivuvastuksen arvo murtorajatilassa saadaan kaavasta:

$$6 * c_u * d \leq p_f \leq 12 * c_u * d \quad (50)$$

Maan sivuvastuksen arvo riippuen paalun taipumusta

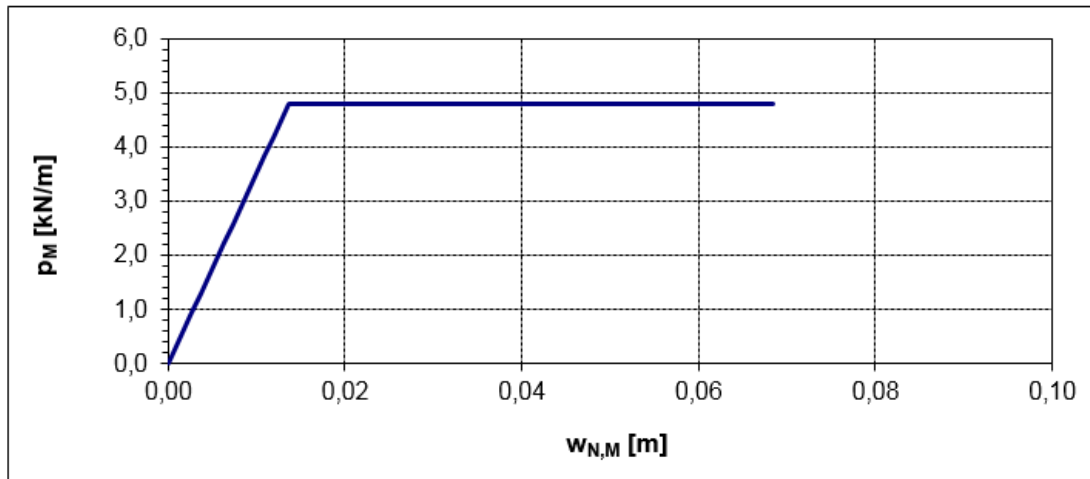
$$p_m = w_{N,M} * k_l \quad w_{N,M} \leq w_{ki} \quad (51)$$

$$p_m = p_f \quad w_{N,M} > w_{ki} \quad (52)$$

$w_{ki}$  = paalun sivusiirtymä maan murtuessa

$w_{N,M}$  = paalun sivusiirtymä

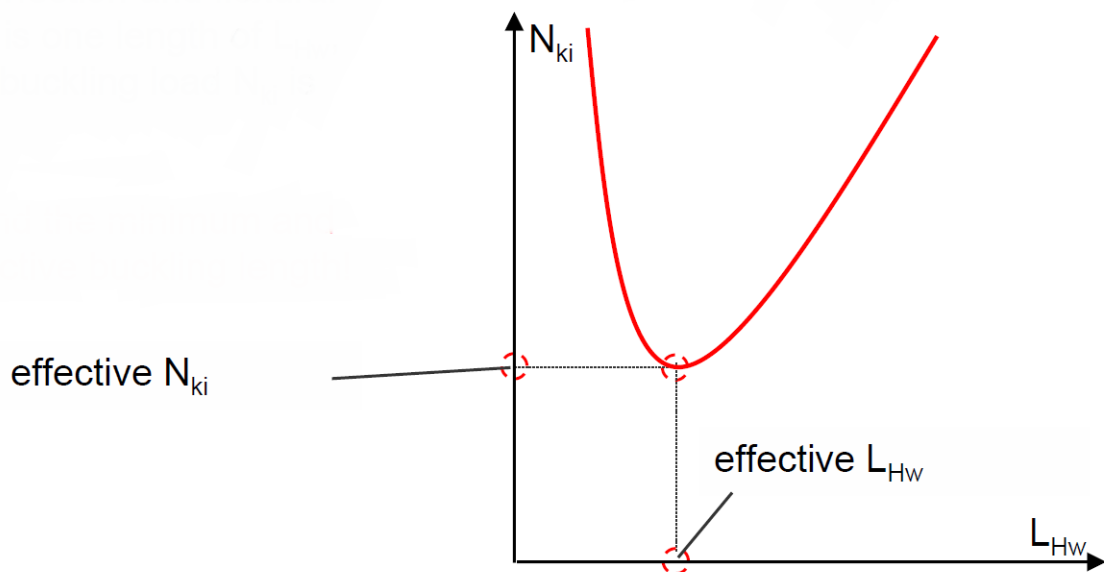
Maan sivuvastuksen arvoa voidaan tarkastella kuvaajan 2 mukaisesti. Maan sivuvastuksen arvo  $p_m$  kasvaa lineaarisesti siihen pisteeseen asti, että se saavuttaa murtorajatilansa (kaava 52). Sivuvastuksen arvo ei voi ylittää murtorajatilansa arvoa. Maan sivuvastuksen arvo ennen murtorajatilaa määräytyy paalun taipumasta ja maan alustaluvusta (kaava 51).



Kuvaaja 2. Sivuvastus – taipuman muutos

### 2.5.1 Taipuneen paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa

Paalutusohjeeseen ja Pålkommissionen rapporteihin poiketen paalun nurjahduskestävyys maan murtuessa  $N_{ki}$  ja kriittinen nurjahduspituus  $L_{hw}$  iteroidaan. Määritetyille parametreille (maan alustaluku, paalun käyryys, taivutusjäykkyys ja paalun taipuma maan murtuessa) on vain yksi nurjahduspituuden  $L_{hw}$  arvo, kun paalun nurjahduskestävyys  $N_{ki}$  on pienemmillään (kuva 4).



Kuva 4. Kriittinen nurjahduspituus (Presentation - Vogt - Second Lizzi Scholarship - Buckling of Slender Piles)

Nurjahduskestävyys maan murtuessa  $N_{ki}$  ja kriittinen nurjahduspituus  $L_{hw}$  iteroidaan seuraavasta yhtälöstä:

$$N_{ki} = \frac{w_{ki} * (EI) * \left(\frac{\pi}{L_{HW}}\right)^2 + p_f * \left(\frac{L_{HW}}{\pi}\right)^2}{w_{ki} + \left(\frac{L_{HW}}{imp}\right)} \quad (53)$$

$EI$  = paalun taivutusjäykkyys

$L_{hw}$  = kriittinen nurjahduspituus

$imp$  = paalun kaarevuus ( $imp = 0 - 2000$ )

$w_{ki}$  = sivusiirtymä maan murtuessa

$N_{ki}$  = nurjahduskestävyys maan murtuessa

Kuten Ruotsalaisessa menetelmässä, saksalaisessa menetelmässä otetaan erikseen huomioon myös paalun taipuma maan murtuessa, mikä saadaan seuraavasta kaavasta:

$$w_{ki} = \frac{p_f}{k_l} \quad (54)$$

$p_f$  = maan sivuvastuksen arvo murtorajatilassa

$k_l$  = maan alustaluku

### 2.5.2 Paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys

Paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyyttä varten on laskettava ja piirrettävä kaksi käyrää. Paalulle lasketaan toisen kertaluvun mukaisen menetelmän nurjahduskestävyys sekä sektori, jonka ulkopuolella paalun poikkileikkaus on täysin plastisessa tilassa. Näiden käyrien leikkauspisteestä saadaan paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys.

Paalun toisen kertaluvun mukaisen menetelmän nurjahduskestävyys saadaan kaavasta:

$$N = \frac{w_{N,M} * \frac{\pi^2}{L_{HW}^2} * EI + \frac{1}{\pi^2} * p_M * L_{HW}^2}{w_{N,m} + \frac{L_{HW}}{imp}} \quad (55)$$

$N$  = paalun nurjahduskestävyys paalun taipuman kohdalla

$w_{n,m}$  = paalun taipuma

$L_{hw}$  = kriittinen nurjahduspituus

$p_m$  = maan sivuvastuksen arvo riippuen paalun taipumasta (kaavat 51 ja 52)

$imp$  = paalun kaarevuus

Sektorin, jonka ulkopuolella paalu poikkileikkaus on täysin plastisessa tilassa. Lasketaan käyttämällä kaavoja 54 ja 55.

$$N = N_{pl} * w_{N,M} \quad (56)$$

$$w_{M,pl} = \frac{M_{pl} \cdot L_{HW}^2}{\pi^2 \cdot EI} * \left( 1 - \left( \frac{N}{N_{pl}} \right)^\alpha \right) - \frac{L_{HW}}{imp} \quad (57)$$

$N$  = paalun nurjahduskestävyys paalun taipuman kohdalla (kaava 56)

$N_{pl}$  = poikkileikkauksen puristuskestävyys

$M_{pl}$  = poikkileikkauksen taivutuskestävyys

$L_{hw}$  = kriittinen nurjahduspituus

$w_{n,m}$  = paalun taipuma

$\alpha$  = yksinkertaistettu vuorovaikutus eksponentti (1...2)

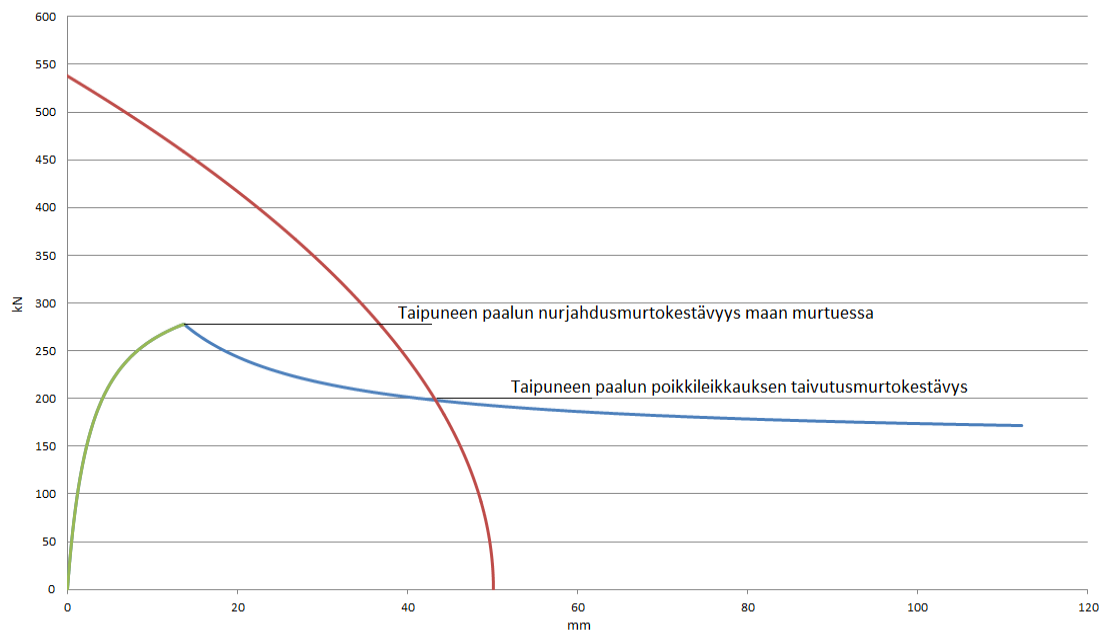
Paalun nurjahduskapasiteetin kuvaaja 3 voidaan jakaa vaiheisiin seuraavasti:

Nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa:

- Iteroidaan yhtälöstä 53 paalun kriittinen nurjahduspituus  $L_{hw}$  ja nurjahduskestävyys maan murtuessa  $N_{ki}$
- Lasketaan taivutusmurtokestävyys maan murtoon asti yhtälöllä 55. Muutetaan paalun taipumaa niin kauan kunnes paalu saavuttaa taipuman maan murtuessa (kuvaajassa 3 vihreä käyrä). Yhtälössä 55 maan sivuvastuksena käytetään yhtälöä 51.
- Tästä saadaan käyrä taipuneen paalun nurjahdusmurtokestävyys maan murtuessa
- Kuvaajassa 3 tämä on esitetty vihreällä värillä

Poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys

- Lasketaan nurjahduskestävyyden loppu osa yhtälöllä 55. Lisätään paalun taipumaa  $w_{n,m}$  ja käytetään paalun sivuvastuksen murtoarvoa yhtälön 52 mukaisesti.
- Käyrän loppu osa on esitetty kuvaajassa 3 sinisellä värillä
- Lasketaan sektori jonka ulkopuolella paalun poikkileikkaus on täysin plastisessa tilassa (kaavat 56 ja 57). Kuvaajassa 3 tämä on esitetty punaisena käyränä.
- Käyrien leikkauspisteestä saadaan poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys.



Kuvaaja 3. Paalun nurjahduskapasiteetti

## 2.6 Laskentamenetelmien eroavaisuudet

Laskentamenetelmien eroavuuksien havaitsemiseksi, tarkastellaan millaisia eroja menetelmien välille syntyy samoilla lähtöarvoilla. Vertailulaskelmissa tarkastellaan erikseen nurjahduskestävyyttä maan murtumisessa ja paalun murtumisessa. Lopuksi tarkastellaan paalujen mitoittavaa nurjahduskapasiteettia ja miten eri menetelmillä siihen on päädytty.

Vertailulaskelmat on tehty Suomessa yleisesti käytetyille SSAB:n RR75 ja RR90 lyöntipaaluille. Paalujen geometrisenä alkutaipumana on käytetty  $L_{cr}/400$  ja maakerroksen suljettuna leikkauslujuutena 7 kPa. Paalu sijaitsee koko nurjahduspituudeltaan hienoraikaisessa maassa. Maan alustalukukertoimena kaikissa menetelmissä on käytetty 50 ja sivuvastuksen ääriarvokertoimena 9. Korroosiovaraa paaluissa ei ole otettu huomioon. Paalujen poikkileikkausarvot on esitetty taulukoissa 5 ja 6. Yhteneväiset lähtötiedot saattavat erota maiden kansallisista ohjeista, mutta koska tässä tarkastellaan eri laskentamenetelmien aiheuttamia eroja, on lähtötiedot pyritty ottamaan samanlaisiksi.

Taulukko 5. RR75 ominaisuudet

<b>Paalun ominaisuudet</b>		
RR75		
$f_{yk}$	440	N/mm <sup>2</sup>
t	6,3	mm
d	76,1	mm
A	1381	mm <sup>2</sup>
I	848185	mm <sup>4</sup>
W	22291	mm <sup>3</sup>
$E_k$	210000	N/mm <sup>2</sup>

Taulukko 6. RR90 ominaisuudet

<b>Paalun ominaisuudet</b>		
RR90		
$f_{yk}$	440	N/mm <sup>2</sup>
t	6,3	mm
d	88,9	mm
A	1635	mm <sup>2</sup>
I	1402361	mm <sup>4</sup>
W	31549	mm <sup>3</sup>
$E_k$	210000	N/mm <sup>2</sup>

### 2.6.1 Osavarmuuskertoimet

Ruotsissa käytettävät osavarmuuskertoimet

- $\mu_s = 0,7-0,9$  (teräksen korjauskerroin)
- $\gamma_n = 1,1$  (normaalisti SK2 paaluille)
- $\gamma_m = 1,0$  (materiaalin osavarmuuskertoimen kimmomoduulille)
- $\gamma_{mk} = 1,5$  (maan kestävyuden osavarmuusluku)

Suomessa käytettävät osavarmuuskertoimet

- $\gamma_s = 1,0$  (paalumateriaalin osavarmuusluku)
- $\gamma_{cu} = 1,5$  (suljetun leikkauslujuuden osavarmuusluku)

Saksassa käytettävät osavarmuuskertoimet

- $\gamma_s = 1,1$  (paalumateriaalin osavarmuusluku)
- $\gamma_{mk} = 1,5$  (maan kestävyuden osavarmuusluku)

### 2.6.2 Alustalukujen erot maittain

Alustalukuihin maiden välille saatiin eroja. Kaavoissa 26 ja 27 on esitetty Suomessa käytettävät alustalukukertoimet, mitkä vaihtelevat 20...50 pitkäaikaisessa kuormituksessa ja 50...150 lyhytaikaisessa kuormituksessa. Vogtin artikkelissa alustalukukertoimille vaihteluväliksi annettiin 60...100. Vogtin ohjeessa alustaluvuille ei oteta huomioon paalun halkaisijaa (kaava 49), kun muissa menetelmissä tämä otetaan huomioon. Paalun halkaisija otetaan huomioon Vogtin ohjeessa vasta sivuvastusta määrittäessä (kaava 50).

Ruotsin alustaluvun määrittäminen poikkesi muista menetelmistä. Maan alustalukua määrittäessä maan suljettuna leikkauslujuutena on käytetty osavarmuusluvuilla laskettu maan leikkauslujuuden mitoitusarvo  $c_{ud}$ , jolloin alustalukuarvo pienenee merkittävästi. Suomen ja Saksan alustaluku määritetään ilman maan suljetun leikkauslujuuden osavarmuuskeroainta.

Alustaluvun määrittäminen Paalutusohjeen mukaan

$$k_s = 50 * \frac{7kPa}{d} = 350 kPa/d \quad (\text{kaava 28})$$

Alustaluvun määrittäminen Stefan Vogtin artikkelin mukaan

$$k_d = 50 * 7kPa = 350 kPa \quad (\text{kaava 49})$$

Alustaluvun määrittäminen Pålkommissionen rapottien mukaan

$$c_{ud} = \frac{7 kPa}{1,0 * 1,5} = 4,67 kPa \quad (\text{kaava 39})$$

$$k_d = 50 * \frac{4,67kPa}{d} = 233,33 kPa/d \quad (\text{kaava 37})$$

Taulukko 7. Maan alustalukuarvot maittain

Alustalukuarvot	
Suomi	350 kPa/d
Saksa	350 kPa
Ruotsi	233 kPa/d

### 2.6.3 Nurjahduskestävyys maan murtuessa

Voidaan olettaa, että menetelmillä syntyy eroja, koska kaikki menetelmät poikkeavat toisistaan. Tarkastellaan jokaisen menetelmän paalun nurjahduskestävyyttä maan murtuessa välivaiheittain, joista nähdään mistä kohdista menetelmiin eroja syntyy.

Tässä nurjahdustarkastelussa täytyy määrittää paalun kriittinen nurjahduspituus. Suomen ja Ruotsin tapaa varten täytyy myös laskea alkutaipuma ennen kuormitusta ja suoran paalun nurjahduskestävyys. Esimerkkilaskut on esitetty pelkästään RR75 paalulle.

Paalutusohjeen mukainen kriittinen nurjahduspituus  $L_{cr}$

$$L_{cr} = \pi * 4 \sqrt{\frac{\frac{210000 \frac{N}{mm^2} * 848185 \frac{mm^4}{1000000}}{350 \frac{kPa}{d} * 76,1mm * 1000}}{}} = 2,65 m \quad (\text{kaava 31})$$

Palkkommissionen raporttien mukaan lyöntipaalun kriittistä nurjahduspituutta  $l_k$  varten täytyy laskea myös redusoitu kimmokerroin  $E_d$  teräkselle

$$E_d = 0,9 * \frac{\frac{210000N}{mm^2}}{1,0*1,0} = 189000N/mm^2 \quad (\text{kaava 41})$$

$$l_k = \pi * 4 \sqrt{\frac{\frac{189000 \frac{N}{mm^2}}{1000000} * 848185 \frac{mm^4}{100000}}{233 \frac{kPa}{d} * 76,1mm * 1000}} = 2,86 m \quad (\text{kaava 40})$$

Saksan menetelmässä paalun kriittinen nurjahduspituus joudutaan iteroimaan yhtälöstä 53, josta saadaan suoraan nurjahduspituus

$$L_{hw} = 2,76 m \quad (\text{kaava 53})$$

Suomen ja Ruotsin menetelmää varten lasketaan paalun alkutaipuma. Suomen menetelmässä otetaan huomioon vain paalun geometrinen alkutaipuma. Laskettaessa Ruotsin menetelmällä otetaan huomioon sekä geometrisen että fiktiivisen alkutaipuman summa.

Paalutusohjeen mukainen geometrinen alkutaipuma

$$\delta_g = \frac{2,65}{400} m * 1000 = 6,63 mm \quad (\text{taulukko 2})$$

Palkkommissionen mukainen fiktiivisen ja geometrisen alkutaipuman summa

$$\delta_0 = \frac{2,86m}{400} + 0,0013 * 2,86m = 10,87 mm \quad (\text{kaava 30})$$

Suomen menetelmästä poiketen, Ruotsin ja Saksan menetelmässä lasketaan erikseen myös paalun taipuma maan murtuessa. Suomen menetelmässä tätä ei oteta erikseen huomioon.

Palkkommissionen mukaan paalun taipuma maan murtuessa

$$\gamma_0 = \frac{9*4,67 kPa}{50*4,67 kPa} * 76,1 mm = 13,70 mm \quad (\text{kaava 44})$$

Stefan Vogtin artikkelin mukaan paalun taipuma maan murtuessa

$$w_{ki} = \frac{9 \cdot 7 \text{ kPa}}{50 \cdot 7 \text{ kPa}} * 76,1 \text{ mm} = 13,70 \text{ mm} \quad (\text{kaava 54})$$

Suomen ja Ruotsin menetelmää varten lasketaan vielä suoran paalun nurjahduskestävyys. Ruotsin menetelmässä pitää ottaa huomioon teräksen redusoitu kimmokerroin lyöntipaaluille. Saksan menetelmässä suoran paalun nurjahduskestävyyttä ei oteta erikseen huomioon.

Pålkommissionen mukaan suoran paalun nurjahduskestävyys

$$P_k = 2 * \frac{\sqrt{233 \text{ kPa} * 189000 \text{ N/mm}^2 * 848185 \text{ mm}^4}}{1000000000} = 387 \text{ kN} \quad (\text{kaava 43})$$

Paalutusohjeen mukaan suoran paalun nurjahduskestävyys

$$F_{Cr} = 2 * \frac{\sqrt{350 \text{ kPa} * 210000 \text{ N/mm}^2 * 848185 \text{ mm}^4}}{1000000000} = 499 \text{ kN} \quad (\text{kaava 33})$$

Taulukko 8. Väliarvot maittain nurjahduskestävyydelle maan murtuessa

RR75				
	Nurjahduspituus	Alkutaipuma	Taipuma maan murtuessa	Suoran paalun kestävyys
Suomi	2,65 m	6,63 mm	-	499 kN
Saksa	2,76 m	-	13,70 mm	-
Ruotsi	2,86 m	10,87 mm	13,70 mm	386 kN
RR90				
	Nurjahduspituus	Alkutaipuma	Taipuma maan murtuessa	Suoran paalun kestävyys
Suomi	3,01 m	7,52 mm	-	642 kN
Saksa	3,12 m	-	16,02 mm	-
Ruotsi	3,24 m	12,32 mm	16,02 mm	497 kN

Samoilla lähtöarvoilla saadaan jo välivaiheissa selviä eroja. Nurjahduspituutta laskettaessa suurin ero löydetään Suomen ja Ruotsin välille. Tämä johtuu siitä että Ruotsin menetelmässä redusoidaan teräksen kimmokerrointa lyöntipaaluille sekä käytetään maan alustaluvun mitoitusarvoa. Suomen menetelmässä käytetään ominaisarvoja teräksen kimmokertoimelle sekä maan alustaluvulle laskettaessa paalun nurjahduspituutta.

Alkutaipuma Suomen ja Ruotsin välillä on merkittävä. Suomen menetelmässä, kun lasketaan paalun nurjahduskestävyyttä maan murtuessa, käytetään vain paalun geometristä alkutaipumaa. Ruotsin menetelmässä huomioidaan sekä fiktiivinen että geometrinen alkutaipuma. Tästä syystä erot alkutaipumien välille ovat niin suuret menetelmien välillä.

Suoran paalun nurjahduskestävyydeksi saadaan Suomen menetelmällä selvästi suurempi arvo kuin Ruotsin menetelmällä. Ruotsin menetelmällä saadaan RR90 paalulle sama arvo kuin Suomen menetelmällä saadaan RR75 paalulle. Ruotsin menetelmässä kestävyyttä vähentävinä tekijöinä ovat teräksen redusoitu kimmokerroin ja maan alustaluvun mitoitussarvo. Samaan tapaan kuin nurjahduspituutta laskiessa, Suomen menetelmässä käytetään näille ominaisarvoja.

Kun tarvittavat välivaiheet on saatu laskettua, voidaan laskea paalun nurjahduskestävyys maan murtuessa. Taulukossa 9 on esitetty saadut arvot nurjahduskestävyydelle maan murtuessa, josta esimerkkilaskut on esitetty RR75 paalulle.

Paalutusohjeen mukaan paalun nurjahduskestävyys maan murtuessa

$$F_{d,s} = \frac{499 \text{ kN}}{1 + \left( \frac{350 \text{ kPa}}{76,1 \text{ mm} \cdot 6,63 \text{ mm}} \right) / 42 \text{ kPa}} = 289 \text{ kN} \quad (\text{kaava 32})$$

Pålkommissionen raporttien mukaan paalun nurjahduskestävyys maan murtuessa

$$P = \frac{13,70 \text{ mm}}{(10,87 \text{ mm} + 13,70 \text{ mm})} * 387 \text{ kN} = 216 \text{ kN} \quad (\text{kaava 42})$$

Stefan Vogtin artikkelin mukaan saadaan suoraan iteroimalla paalun nurjahduskestävyys maan murtuessa

$$N_{ki} = 278 \text{ kN} \quad (\text{kaava 53})$$

Taulukko 9. RR75 ja RR90 nurjahduskestävyys maan murtuessa

RR75	
Nurjahduskestävyys maan murtuessa	
Suomi	289 kN
Saksa	278 kN
Ruotsi	216 kN
RR90	
Nurjahduskestävyys maan murtuessa	
Suomi	377 kN
Saksa	359 kN
Ruotsi	281 kN

Suurimmat erot paalun nurjahduskestävyydelle maan murtuessa saadaan Suomen ja Ruotsin välille. Kuten väliarvoja määrittäessä huomattiin, Ruotsin menetelmässä redusoidaan teräksen kimmokerrointa lyöntipaaluille sekä käytetään maan alustaluvun mitoitusarvoa. Nämä arvot heikentävät Ruotsin menetelmällä paalun nurjahduskestävyyttä tässä nurjahdustarkastelussa. Jos käytettäisiin näiden arvojen ominaisarvoja, saataisiin samat tulokset kuin Suomen menetelmässä.

#### 2.6.4 Paalun taivutusmurtokestävyys

Vertaillaan paalujen murtokestävyyttä nurjahduksen suhteen, kun paalun poikkileikkauksen rakenteen taivutusmurtokestävyys ylittyy eli kun paalu murtuu. Jokaisella menetelmällä on omanlaisensa tapa laskea paalun nurjahduskestävyys paalun murtuessa. Esimerkkilaskuissa aluksi käydään läpi Suomen menetelmä, jonka jälkeen Saksan menetelmä ja lopuksi Ruotsin menetelmä. Käytetään samoja lähtöarvoja kuin laskiessa paalun nurjahdusmurtokestävyyttä maan murtuessa. Esimerkkilaskut ovat esitetty RR75 paalulle.

Suomen menetelmä poikkeaa muista menetelmistä selvästi ja on yksinkertaisempi. Määrittäessä paalun nurjahduskestävyyttä paalun murtuessa, Suomen menetelmässä tarvitsee laskea vain aputermit  $B$  ja  $C$ . Aputermejä  $B$  ja  $C$  varten täytyy laskea paalun poikkileikkauksen puristuskestävyys ja taivutuskestävyys murtorajatilassa sekä paalun geometrisen ja fiktiivisen alkutaipuman summa.

Paalutusohjeen mukaan paalun puristuskestävyys  $F_{c,u}$  ja taivutuskestävyys  $M_u$  murtorajatilassa

$$F_{c,u} = 1381 \text{ mm}^2 * \frac{440 \text{ N}}{\text{mm}^2} = 608 \text{ kN} \quad (\text{kaava 4})$$

$$M_u = 1,2 * 22291 \text{ mm}^3 * 440 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 11,8 \text{ kNm} \quad (\text{kaava 5})$$

Paalutusohjeen mukaan paalun geometrisen ja fiktiivisen alkutaipuman summa

$$\delta_0 = 6,63 \text{ mm} + 0,0013 * 2,65 \text{ m} = 0,01008 \text{ m} = 10,08 \text{ mm} \quad (\text{kaava 30})$$

Aputermit  $B$  ja  $C$  voidaan laskea kun paalun poikkileikkauksen kapasiteetti sekä geometrisen ja fiktiivisen alkutaipuman summa on nyt laskettu

$$B = 499 \text{ kN} + 608 \text{ kN} + \frac{0,5 * 499 \text{ kN} * 0,01008 \text{ m} * 608 \text{ kN}}{11,8 \text{ kNm}} \quad (\text{kaava 35})$$

$$B = 1237$$

$$C = 499 \text{ kN} * 608 \text{ kN} = 303435 \quad (\text{kaava 36})$$

Paalutusohjeen mukaan paalun nurjahduskestävyys paalun murtuessa

$$P_{d,p} = \frac{1237}{2} - \sqrt{\frac{1237^2}{4} - 303435} = 337 \text{ [kN]} \quad (\text{kaava 34})$$

Saksan menetelmässä laskemista varten on piirrettävä kaksi käyrää, joissa paalulle määritetään toisen kertaluvun mukaisen menetelmän nurjahduskestävyys (kuvaajan sininen käyrä) sekä sektori, jonka ulkopuolella paalun poikkileikkaus on täysin plastisessa tilassa (kuvaajan punainen käyrä). Näiden käyrien leikkauspiste on paalun poikkileikkauksen taivutusmurtokestävyys. Esimerkilaskuissa esitetään periaate RR75 paalun kuvaajan 4 kapasiteetikäyrien laskemiselle.

Lasketaan aluksi kuvaajan vihreä käyrä siihen pisteeseen asti että paalun taipuma saavuttaa maan murren. Laskuissa paalun taipumaa lisätään 0,5 mm kerrallaan ja näin saaduista kestävyiden arvoista saadaan piirrettyä kuvaaja.

$$N = \frac{0,00025m \cdot \frac{\pi^2}{(2,76m)^2} \cdot 178,12 \text{ kNm}^2 + \frac{1}{\pi^2} \cdot 0,00025m \cdot 350 \text{ kPa} \cdot (2,76m)^2}{0,00025 + \frac{2,76m}{1000}} \quad (\text{kaava 55})$$

$$N = 27,74 \text{ kN}$$

Lopulta paalun taipuma saavuttaa sivusiirtymän arvon jolla paalua ympäröivä maa murtuu. Tästä saadaan laskettua vihreän käyrän huippuarvo.

$$N = \frac{0,01375m \cdot \frac{\pi^2}{(2,76m)^2} \cdot 178,12 \text{ kNm}^2 + \frac{1}{\pi^2} \cdot 0,01375m \cdot 350 \text{ kPa} \cdot (2,76m)^2}{0,01375 + \frac{2,76m}{1000}} \quad (\text{kaava 55})$$

$$N = 277,55 \text{ kN}$$

Edellä mainitun vihreän käyrän huippuarvossa maaperä paalun ympärillä saavuttaa sivuvastuksen murtoarvon  $p_m$ . Kuvaajan sininen käyrä saadaan piirrettyä lisäämällä edelleen taipuman arvoa 0,5 mm portaissa, mutta pitämällä sivuvastuksen arvo koko ajan murtoarvona  $p_m$ .

$$p_m = 9 \cdot 7 \text{ kPa} \cdot 0,0761m = 4,794 \text{ kPa/m} \quad (\text{kaava 50})$$

$$N = \frac{0,016m \cdot \frac{\pi^2}{(2,76m)^2} \cdot 178,12 \text{ kNm}^2 + \frac{1}{\pi^2} \cdot 4,794 \text{ kPa/m} \cdot (2,76m)^2}{0,016 + \frac{2,76m}{1000}} \quad (\text{kaava 55})$$

$$N = 262,71 \text{ kN}$$

Määritetään kuvaajan punainen käyrä, joka vastaa taipuneen paalun taivutusmurtokestävyyttä. Normaalivoimaa kasvatetaan tasaisesti ja poikkileikkauksen kestävyuden tasapainoehdosta ratkaistaan maksimi sivusiirtymä.

Sektorin väliarvo kun sivusiirtymä  $w_{n,m}$  on suurimmillaan

$$N = 0,00025 \cdot 572,40 = 0,138 \quad (\text{kaava 56})$$

$$w_{M,pl} = \frac{12,2 \text{ kNm} \cdot (2,76m)^2}{\pi^2 \cdot 178,12 \text{ kNm}^2} \cdot \left( 1 - \left( \frac{0,138}{572,40 \text{ kN}} \right)^2 \right) - \frac{2,76m}{1000} \quad (\text{kaava 57})$$

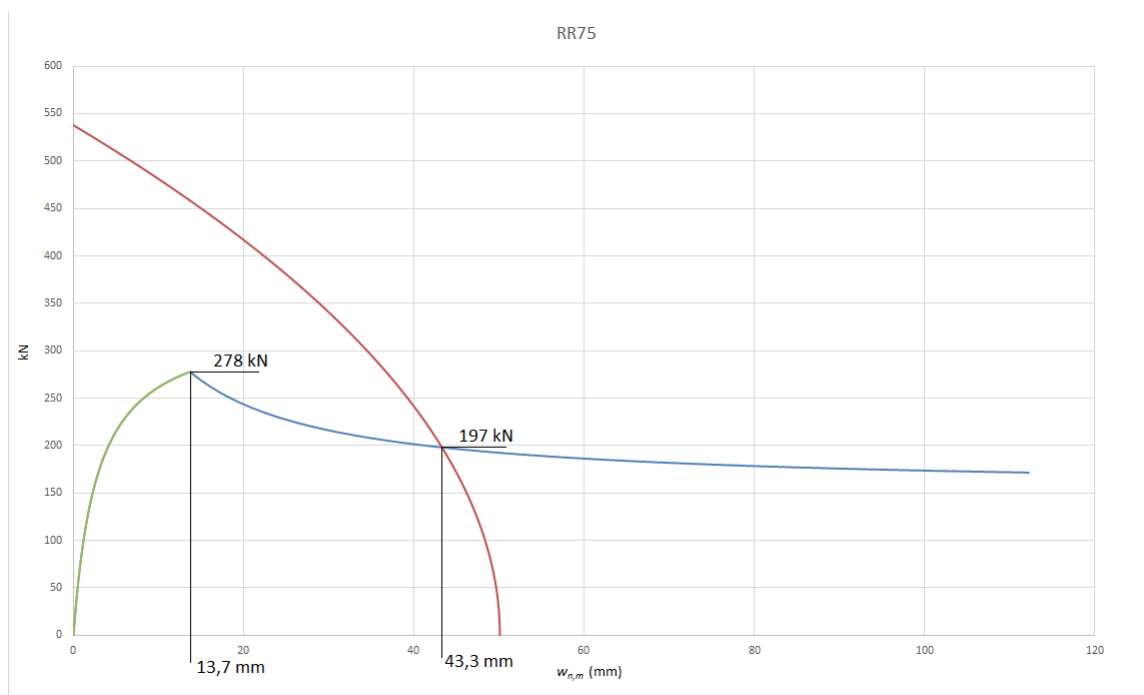
$$w_{M,pl} = 0,0501m$$

Sektorin väliarvo kun taipuma  $w_{n,m} = 0$  mm

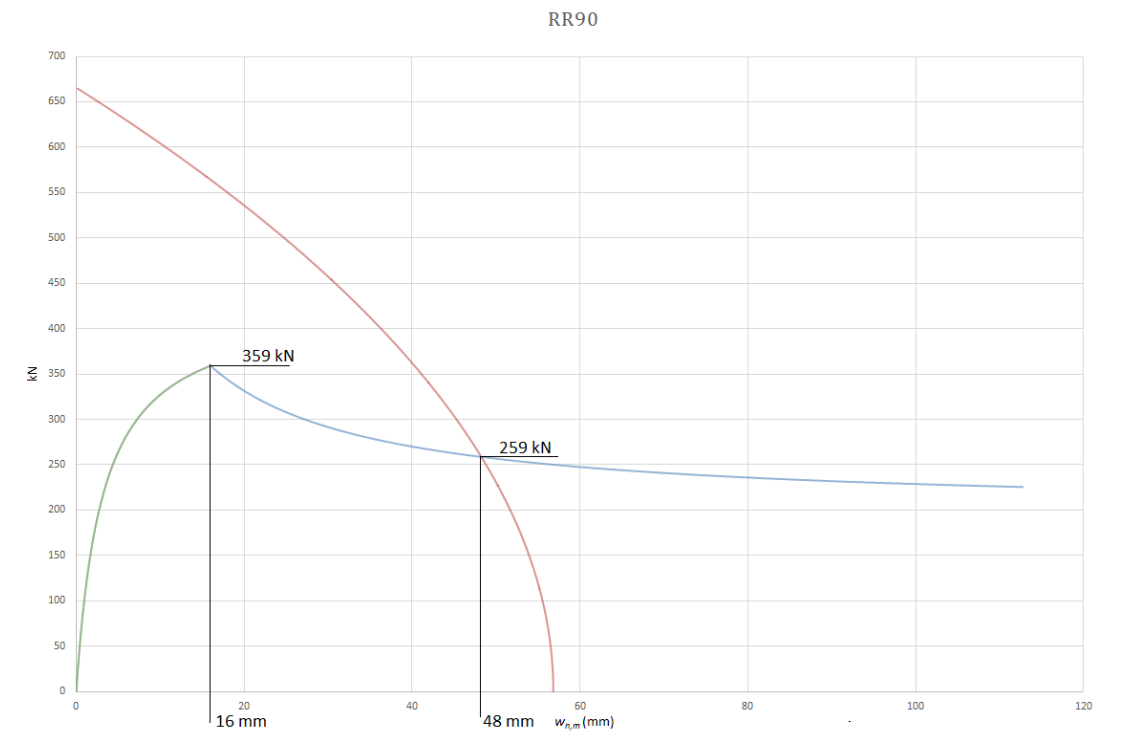
$$N = 0,97375 * 572,40 = 537,89 \quad (\text{kaava 56})$$

$$w_{M,pl} = \frac{12,2 \text{ kNm} * (2,76 \text{ m})^2}{\pi^2 * 178,12 \text{ kNm}^2} * \left( 1 - \left( \frac{537,89}{572,40 \text{ kN}} \right)^2 \right) - \frac{2,76 \text{ m}}{1000} = 0 \text{ mm} \quad (\text{kaava 57})$$

Paalusta voidaan nyt piirtää kuvaaja missä molemmat käyrät näkyvät. Paalun taivutusmurtokestävyys saadaan luettua käyrien leikkauspisteestä. Kuvaajassa 4 on esitetty RR75 paalun kestävyyskäyrät ja kuvaajassa 5 on esitetty RR90 paalun kestävyyskäyrät



Kuvaaja 4. RR75 nurjahduskestävyys Saksan menetelmän mukaan



Kuvaaja 5. RR90 nurjahduskestävyys Saksan menetelmän mukaan

Ruotsin menetelmässä paalun nurjahduskestävyyttä tarkastellaan myös kuvaajalla. Paalun taivutusmurtokestävyys luetaan paalun taivutusmurtokestävyuden käyrän huippuarvosta. Aluksi määritetään kestävyyskäyrä maalle paalun ympärille. Paalun taipumaa lisätään 0,5 mm välein siihen asti, että paalu saavuttaa sivusiirtymän, jolla maa paalun ympärillä murtuu.

$$P = \frac{1-10,87\text{mm}}{10,87\text{mm}+0,5\text{mm}} * 386 \text{ kN} = 17 \text{ kN} \quad (\text{kaava 42})$$

Pienemmällä paalun taipuman lisäysportailta on tarvittaessa mahdollista laskea tarkemmin paalun kestävyys maan murtumispisteessä.

$$P = \frac{1-10,87\text{mm}}{10,87\text{mm}+14\text{mm}} * 386 \text{ kN} = 217 \text{ kN} \quad (\text{kaava 42})$$

Käyrän laskentaa jatketaan yhtälöiden 45- 48 avulla, koska maan murtokapasiteetti on saavutettu. Kaavat on esitetty kappaleessa 2.4.2.

$$\alpha = \sinh \frac{0,18*76,1\text{mm}}{15\text{mm}} = 1,045 \quad (\text{kaava 48})$$

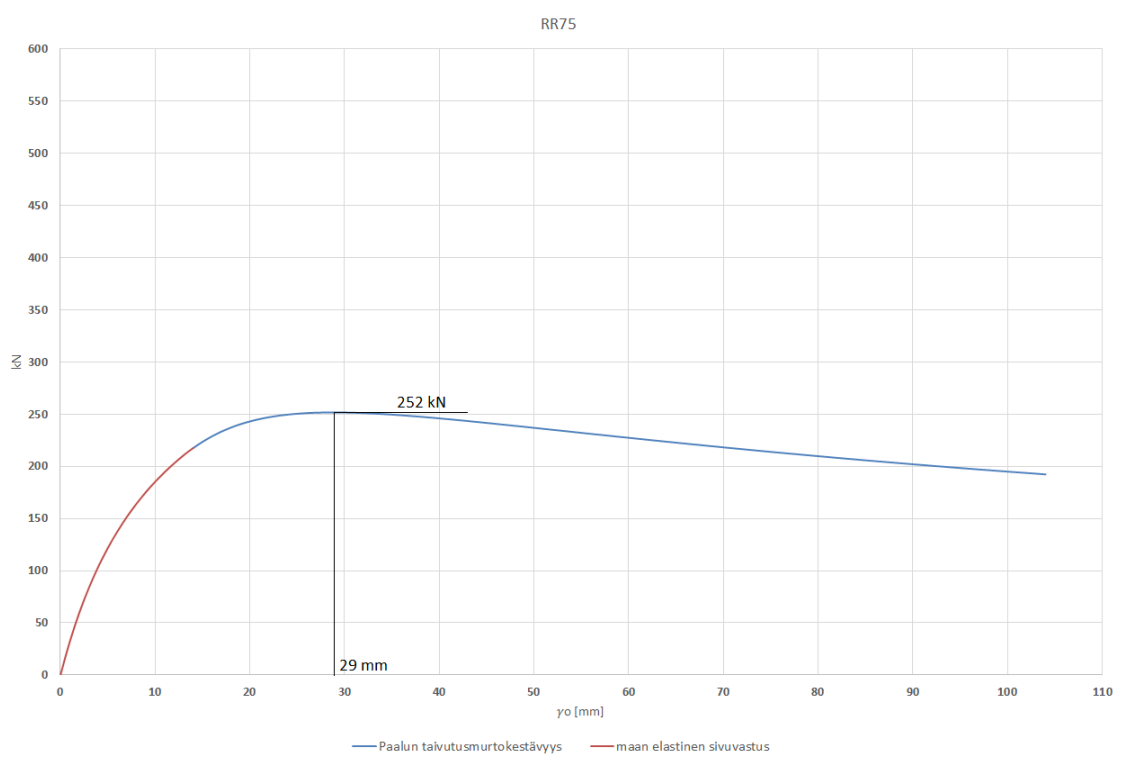
$$\frac{k_{de}}{k_d} = \frac{2}{\pi} * (1,045 + 1,5 * \sin(2 * 1,045) - (\pi - 2 * 1) * \sin^2 1,045)$$

$$\frac{k_{de}}{k_d} = 0,994 \quad (\text{kaava 47})$$

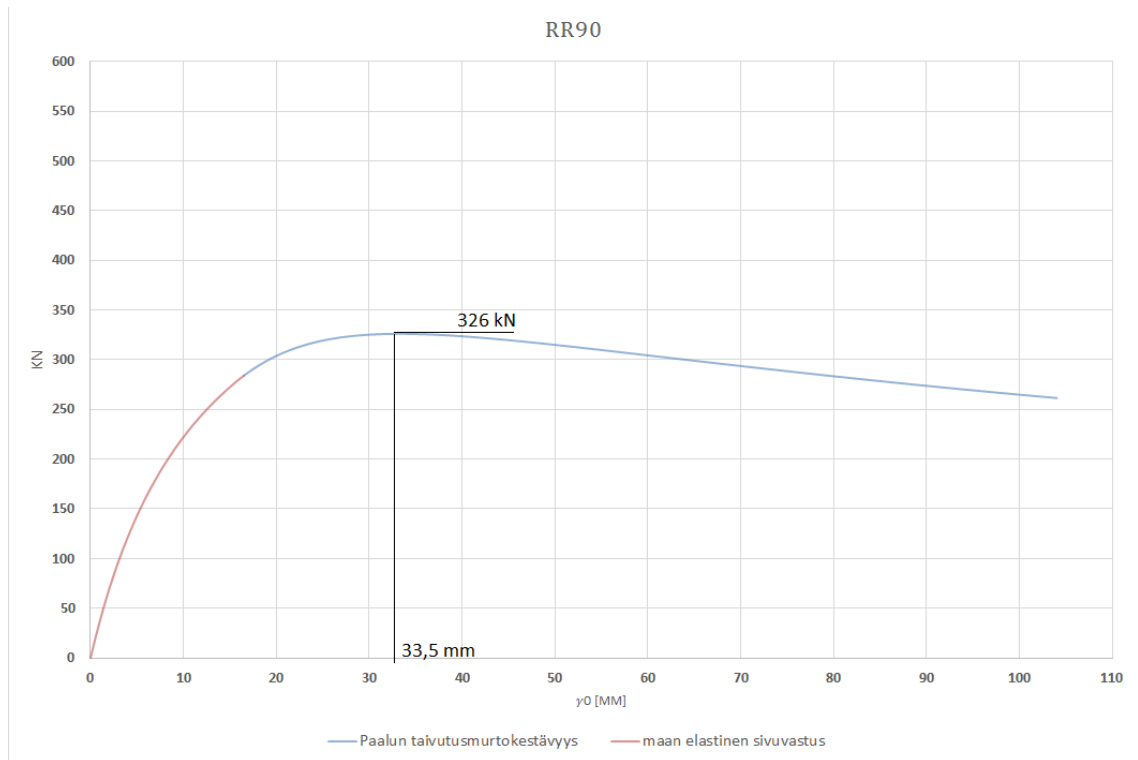
$$P_{kl} = 387 \text{ kN} * 0,994 = 385,56 \text{ kN} \quad (\text{kaava 46})$$

$$P = \left(1 - \frac{10,87 \text{ mm}}{10,87 \text{ mm} + 15 \text{ mm}}\right) * 385,56 \text{ kN} = 224 \text{ kN} \quad (\text{kaava 45})$$

Paalun taipumaa lisätään niin kauan kunnes paalu varsi pettää. Taipuneen paalun taivutusmurtokestävyys luetaan käyrän huippuarvosta. Taipuneen paalun taivutusmurtokestävyys voidaan lukea paalulle RR75 kuvaajasta 6 ja paalulle RR90 kuvaajasta 7.



Kuvaaja 6. RR75 nurjahduskestävyys Ruotsin menetelmän mukaan



Kuvaaja 7. RR90 nurjahduskestävyys Ruotsin menetelmän mukaan

Taulukkoon 9 on kerätty molempien RR75 ja RR90 paalujen taivutusmurtokestävyydet maittain. Suomen menetelmässä saadaan suurin kestävyys paalun taivutusmurtokestävyydelle. Suurin ero löydetään Suomen ja Saksan menetelmän välillä. Saksan menetelmässä paalun taivutusmurtokestävyys alkaa heikkenemään, kun paalu on saavuttanut nurjahduskestävyyden maan murtuessa. Muissa menetelmissä paalun taivutusmurtokestävyys kasvaa verrattuna paalun nurjahduskestävyyteen maan murtuessa.

Myös Ruotsin menetelmässä saadaan selvästi heikompi kestävyys kuin Suomen menetelmässä. Tämä johtuu siitä että Ruotsin menetelmässä maan alustalukuna käytetään mitoitussarvoa ja lyöntipaaluille käytetään teräksen redusoitua kimmokerrointa. Nämä arvot heikentävät suoran paalun nurjahduskestävyyttä ja sitä kautta vaikuttavat paalun taivutusmurtokestävyyteen.

Taulukko 10. RR75 ja RR90 taivutusmurtokestävyydet

RR75	
Taivutusmurtokestävyys	
Suomi	337 kN
Saksa	198 kN
Ruotsi	252 kN
RR90	
Taivutusmurtokestävyys	
Suomi	420 kN
Saksa	259 kN
Ruotsi	326 kN

### 2.6.5 Paalun mitoittava nurjahduskapasiteetti

Tarkastellaan paalun mitoittavaa nurjahduskapasiteettia maiden välillä, kun tiedetään paalun nurjahduskestävyys maan murtuessa ja paalun murtuessa. Suomen menetelmässä asiaa tarkastellaan yksinkertaisesti. Paalulle lasketaan erikseen nurjahduskestävyys maan murtuessa ja paalun murtuessa, joista heikompi kestävyys on mitoittava nurjahduskapasiteetti. Kun tarkastellaan paaluja RR75 ja RR90, molemmissa esimerkeissä pienempi kestävyys saadaan kun lasketaan paalun nurjahduskestävyyttä maan murtuessa ko. olosuhteissa.

Ruotsalaisessa menetelmässä asiaa tarkastellaan selvästi eri tavalla kuin Suomen menetelmässä. Poiketen Suomen menetelmään, nurjahduskapasiteetti ei määräydy heikoimmasta nurjahduskestävyydestä. Vaikka maan murtokapasiteetti ylittyisikin, laskentaa jatketaan paalun varren 2. kertaluvun kuormituksena, kunnes paalu murtuu. Vasta tällöin saavutetaan paalun nurjahduskapasiteetti. Maan murtokapasiteetti tulee määrääväksi vain silloin, kun paalu varren kapasiteetti on pettänyt ennen maan murtokapasiteettia. Esimerkkilaskuissa jatkettiin paalun varren rasittamista 2. kertaluvun kuormituksena siihen pisteeseen asti, että paalu murtui. Tästä saatiin molemmille paaluille RR75 ja RR90 mitoittava nurjahduskapasiteetti. Kuvaajissa 6 ja 7 on esitetty RR75 ja RR90 nurjahduskapasiteetin kuvaajat.

Saksan menetelmässä tarkastellaan Ruotsin menetelmän tavoin kuvaajaa. Menetelmässä tarkastellaan kahden käyrän käyttäytymistä. Kuvaajissa 4 ja 5 on esitetty RR75 ja RR90 nurjahduskestävyyden kuvaajat. Kuvaajien sininen käyrä esittää Ruotsin menetelmän ta-

voin paalun 2. kertaluvun mukaista nurjahduskestävyyttä. Kuvaajan punainen käyrä esittää sektoria, jonka ulkopuolella paalun poikkileikkaus on täysin plastisessa tilassa. Tämän sektorin rajoja ei voi ylittää. Mitoittava nurjahduskapasiteetti määräytyy siitä onko käyrien leikkauspiste ennen maan murtokapasiteettia vai tämän jälkeen. Esimerkkilaskuissa käyrien leikkauspiste oli maan murtokapasiteetin jälkeen, jolloin mitoittavaksi nurjahduskapasiteetiksi saatiin maan murtokapasiteetti. Taulukossa 10 on esitetty mitoittavat nurjahduskapasiteetit maittain.

Taulukko 11. Mitoittavat nurjahduskapasiteetit maittain

RR75		
Mitoittava nurjahduskapasiteetti		Murtumistapa
Suomi	289 kN	maa
Saksa	277 kN	maa
Ruotsi	252 kN	paalu
RR90		
Mitoittava nurjahduskapasiteetti		
Suomi	377 kN	maa
Saksa	359 kN	maa
Ruotsi	326 kN	paalu

Suurin nurjahduskapasiteetti paaluille RR75 ja RR90 saatiin Suomen menetelmällä. Suurin ero menetelmien välillä saatiin Suomen ja Ruotsin välille. Kun verrataan murtumistapoja, Suomen menetelmällä paalun mitoittava nurjahduskapasiteetti saavutettiin maan murtokapasiteetilla. Toisaalta Ruotsin menetelmällä nurjahduskapasiteetti saavutettiin paalun murtokapasiteetilla. Saksan menetelmän nurjahduskapasiteetti oli hieman heikompi kuin Suomen menetelmän ja molempien menetelmien nurjahduskapasiteetti saavutettiin maan murtokapasiteetilla.

## 2.7 Rrpilecalc

RrPileCalc on laskentaohjelma, jolla pystytään mitoittamaan teräsputkipaaluja tukipaaluna. Laskennassa sovelletaan Eurokoodeja sekä maakohtaisia kansallisia ohjeita ja määräyksiä. Ohjelma sisältää kaikki SSAB:n paalukoot ja teräsputkipaalut, jotka voidaan mitoittaa tyhjänä teräsputkipaaluna, betonilla täytettynä teräsputkipaaluna ilman liittovaikutusta, teräsbetonisena liittorakennepaaluna tai sydänteräspaaluna. RrPileCalc:illa pystytään laskemaan paalun rakenteellinen kestävyys sekä paalun geotekninen kestävyys. Paalut voidaan mitoittaa Suomen, Ruotsin ja Norjan kansallisten ohjeiden mukaisesti.

The screenshot shows the RrPileCalc software interface with the following data:

Paalutiedot		Kuormatiedot	
Koko	RR75/6.3	Pysyvän kuorman osuus	0.50
Teräslaji	S440J2H	Maaperätiedot ja paalun alkutaipuma	
Korroosiovara	0.0 mm	Suljettu leikkauslujuus	$C_{uk}$ 7.0 kPa
		Alustaluvun kerroin	A 50.0
		Sivuvastuksen ääriarvon kerroin	B 9.0
		Paalun geometrinen alkutaipuma	$L_{cr}$ 300
		Paalun kaarevuussäde	R 100 m
		Paalun kriittinen nurjahduspituus	$L_{cr}$ 2.65 m

Paalun kestävyys:	
Nurjahdus, maa murtuu:	Nurjahdus, paalu murtuu:
$F_{d,s} = 254$ kN	$F_{d,p} = 332$ kN

Geotekninen kestävyys:		Geotekninen kestävyys loppulyöntiohjeen mukaan	
Paalutustyyli	PTL1	Onko paalutettava rakenne jäykkä	Ei
Mitoitusperiaate	Loppulyöntiohje	Käytettävä korrelaatiokerroin	$\xi$ 1.470
			$R_{k,geo,max} = 328$ kN
			$R_{c,d} = 186$ kN

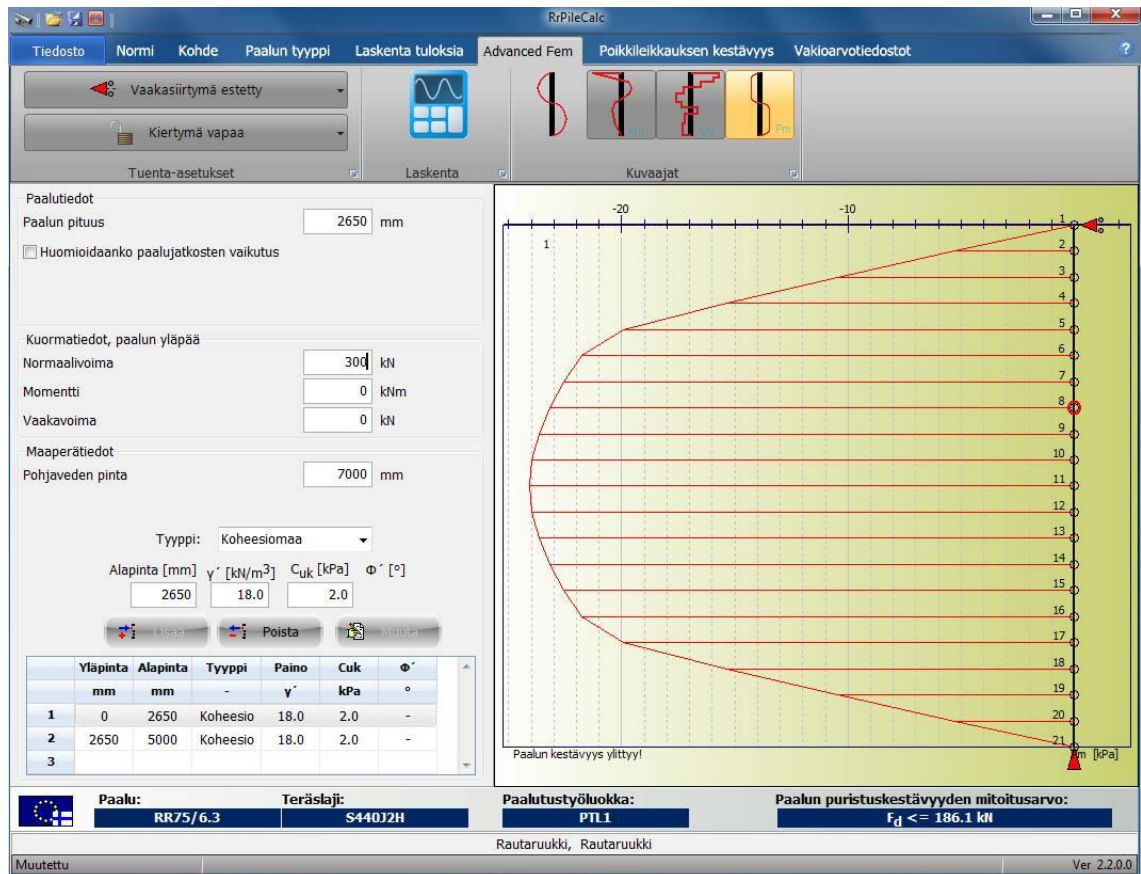
Paalu:	Teräslaji:	Paalutustyyli:	Paalun puristuskestävyyden mitoitusarvo:
RR75/6.3	S440J2H	PTL1	$F_d \leq 186.1$ kN

Additional information:  $EI_{eff} = 178$  kNm<sup>2</sup>, Rautaruukki, Rautaruukki, Ver 2.2.0.0

Kuva 5. Rrpilecalc, Paalu tyypeittäin paalun kestävyys sekä geotekninen kestävyys

### 2.7.1 Advanced FEM

Advanced FEM on Rrpilecalc:in lisätoiminto, jolla pystytään laskemaan paalun hoikkudesta ja taivutuksesta aiheutuvat lisämomentit ns. toisen kertaluvun teorian mukaisesti. Ohjelma toistaa taipuman ja lisämomenttien laskentaa siihen asti, että paalun lisätaipuma suppenee asetetun raja-arvon alapuolelle tai paalu nurjahtaa.



Kuva 6. Advanced FEM

## 2.7.2 Taivutusmurtokestävyyden erot

Tarkoitus on verrata RrPileCalc:in PO-2011 mukaisia tuloksia Advanced FEM-lisäosion saataviin tuloksiin. Tuloksia verrataan paalun nurjahduskestävyyden ja murtumistavan suhteen. Vertailulaskelmissa tarkasteltava paalu on hienorakeisessa maassa ja paalun pituus on nurjahduspituuden suuruinen. Maakerroksen suljettuna leikkauslujuutena tarkasteluissa on käytetty 5 kPa, 10 kPa ja 15 kPa. Tarkasteltavat lyöntipaalukoot ovat RR75-RR170.

Taulukko 12. Advanced FEM ja PO-2011 tulokset

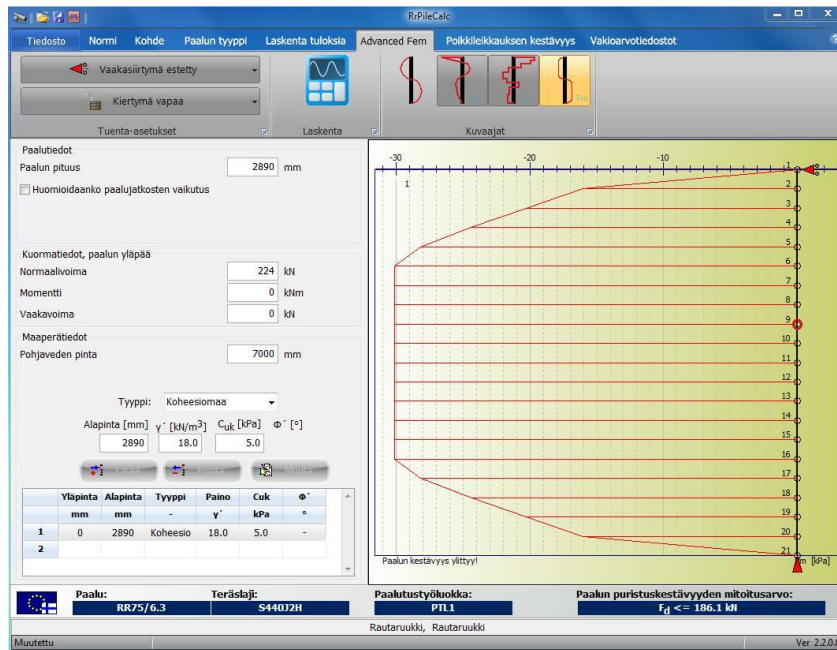
Advanced FEM tulokset	PO-2011 tulokset						
	5 kPa	10 kPa	15 kPa				
RR75	223 kN	313 kN	381 kN	RR75	236 kN	359 kN	421 kN
RR90	286 kN	401 kN	484 kN	RR90	307 kN	467 kN	514 kN
RR115/6.3	425 kN	593 kN	703 kN	RR115/6.3	469 kN	655 kN	703 kN
RR140/8	646 kN	902 kN	1073 kN	RR140/8	709 kN	1006 kN	1081 kN
RR170/10	953 kN	1329 kN	1588 kN	RR170/10	1041 kN	1499 kN	1615 kN

Taulukossa 12 on esitetty Advanced FEM:in ja PO-2011 mukaisia tuloksia. FEM tuloksista saatiin yleisesti heikompi nurjahduskestävyys paalulle kuin PO-2011 tuloksista. Leikkauslujuuden ollessa 5 kPa saatiin FEM tuloksista 6-10 % pienempi nurjahduskestävyys paaluille. Suurimmat erot saatiin, kun maan leikkauslujuus oli 10 kPa. Advanced FEM:in tulokset tällä leikkauslujuudella olivat 9-14 % pienempiä verrattuna paalutusohjeen tuloksiin. Maan leikkauslujuuden oltaessa 15 kPa eroja syntyi pienimmillä paalukooilla, mutta paalukoon kasvaessa tulokset eivät juurikaan eronneet toisistaan. Taulukossa 13 on esitetty Advanced FEM:in tuloksien prosentuaalinen ero verrattuna PO-2011 tuloksiin.

Taulukko 13. Advanced FEM tuloksien erot PO-2011 tuloksiin

	5 kPa	10 kPa	15 kPa
RR75	-5,51 %	-12,81 %	-9,50 %
RR90	-6,84 %	-14,13 %	-5,84 %
RR115/6.3	-9,38 %	-9,47 %	0,00 %
RR140/8	-8,89 %	-10,34 %	-0,74 %
RR170/10	-8,45 %	-11,34 %	-1,67 %

Vertaillaan vielä tuloksien eroja paalun murtumistavassa eli joko paalu murtuu tai maa murtuu. PO-2011 mukaan pienempi arvo nurjahduskestävyydessä määrää paalun murtumistavan. Maan murtokapasiteetti sekä paalun murtokapasiteetti saadaan Rrpilecalc:ssa suoraan kuvan 5 mukaisesti. Advanced FEM:ssä tarkastellaan ylittyykö paalun kestävyys jollakin solmupisteellä tai saavuttaako maan sivuvastus murtoarvonsa. Kuvassa 6 on esimerkki, jossa paalun taivutuskestävyys ylittyy. Kuvassa 7 maan sivuvastus saavuttaa murtoarvonsa. Taulukossa 14 on esitetty Advanced FEMin mukaan paalun murtumistapa ja taulukossa 15 PO-2011 mukaan.



Kuva 7. Sivuvastuksen murtoarvo

Taulukko 14. Advanced FEM tulokset

	5 kPa		10 kPa		15 kPa	
	Maa	Paalu	Maa	Paalu	Maa	Paalu
RR75	X			X		X
RR90	X			X		X
RR115/6.3	X			X		X
RR140/8	X			X		X
RR170/10	X			X		X

Taulukko 15. PO-2011 tulokset

	5 kPa		10 kPa		15 kPa	
	Maa	Paalu	Maa	Paalu	Maa	Paalu
RR75	X		X			X
RR90	X		X			X
RR115/6.3	X			X		X
RR140/8	X			X		X
RR170/10	X			X		X

Tulokset menetelmien välillä eivät juurikaan eronneet toisistaan. Eroja syntyi, kun leikkauslujuus on 10 kPa. PO-2011 tuloksissa, paaluilla RR75 ja RR90 murtumistapana on maan murtuminen, kun taas FEM laskennalla murtumistavaksi saatiin paalun murtuminen.

### 3 ALUSTALUVUT

Sivukuormitettujen paalujen analysointiin käytetään alustalukumenetelmää eli Winklerin mallia. Alustalukumenetelmässä kuvataan kuorman ja siirtymän välistä vuorosuhdetta. Poikittaiskuormitus tai sivuvastus ei missään tilanteessa ylitä murtotilatarkastelulla saatua arvoa. Maan alustaluku on muodonmuutosominaisuus ja sille käytetään ominaisarvoja. Varmuudet otetaan huomioon maan ja paalun lujuusominaisuuksissa. Paalun mitat vaikuttavat myös alustalukuihin, joten ne eivät ole pelkästään maaparametreja. (Paalutusohje 2011,2011,94-96)

#### 3.1 Karkearakeisen maan alustaluku

Erittäin vaativissa pohjarakennuskohteissa (GL3) alustaluku  $k_s$  suositellaan määritettäväksi karkearakeisessa maassa joko kokoonpuristuvuusmoduulin  $M_s$  tai avoimen tilan kimmomoduulin  $E_d$  avulla, mitkä määritetään ödometri- tai kolmiaksaalikokein. (Paalutusohje 2011, 2011, 96)

$$k_s = \beta * \frac{M_s}{d} = \frac{E_d}{d} \quad (58)$$

$\beta$  = 0,83-0,95 hiekalle Poissonin vakion vaihdellessa vastaavasti välillä 0,25-0,15

$d$  = paalun halkaisija

$M_s$  = kokoonpuristuvuusmoduuli

$E_d$  = suljetun tilan kimmomoduuli

Kokoonpuristuvuusmoduuli voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$M_s = m * 100 * \left(\frac{\sigma'_v}{100}\right)^{1-\beta} \quad (59)$$

$m$  = moduuliluku

$\sigma'_v$  = tehokas pystyjännitys (kN/m<sup>2</sup>)

$\beta$  = jännityseksponentti

### 3.2 Hienorakeisen maan alustaluku

Vaativissa pohjarakennuskohteissa (GL2) alustaluku voidaan määrittää suljetun leikkauslujuuden perusteella, kuten yhtälöissä 28 ja 29 on esitetty. Erittäin vaativissa pohjarakennuskohteissa (GL3) alustaluku  $k_s$  suositellaan hienorakeisessa maassa määritettäväksi kokoonpuristuvuusmoduulin  $M_s$  tai suljetun tilan kimmomoduulin  $E_u$  kautta. (Paalutusohje 2011,2011,97)

Tällöin alustaluku  $k_s$  määritetään

$$k_s = \beta * \frac{M_s}{d} = \frac{E_u}{d} \quad (60)$$

$\beta = 0,46-0,74$  savelle Poissonin vakion vaihdella vastaavasti välillä 0,4-0,3

$\beta = 0,62-0,83$  siltille Poissonin vakion vaihdella vastaavasti välillä 0,35-0,25

#### 3.2.1 Pohjatutkimuksien vaikutus tuloksiin

Paalutusohjeessa mainitaan, että vaativissa pohjarakennuskohteissa (GL2) maan alustaluku voidaan määrittää maan suljetun leikkauslujuuden perusteella ja erittäin vaativissa (GL3) kokoonpuristuvuusmoduulin tai suljetun tilan kimmomoduulin kautta. Tarkastellaan minkälaisia eroja paalun nurjahduskestävyydelle syntyy, kun alustaluku määritetään sekä suljetun leikkauslujuuden kautta että kokoonpuristuvuusmoduulin kautta.

Esimerkkikohteesta on otettu yhdestä pisteestä kolme näytettä. Näytteet on otettu syvyyksiltä 3,87-4,04 m, 4,87-5,04 m ja 7,87-8,04 m. Pohjavesi sijaitsee 1,3 m maan pinnasta. Näytteistä on määritetty suljettu leikkauslujuus kartiokokeilla ja kokoonpuristuvuusmoduuli ödometrikokeilla. Näytteiden maalaji oli savi. Taulukossa 16 on esitetty kokeiden tulokset.

Taulukko 16. Näytteiden tulokset

Näytteenottoisyvyys (m)	3,87-4,04	4,87-5,04	7,87-8,04
Tilavuuspaino ( kN/m <sup>3</sup> )	15,7	15,7	16,3
suljettu leikkauslujuus kPa	26,2	25,6	20,9
moduuliluku m	10,7	12,2	9,1
jännitysekspONENTTI B	1	1	1

Vertaillaan alustaluvun minimi ja maksimi arvoja, kun alustaluku määritetään suljetun leikkauslujuuden tai kokoonpuristuvuusmoduulin avulla. Suljettua leikkauslujuutta varten alustalukukertoimena käytetään 20 ja 50. Kokoonpuristuvuusmoduulia varten käytetään savelle  $\beta$  kertoimena 0,46 ja 0,74 (kaava 60). Esimerkkilaskuissa käydään läpi yhdeltä näytesyvyydeltä lasketut alustaluvut.

Suljetun leikkauslujuuden perusteella lasketut alustaluvun ääriarvot

$$k_s = 20 * 26,2 \text{ kPa/d} = 524 \text{ kPa/d} \quad (\text{kaava 28})$$

$$k_s = 50 * 26,2 \text{ kPa/d} = 1310 \text{ kPa/d} \quad (\text{kaava 28})$$

Kokoonpuristuvuusmoduuli näytesyvyydelle 3,87-4,04 m

$$M_s = 10,7 * 100 * \left( \frac{(3,87 \text{ m} * 15,7 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} - (3,87 \text{ m} - 1,3 \text{ m}) * 10 \text{ kN/m}^3)}{100} \right)^{1-1} \quad (\text{kaava 59})$$

$$M_s = 1070 \text{ kPa}$$

Maan alustaluvun ääriarvot kokoonpuristuvuusmoduulin kautta näytesyvyydelle 3,87-4,04 m

$$k_s = 0,46 * \frac{1070 \text{ kPa}}{d} = 492 \text{ kPa/d} \quad (\text{kaava 60})$$

$$k_s = 0,74 * \frac{1070 \text{ kPa}}{d} = 792 \text{ kPa/d} \quad (\text{kaava 60})$$

Taulukossa 16 on esitetty kaikkien näytesyvyyksien lähtöarvoilla saadut alustaluvun ääriarvot sekä suljetun leikkauslujuuden että kokoonpuristuvuusmoduulin perusteella.

Taulukko 17. Alustaluvun ääriarvot

Min (alustalukukerroin 20, kerroin $\beta = 0,46$ )			
Alustaluku	Syvyys 1	Syvyys 2	Syvyys 3
Näytteenotto syvyys (m)	3,87-4,04	4,87-5,04	7,87-8,04
Suljetun leikkauslujuuden perusteella	524	512	418
Kokoonpuristuvuusmoduulin perusteella	492	561	419
Max (alustalukukerroin 50, kerroin $\beta = 0,74$ )			
Alustaluku	Syvyys 1	Syvyys 2	Syvyys 3
Näytteenotto syvyys (m)	3,87-4,04	4,87-5,04	7,87-8,04
Suljetun leikkauslujuuden perusteella	1310	1280	1045
Kokoonpuristuvuusmoduulin perusteella	792	903	673

Kokoonpuristuvuusmoduulin kautta saatiin alustalukuihin ei saatu suuria eroja kun alustalukukerroin oli 20 ja saven  $\beta$  kertoimena käytettiin 0,46. Eroja syntyi kun kasvatettiin alustalukukerroin 50 ja saven  $\beta$  kerroin 0,74.

Tarkastellaan minkälaisia eroja saadaan paalun nurjahduskestävyydelle näillä alustaluvuilla. Vertailussa käytetään vain paalua RR75 ja paalun nurjahduskestävyys lasketaan Paalutusohjeen mukaisesti, mikä on esitetty kappaleessa 2.3. Taulukossa 18 on esitetty saadut nurjahduskestävyyden arvot paalulle RR75.

Taulukko 18. RR75 nurjahduskestävyys

Suljetun leikkauslujuuden perusteella						
Syvyys	3,87-4,04		4,87-5,04		7,87-8,04	
Alustalukukerroin	20	50	20	50	20	50
Maan murtuessa [kN]	484	635	478	626	427	556
Paalun murtuessa [kN]	387	466	385	465	364	449
Kokoonpuristuvuusmoduulin perusteella						
Saven $\beta$ kerroin	0,46		0,74		0,46	
Saven $\beta$ kerroin	0,46	0,74	0,46	0,74	0,46	0,74
Maan murtuessa [kN]	474	553	495	575	447	526
Paalun murtuessa [kN]	381	426	394	438	364	411

Taulukossa 19 on esitetty nurjahduskestävyyden prosentuaalinen ero RR75 paalulle, kun verrataan kokoonpuristuvuusmoduulin perusteella saatua nurjahduskestävyyttä, suljetun leikkauslujuuden perusteella saatuun.

Taulukko 19. RR75 nurjahduskestävyyden prosentuaalinen ero

Syvyys	3,87 - 4,04		4,87 - 5,04		7,87 - 8,04	
Alustalukkerroin	Min	max	Min	max	Min	max
Maan murtuessa [kN]	-2,11 %	-14,83 %	3,04 %	-8,87 %	4,47 %	-5,70 %
Paalun murtuessa [kN]	-1,57 %	-9,39 %	2,28 %	-6,16 %	0,00 %	-9,25 %

Tuloksista havaitaan että pieniä eroja 0-5% syntyy paalun nurjahduskestävyydelle, kun alustalukkerroin on 20 ja saven  $\beta$  kerroin on 0,46. Kun alustalukkerroin kasvatettiin 50 ja saven  $\beta$  kerroin 0,74, saatiin paalun nurjahduskestävyydelle 5-15 % eroja. Alustalukkerrointa kasvattaessa suuremmaksi, erot menetelmien välillä vain kasvasi.

### 3.3 Nurjahduksen tarpeellisuuden tarkistaminen

"Nurjahduksen tarkistaminen ei tavallisesti ole tarpeen, kun paalut ovat maassa, jonka ominaisleikkauslujuus  $c_u$  on yli 10 kPa." (Eurokoodi 1997-1). Tarkistetaan SSAB:n yleisesti käytettyjen lyöntipaalujen RR75 ja RR90 nurjahduksen tarpeellisuus, kun paalutus-työluokka on PTL2. Paalujen geometrisenä alkutaipumana on käytetty  $L_{cr}/400$  ja maakerroksen suljettuna leikkauslujuutena 10 kPa. Paalu sijaitsee koko nurjahduspituudeltaan hienorakeisessa maassa. Maan alustalukkerroin on käytetty 50 ja sivuvastuksen ääriarvokerroinena 9. Korroosiovaraa paaluissa ei ole otettu huomioon.

Taulukko 20. Nurjahduskestävyys ja geotekninen kestävyys (PTL2)

PO-2011		
	Geotekninen kestävyys	Nurjahduskestävyys ( $c_u = 10\text{kPa}$ )
RR75	248 kN	359 kN
RR90	294 kN	467 kN
Advanced FEM		
	Geotekninen kestävyys	Nurjahduskestävyys ( $c_u = 10\text{kPa}$ )
RR75	248 kN	313 kN
RR90	294 kN	401 kN

Taulukossa 20 on esitetty PO-2011 ja Advanced FEM:stä saadut tulokset nurjahduskestävyydelle, maan leikkauslujuuden oltaessa 10 kPa. SSAB:n hoikimpien lyöntipaalujen nurjahduskestävyys ylitti molemmilla laskentamenetelmillä reilusti geoteknisen kestävyden, jolloin voidaan olettaa että nurjahdusta ei tarvitsisi tarkistaa maan leikkauslujuuden oltaessa yli 10 kPa. Tarkistetaan vielä millä leikkauslujuudella paalut tulisi tarkistaa nurjahduksen suhteen.

Taulukko 21. Nurjahduskestävyys ja geotekninen kestävyys (PTL2)

PO-2011		
	Geotekninen kestävyys	Nurjahduskestävyys
RR75	248 kN	236 kN ( $c_u = 5\text{kPa}$ )
RR90	294 kN	268 kN ( $c_u = 4\text{kPa}$ )
Advanced FEM		
	Geotekninen kestävyys	Nurjahduskestävyys
RR75	248 kN	223 kN ( $c_u = 5\text{kPa}$ )
RR90	294 kN	286 kN ( $c_u = 5\text{kPa}$ )

SSAB:n lyöntipaalut tulisi tarkistaa nurjahduksen suhteen vasta, kun maan suljettu leikkauslujuus olisi 5 kPa. Poikkeuksena RR90 nurjahduskestävyys PO-2011 mukaan alitti geoteknisen kestävyden suljetun leikkauslujuuden ollessa 4 kPa. Tuloksissa täytyy kuitenkin huomioida, että alustalukukertoimena käytettiin 50. Jos alustalukukertoimena käytettäisiin 20, ohjeen minimi arvoa, saataisiin paalulle vielä heikommat nurjahduskestävyydet. Myös korroosiovara heikentää paalun nurjahduskestävyyttä. Jos käytettäisiin aivan ohjeiden minimi arvoja, nurjahduskestävyys voi tulla mitoittavaksi tekijäksi pienillä paaluilla.

## 4 LÄHTÖTIEDOT PAALUJEN NURJAHDUSTUTKIMUKSIIN

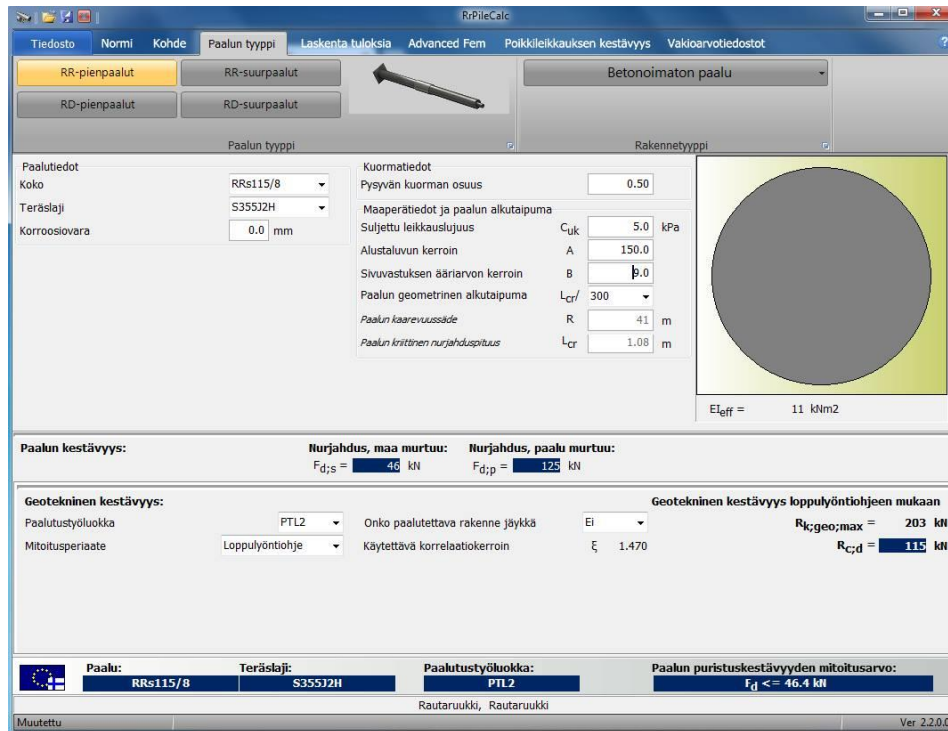
Työhön sisältyi myös laskea lähtöarvoja paalujen nurjahdustutkimuksiin. Tampereen teknillisellä yliopistolla tullaan tutkimaan jatkosten vaikutusta paalujen nurjahduskestävyyteen ja tutkimusta varten on tämän työn yhteydessä laskettu lähtötietoarvoja koekappaleille. Koekappaleena on 32mm pyörötanko, jonka ominaisuudet on esitetty taulukossa 22.

Taulukko 22. Koekappaleen ominaisuudet

EI	210000	N/mm <sup>2</sup>
fy	355	N/mm <sup>2</sup>
B	31,8	mm
As	794	mm <sup>2</sup>
I	50197	mm <sup>4</sup>
W	3157	mm <sup>3</sup>
paino	6,3	kg/m
EI	10,5	kNm <sup>2</sup>

### 4.1 Nurjahduskuormat

Laskenta tapahtuu RrPileCalcin super-user versiolla. Tangon tiedot pystytään lisäämään ohjelmaan ja ohjelma laskee automaattisesti tangon nurjahduskestävyyden maan murtuessa sekä tangon murtuessa. Nurjahduskestävyydet lasketaan maan leikkauslujuuden oltaessa 5 kPa, 10 kPa ja 15 kPa. Alustalukukertoimena käytetään 150 ja sivuvastuksen ääriarvon kertoimena 9, koska kuormitustilanne on nopea. Tangon geometrisena alkutai-pumana käytetään  $L_{cr}/300$ .



Kuva 8. RrPileCalc, 32mm tangon ominaisuudet

Taulukossa 23 on esitetty molempien menetelmien, PO-2011 mukaiset tulokset ja Advanced FEM:in tulokset.

Taulukko 23. Kuormitettavan tangon nurjahduskestävyydet

Rrpilecalc			
	5 kPa	10 kPa	15 kPa
maa murtuu	46 kN	74 kN	98 kN
Paalu murtuu	125 kN	155 kN	172 kN
Advanced FEM			
	5 kPa	10 kPa	15 kPa
maa murtuu	72 kN	101 kN	124 kN

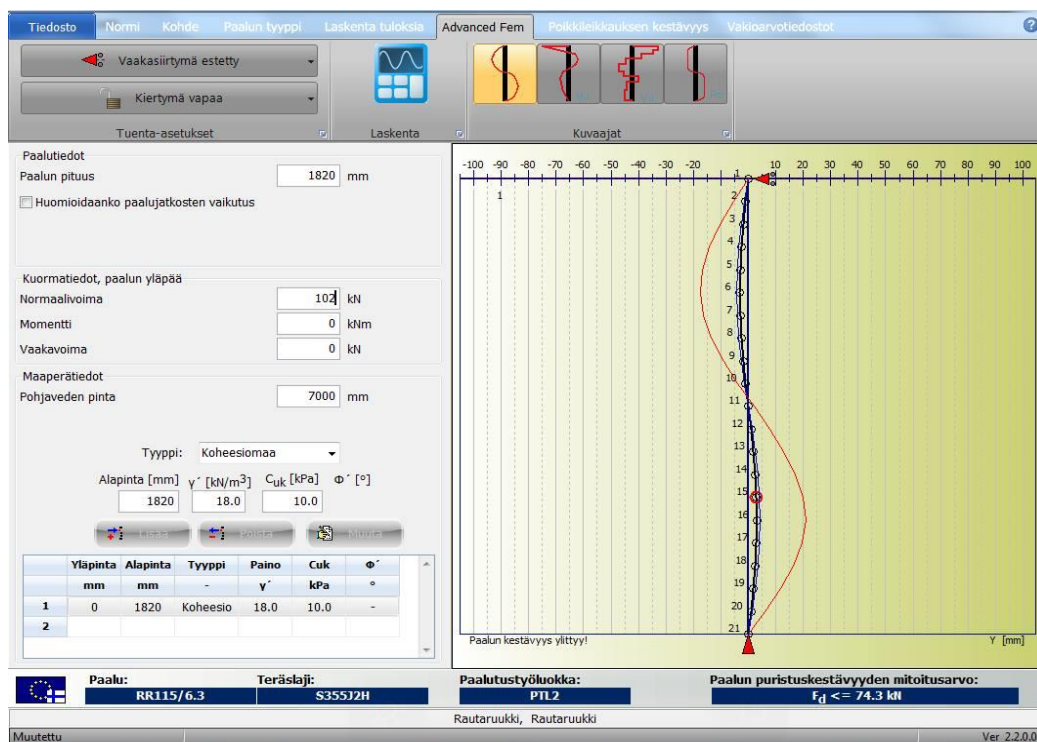
## 4.2 Vaakasiirtymä FEM

Nurjahdustutkimuksia varten on myös laskettu Advanced FEM lisäosalla kuormitettavan tangon vaakasiirtymä nurjahtaessa. Kuvissa 9, 10 ja 11 on esitetty 32mm tangon vaakasiirtymä kun tanko on saavuttanut nurjahduskapasiteetin. Nurjahduspituudeksi saatiin leikkauslujuuksittain 1080 mm ( $c_u = 5$  kPa), 910 mm ( $c_u = 10$  kPa) ja 820 mm ( $c_u = 15$  kPa). Kuvassa 9 tarkastellaan tangon vaakasiirtymää nurjahtaessa, kun maan leikkauslujuus on 5 kPa. Tangon pituus on nurjahduspituuden verran.

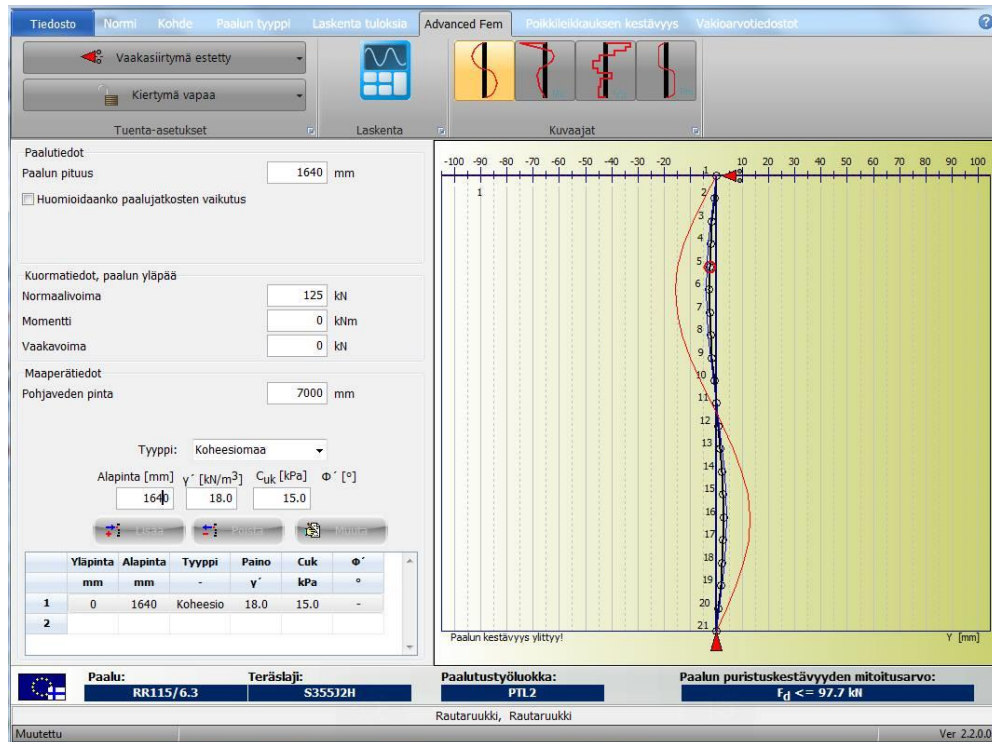


Kuva 9. Tangon vaakasiirtymä ( $c_u = 5 \text{ kPa}$ )

Poikkeuksena kuvaan 9, paalun pituus on nyt kahden nurjahduspituuden verran kuvissa 10 ja 11. Ohjelma vaatii paalun pituudeksi vähintään 1000 mm ja jotta saataisiin laskettua tangon vaakasiirtymä leikkauslujuuksille 10 kPa ja 15 kPa, valitaan tangon pituudeksi 1820 mm ja 1640 mm.



Kuva 10. Tangon vaakasiirtymä ( $c_u = 10 \text{ kPa}$ )



Kuva 11. Tangon vaakasiirtymä ( $c_u = 15$  kPa)

Kuvissa 9-11 punainen käyrä edustaa tangon vaakasiirtymää. Advanced FEM:in mukaan tangon vaakasiirtymä on pienimmillään noin 15 mm, kun maan suljettuna leikkauslujuutena käytettiin 15 kPa. Suurimmillaan tangon vaakasiirtymäksi saatiin 35 mm, kun maan suljettuna leikkauslujuutena käytettiin 5 kPa.

## 5 POHDINTA

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia lyötävien teräsputkipaalujen eri nurjahdustarkaste-  
luita. Työssä tutkittiin Saksan, Ruotsin ja Suomen kansallisten laskentamenetelmien eroa-  
vaisuuksia nurjahduksen suhteen. Laskentatapojen eroavaisuuksien havaitsemiseksi las-  
kettiin jokaiselle menetelmälle väliarvot ja lopulliset tulokset samoilla lähtöarvoilla.  
Työssä verrattiin myös Rrpilecalc:in Advanced FEM lisäosan tuloksia Paalutusohjeen kä-  
sinlaskentamenetelmään ja alustaluvun vaikutusta nurjahduskestävyyteen.

Eri maiden menetelmien välille voitiin olettaa syntyvän eroja, kun kunkin maan ohjeet  
ovat syntyneet kokemuksen ja tarpeiden mukaisesti. Merkittävin ero menetelmien välillä  
syntyi, kun tarkastellaan paalun mitoittavaa nurjahduskapasiteettia. Suomen menetel-  
mällä nurjahduskestävyyttä tarkastellaan yksinkertaisemmin kaavojen avulla, kun taas  
Ruotsin ja Saksan menetelmällä asiaa tarkastellaan kuvaajien avulla. Ruotsin menetel-  
mällä nurjahduskapasiteettia tarkastellaan todenmukaisemmin kuin Suomen menetel-  
mässä. Ruotsin menetelmällä maan murtokapasiteetti on määräävä vain jos paalun varsi  
on pettänyt ennen sitä. Jos näin ei ole käynyt, paalun varren rasittamista jatketaan 2. kerta-  
luvun kuormituksena, kunnes paalu murtuu. Suomen menetelmässä tarkastellaan vain  
heikompaa nurjahduskapasiteettia, eikä laskentaa jatketa 2. kertaluvun kuormituksena.  
Ruotsin menetelmässä kuitenkin osavarmuusluvut heikensi paalun nurjahduskestävyyttä  
enemmän kuin Suomen menetelmällä. Suomen menetelmässä vain maan sivuvastuksen  
ääriarvossa otetaan huomioon osavarmuusluku. Ruotsin menetelmässä sen sijaan redusoi-  
daan teräksen kimmokerrointa lyötäville teräsputkipaaluille ja maan alustalukuna käyte-  
tään mitoitusarvoa. Se, että minkä maan menetelmä antaa varmimman arvon nurjahdus-  
kapasiteetiksi, on vaikea arvioida pelkästään kaavoja vertailemalla. Jos menetelmien vä-  
liset erot perustuisivat todellisiin koekuormituksiin, saataisiin tarkemmat tulokset.

Advanced FEM tulokset olivat yleisesti heikompia kuin Paalutusohjeen 2011 tulokset.  
Suurimmat erot syntyivät menetelmien välille pienimmillä paaluilla sekä maan leikkaus-  
lujuuden ollessa 10 kPa. Pienimmät erot havaittiin vertailukohteen suurimmilla paaluilla  
ja leikkauslujuuden ollessa 15 kPa.

Työssä tutkittu alustaluvun määrittäminen kokoonpuristuvuusmoduulin kautta toi eroja paalun nurjahduskestävyyteen, kun verrattiin yleisesti käytettyyn suljetun leikkauslujuuden perusteella saatuun. Vaikka arvot perustuivat todellisiin tutkimuksiin, tuloksien arvot eivät välttämättä perustu todenmukaisiin arvoihin. Pohjatutkimuksien tulkinta kuitenkin vaatii hyvää ymmärrystä ja kokemusta asiasta. Esimerkkejä alustaluvun määrittämiselle kokoonpuristuvuusmoduulin kautta ei löytynyt ja se on muutenkin harvemmin käytetty.

## LÄHTEET

Pålkommissionen. Rapport 84a. Tulostettu 12.1.2015.

<http://www.palkommissionen.org/web/page.aspx?refid=207>

Pålkommissionen. Rapport 98. Tulostettu 12.1.2015.

<http://www.palkommissionen.org/web/page.aspx?refid=84>

Rasi-koskinen, H. 2014. Vaakasuuntaiset alustaluvut paaluperusteisissa silloissa. Ympäristötekniikan koulutusohjelma. Oulu. Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta. Diplomityö

RIL-254-2011. Paalutusohje 2011. 2011. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry

SSAB. SSAB Lyhyesti. Luettu 1.5.2015.

<http://www.ssab.com/fi/Sijoittajat-ja-media/Tietoa-SSABsta/SSAB-lyhyesti/>

SFS-EN 1992-1-1. 2007. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1997-1. 2009. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1 : Yleiset säännöt. Suomen standardisoimisliitto SFS.

Utarainen, V. 2013. Teräsbetonipaalun kalliokärjen laatuvaatimukset. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö

Vogt, S. 2009. Buckling of slender piles in soft soils. Bautechnik. Berlin: Ernst & Sohn