

Perustietoja uudesta pohjarakenteiden Eurokoodista EN1997

Uuden EC7 vaatimuksista: toisin kuin muut EC:t, EC7 geoteknisen luotettavuuden osoittamien perustuu standardissa määritettyihin velvoittaviin toimenpiteisiin: luokitukset, varmennukset, pohjatutkimukset ja raportoinnit

Geoteknisten rakenteiden suunnitteluperusteet on yhdenmukaistettu EN 1990:2023:n kanssa.

EC7-3 kattaa geotekniset rakenteet:

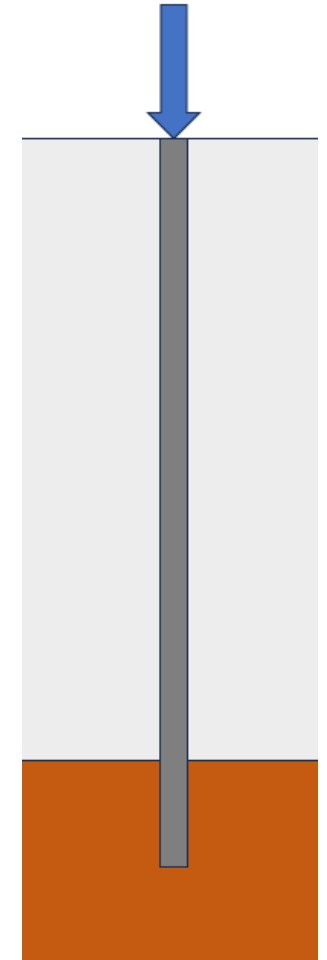
- EN 1997-3:n soveltamisalaa on laajennettu kattamaan geotekniset rakenteet kalliossa ja kallion päällä (sanaa *ground* käytetään nyt laajasti tarkoittamaan maaperää, kalliota ja täyttöä).
- Uusia geoteknisiä rakenteita on lisätty:
 - paaluryhmät ja paalutetut laattaperustukset (luku 6), vahvistetut täyttömaarakenteet (luku 9), maanaulatut rakenteet (luku 10), kalliopultit ja kallion pinnan lujitukset (luku 11); pohjanvahvistus (kohta 12) sekä pohjaveden hallinta (kohta 13).
- Olemassa olevia lukuja on perusteellisesti tarkistettu: luiskat, leikkaukset ja penkereet (lukua 4), anturaperustukset (luku 5), paaluperustukset (luku 6), tukiseinät ja -muurit (luku 7) ja ankkurit (luku 8).;

Murtorajatilojen todentaminen on esitetty käyttäen (a) osavarmuuslukuja tai muita todennäköisyysmenetelmiä, (b) suunnittelusääntöjä, (c) testausta ja (d) seurantamenetelmää.

EN1997-1 -2 ja -3 on julkaistu ja NA valmistelu pitkällä

Hoikkien lyötävien teräsbetoni- ja teräspaalujen mitoituksen periaatteet

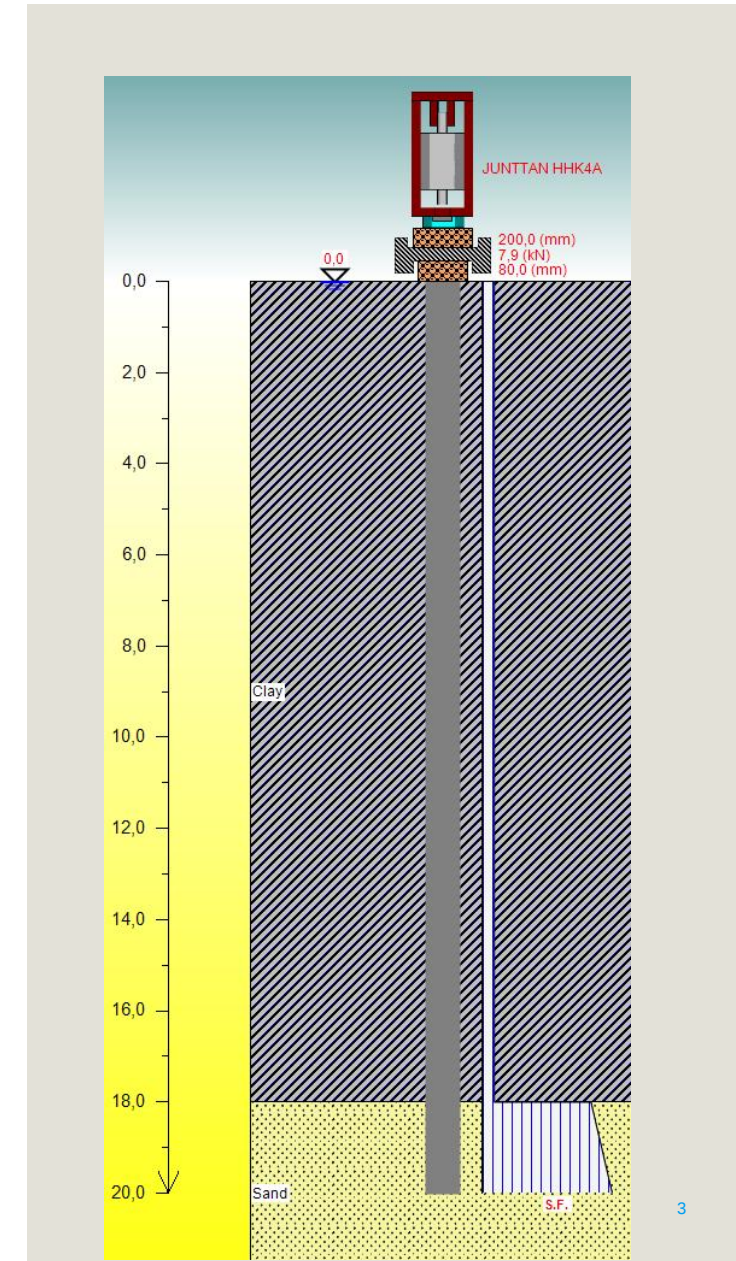
- Yleistä (tarkoituksena on esittää vain mitoitusperiaatteita, ei yksityiskohtia)
- Geoteknisen kestävyys laskentamenetelmä
 - Aaltoyhtälöanalyysi (GRLWEAP) ja loppulyöntikriteerit
 - Nykyiset osavarmuudet
 - PDA-mittaukset kontrollina
- Rakenteellisen kestävyys laskentamenetelmä
 - Rakennemalli
 - Laskennan periaate
 - Nykyiset osavarmuudet
- Mitoittava kestävyys
- Yhteenveto



Geotekninen kestävyys $R_{cd,geo}$ (maan kestävyys)

- Lyöntipaalut asennetaan maakerrokseen, jonka kestävyys on riittävä.
- Paalutuksessa paalua lyödään järkäleellä ja seurataan paalun uppoamaa.
- Kun paalun painuma pienenee riittävästi, paalu on saavuttanut riittävän kantavan maaperän.
- Painumarajoja kutsutaan loppulyöntikriteereiksi.
- Loppulyöntikriteerit on laskettu eri asennuskalustoille ja eri tyypillisille pohjaolosuhteille etukäteen GRLWEAP-ohjelmalla (kuva oikealla).
- Kriteerit on ilmoitettu paaluvalmistajien suunnittelu- ja asennusohjeissa.
- GRLWEAP-ohjelmassa käytettävästä laskentamenetelmästä käytetään nimitystä “aaltoyhtälöanalyysi”.
- Suomessa GRLWEAP-ohjelmalla laskettuja loppulyöntikriteerejä on käytetty lähes kaikkien lyöntipaalujen mitoitukseen noin vuodesta 2011 asti.

$R_{cd,geo}$
R = resistance = kestävyys
c = compression = puristuskestävyys
d = design = murtorajatilan suunnitteluarvo
geo = geotechnical = maan kestävyys



GRLWEAP-ohjelman toimintaperiaate

Loppulyöntikriteerien periaate erittäin yksinkertaistettusti

Järkäleen iskuenergia saadaan järkäleen potentiaalienergiasta

$$E_p := m_{\text{järkäle}} \cdot g \cdot h_{\text{pudotuskorkeus}}$$

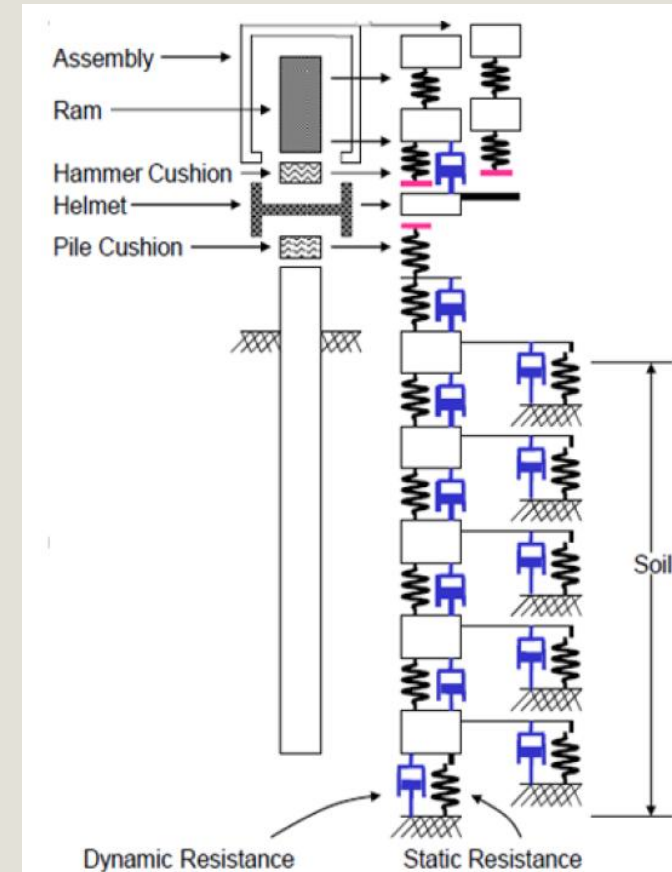
Maa tekee paalun liikettä vastustavan työn.

Yleinen työn kaava $W := -F \cdot \Delta x_{\text{siirtymä}}$

Iskua vastustava voima $F_{\text{maan_vastus}} := \frac{m_{\text{järkäle}} \cdot g \cdot h_{\text{pudotuskorkeus}}}{\Delta x_{\text{paalun_painuma}}}$

Mitä pienempi on paalun painuma, sitä suurempi on maan kestävyys.

GRLWEAP:in toimintaperiaate oikealla olevassa kuvassa

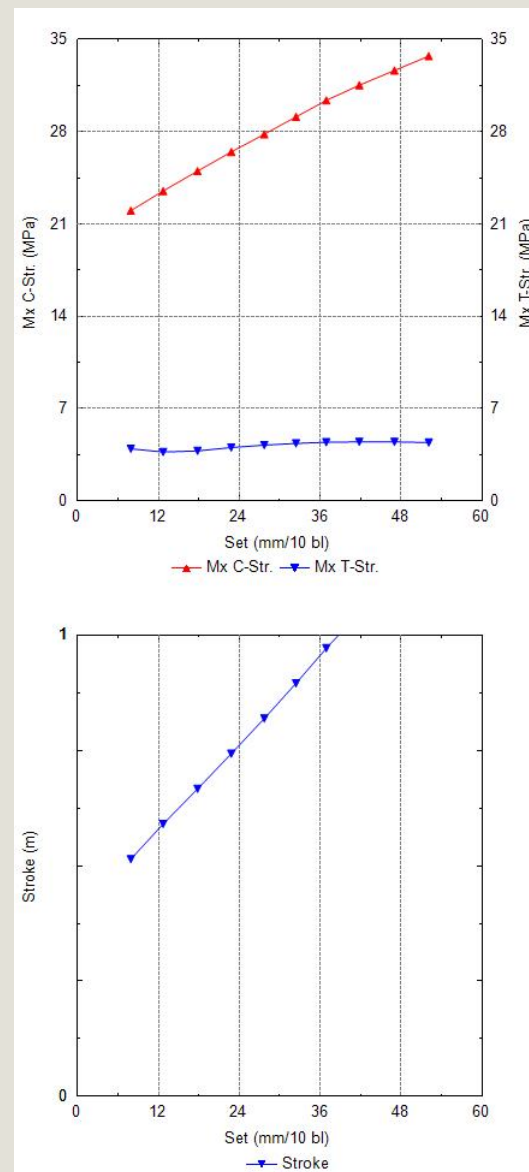


Esimerkkituloste GRLWEAP-ohjelmasta

Rut kN	Mx C-Str. MPa	Top Str. MPa	Mx T-Str. MPa	Set mm/10 bl	Stroke m	ENTHRU kJ	Hammer JUNTTAN
1 750,0	22,01	21,85	3,94	7,9	0,51	13,82	HHK4A
1 750,0	23,50	23,50	3,70	12,7	0,59	15,80	HHK4A
1 750,0	25,01	25,01	3,78	17,8	0,67	17,75	HHK4A

Set (mm / 10 blow) – Paalun pysyvä painuma 10 iskulla, jolla haluttu kestävyys (Rut) saavutetaan.

Stroke on järkäleen iskukorkeus.



Aaltoyhtälöanalyysissä käytettävä osavarmuusvarmuusmenettely (RIL Paalutusohje PO-2016)

- Korrelaatiokerroin $x = 1,47$
- Kestävyyden osavarmuus $\gamma_t = 1,2$

$$R_{cd_geo} := \frac{R_{k_laskettu_GRLWEAP}}{\xi_{korrelaatiokerroin_aaltoyhtälöanalyysi} \cdot \gamma_t}$$

Lasketun arvon jakaja murtorajatilan
suunnittelukestävyyden määrittämiseksi:

$$1,47 \times 1,2 = 1,764 \approx 1,8$$

Esimerkki betonipaalujen loppulyöntiohjeesta

Kaikki paalutyypit lyödään **20 mm pysyvään painumaan 10 lyönnillä**

Taulukko 3.2 RTB-300-16 pudotuskokeus / lyöntienergia H = pudotuskorkeus E = lyöntienergia

Paalutus- työluokka	Järkäleen massa	Kiihdyttämätön		Kiihdytetty		Kiihdytetty >1g	
		H[cm]	E[kNm]	H[cm]	E[kNm]	H[cm]	E[kNm]
PTL2	3 t	60	15	50	15	45	15
	4 t	45	16	40	16	35	16
	5 t	40	17	35	17	30	17

Geoteknisen
puristuskestävyyden
murtorajatilän
suunnitteluarvo: $R_{cd,geo}$

RTB-300-16	$R_{d,geo}$ [kN] *)		
	PTL1	PTL2	PTL3**)
	895	1001	1134

 **Rakennusteollisuus**

TUOTELEHTI
PO-2016 MUKAISEEN
PAALUTUKSEN
SUUNNITTELUUN JA
PAALUTUSTYÖHÖN
RT BETONIPAALUILLA®



Esimerkki teräspaalujen loppulyöntiohjeesta

PUDOTUSJÄRKÄLEET

Järkäleen tehokkuus 80 %				Pudotuskorkeus [m] ja iskuenergia [kNm] joilla saavutetaan R_c ja R_d arvot						
Paalu	Paalu-pituus [m]	Painuma s_{10} [mm]	Paalutus-työluokka	R_c [kN]	R_d [kN]	Järkäleen paino [kg]				
						1360	2000	3000	4000	5000
	5	10	PTL1	1012	574	0.50 m 5 kNm	0.35 m 5 kNm	0.30 m 7 kNm	0.20 m 6 kNm	0.15 m 6 kNm
	10	10				0.75 m 8 kNm	0.50 m 8 kNm	0.40 m 9 kNm	0.30 m 9 kNm	0.25 m 10 kNm
	20	10				1.10 m 12 kNm	0.75 m 12 kNm	0.55 m 13 kNm	0.45 m 14 kNm	0.35 m 14 kNm
	30	10				1.20 m 13 kNm	1.00 m 16 kNm	0.75 m 18 kNm	0.60 m 19 kNm	0.40 m 16 kNm

Geoteknisen puristuskestävyyden murtorajatilan suunnitteluarvo:

$R_{cd,geo}$

RR®- ja RD®-paalut

SUUNNITTELU- JA ASENNUSOHJEET

Ohje käsittelee SSAB:n valmistamia lyömällä ja puristamalla asennettavia RR- ja RDs-paaluja, poraamalla asennettavia RD- ja RDs-paaluja sekä lyömällä asennettavia injektaita RR-paaluja. Ohjeessa käsitellään kaikki SSAB:n teräspaalujen paalukoot. Ohje perustuu Paalutusohje PO-2016 -ohjeeseen ja Eurokoodi suunnittelujärjestelmään. Ohjeessa esitetään SSAB:n teräspaalujen ja paaluperustusten suunnittelun ja mitoituksen perusteet, suosituksia paalutyypin ja -koon valintaan, paalujen käsittely- ja asennusohjeet sekä paalutustyön laadunvalvonnan, mittauksen sekä dokumentoinnin ohjeet. Ohje sisältää suunnittelua ja toteutusta helpottavia valmiiksi laskettuja mitoitustaulukoita sekä suunnittelu- ja toteutus esimerkkejä.

Käyttökohteet:

- pientalot
- yksi- ja monikerroksiset liike-, toimisto-, teollisuus- ja varastorakennukset
- monikerroksiset asuinkerrostalot
- urheiluareenat
- perustusten vahvistus
- sillat
- väylien ja kunnallistekniikan paalulaatat ja muut rakenteet
- meluesteet ja aidat
- satamat
- tuuli- ja muut voimat



ETA 12/0526



SSAB on maailmanlaajuisesti toimiva pohjoismainen ja yhdysvaltalainen teräsyhti. Yhtiön lisäarvoa tarjoavat tuotteet ja palvelut on kehitetty tiiviissä yhteistyössä asiakkaiden kanssa. Tavoitteena on vahvempi, kevyempi ja kestävämpi maailma. SSAB:llä on työntekijöitä yli 50 maassa ja tuotantolaitoksia Ruotsissa, Suomessa ja Yhdysvalloissa. Yhtiö on noteerattu NASDAQ OMX Nordic Tukholmassa ja toissijaisesti NASDAQ OMX Helsingissä.

www.ssab.fi/infra

SSAB

Liite 2

RR®- ja RD®-paalut
Suunnittelu- ja asennusohjeet

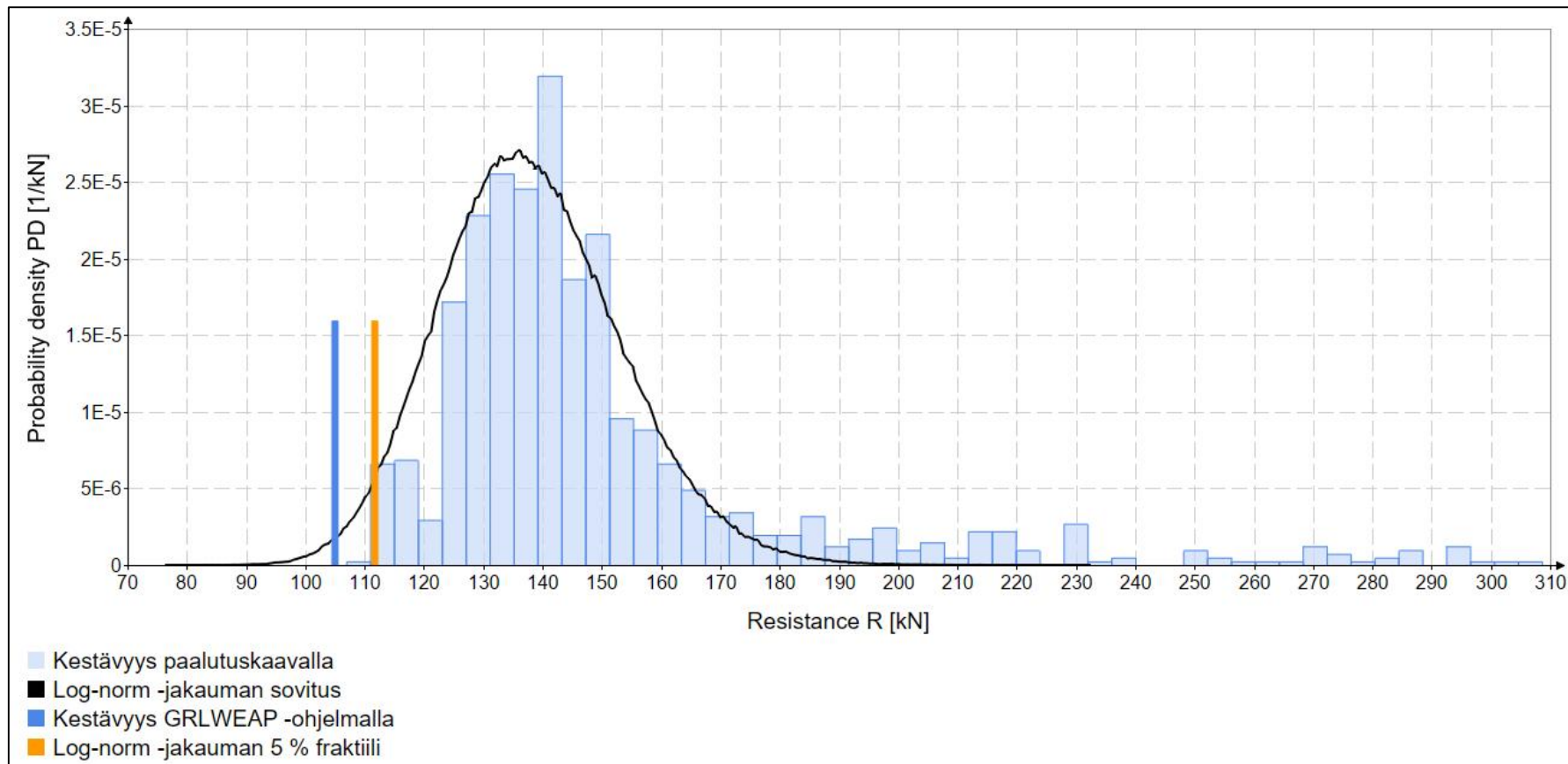
RR-paalut

Lyöntilaitekohtaiset loppulyöntitaulukot ja -käyrästöt

Päivitetty 12/2023

Loppulyöntikriteerin käyttö näyttää vaikuttavan paalujen kestävyyksien jakaumaan

Laskennallisten kestävyyksien jakauma näyttää noudattavan log-norm –jakaumaa, koska loppulyöntivaatimus leikkaa jakauman vasemman ”hännän”.

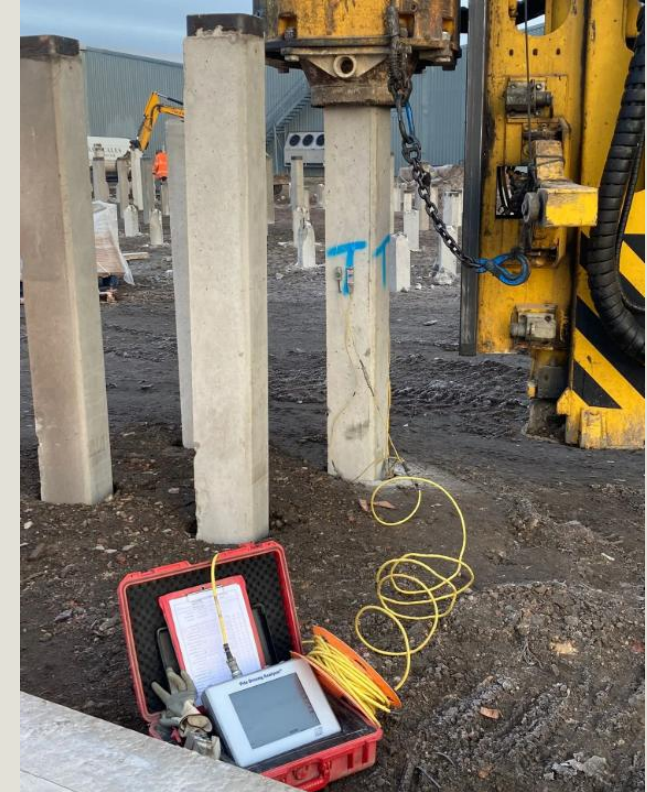


Kuvaaja koskee kohdetta, jossa asennettiin noin 1000 puista tukipaalua.

Dynaamiset koekuormitukset (PDA) geoteknisen kestävyysvarmennuksena

- Paalutus toteutetaan työmaalla etukäteen laskettujen loppulyöntikriteerien mukaisesti.
- GRLWEAP-laskelmien oikeellisuus, sopivuus ja asennuksen onnistuminen varmistetaan usein dynaamisilla koekuormituksilla eli PDA-mittauksilla.
- PDA mittauksessa paaluun asennetaan kiihtyvyys- ja venymäanturi.
- Paaluun lyödään isku, ja antureiden mittaamien signaalien perusteella mittalaitteen ohjelma laskee maan kestävyysvarmuuden.

PDA = Pile Driving Analyzer® (PDA) System
Valmistaja: Pile Dynamics, Inc.

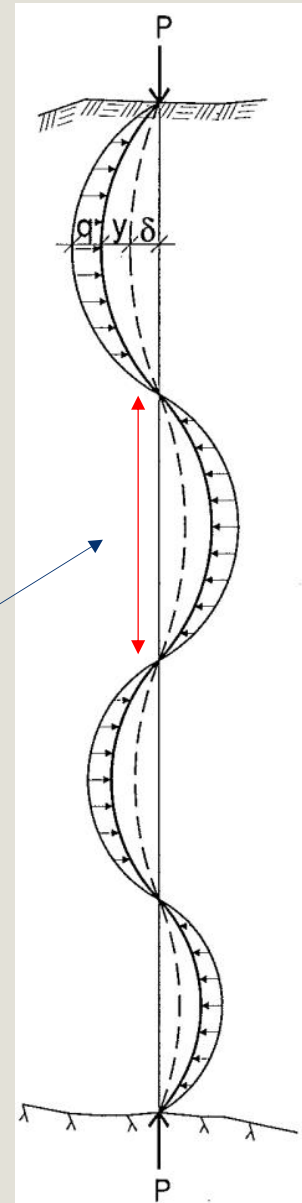


Rakenteellinen kestävyys $R_{cd, str}$ (paalun kestävyys)

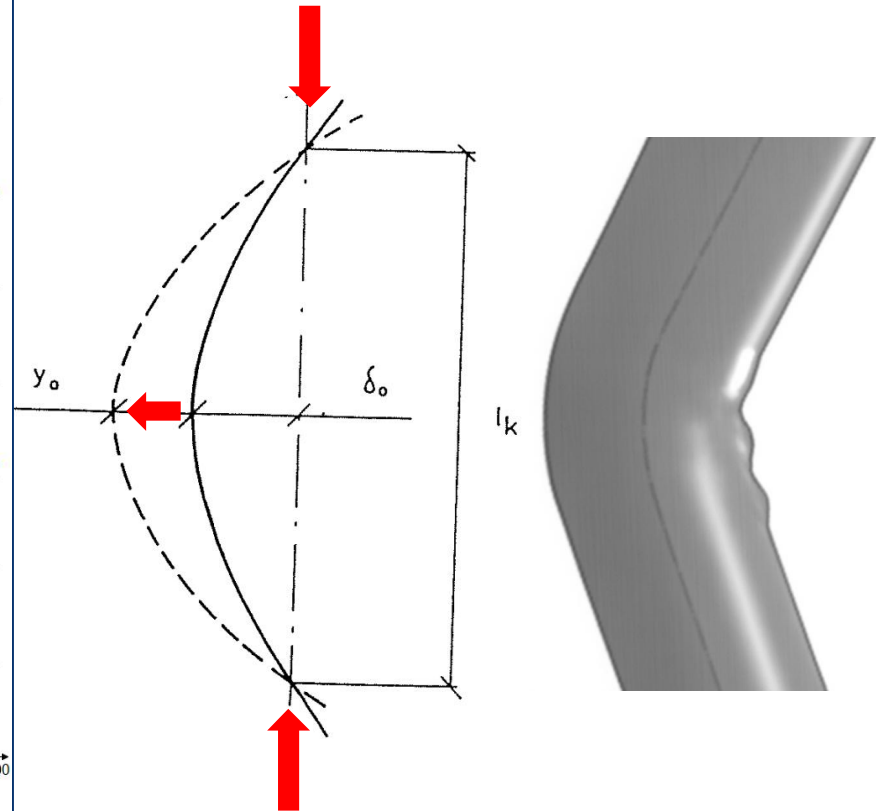
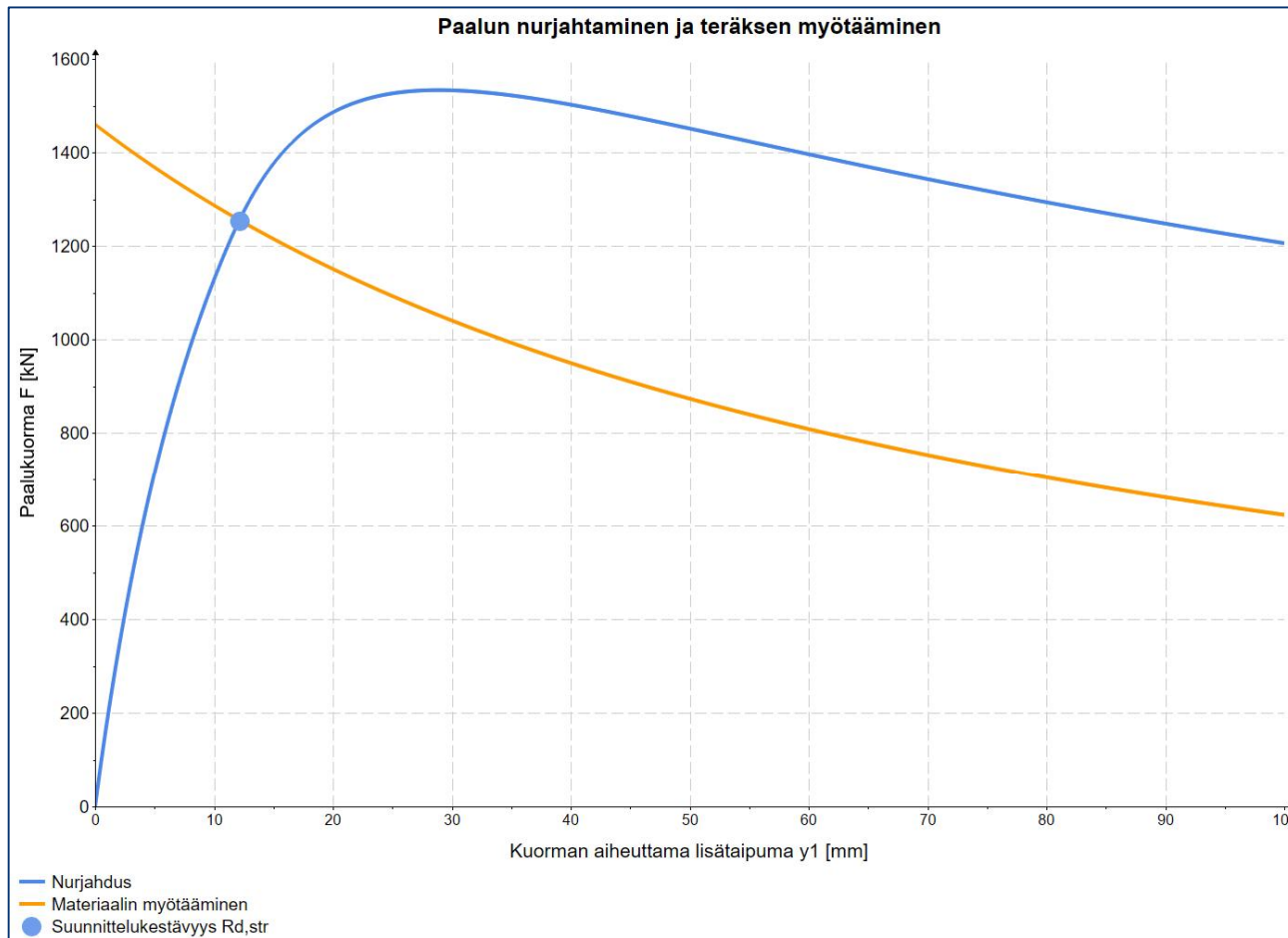
- Asennuksen jälkeen hoikalla paalulla oletetaan olevan alkukäyryyttä, joka noudattaa sinimuotoista käyrää.
- Maa tukee paalua sivusuunnassa kimmoplastisilla tuilla (tai tarkemmilla maamalleilla).
- Paaluun kohdistuva aksiaalinen voima lisää paalun taipumaa (toisen kertaluvun vaikutus).
- Mitoittava rakenteellinen kestävyys määräytyy sen suurimman voiman mukaan, jonka paalun ja maan muodostama systeemi kestää.

Oletettu
nurjahduspituus

$$L_{critical_buckling_length} := \pi \cdot \sqrt[4]{\frac{E_{pile} \cdot I_{pile}}{k_{subgrade_modulus_of_soil} \cdot d_{pile_diameter}}}$$



Paalutusohjeen PO-2016 mukainen menetelmä (iteratiivisesti)



Murtorajatilán rakenteellinen puristuskestävyys: $R_{cd, str} = 1254 \text{ kN}$
Puristava reunajännitys mitoittaa, ei nurjahdus.

Paalun rakenteellisen kestävyys laskennassa
käytettävät materiaalien osavarmuudet murtorajatilassa
(nykyiset arvot, hieman yksinkertaistettuna)

- Maan vaakakestävyys osavarmuus $\gamma_{Re} = 1,5$
- Teräksen osavarmuus (ei vedossa) $\gamma_M = 1,0$
- Betonin lujuuden osavarmuus $\gamma_c = 1,5$
- Betoniteräksen osavarmuus $\gamma_s = 1,15$

Esimerkki betonipaalujen rakenteellisesta kestävyydestä

Taulukko 2.3 RT Betonipaalujen® puristuskapasiteetit murtorajatilassa

Paalutyyppe	R _{d, str} [kN]								R _{d, geo} [kN] *)		
		P [%]	L [%]	c _u [kN/m2]					PTL1	PTL2	PTL3**)
				3	5	7	10	12			
RTB-250-16	Jatkettu paalu	100	0	375	508	613	739	805	624	698	791
		50	50	473	636	760	899	(947)			
		0	100	548	721	838	(947)	(1000)			
	Jatkamaton paalu	100	0	532	692	808	(927)				
		50	50	669	867	990	(1077)				
		0	100	764	933	1017	(1103)				

R_{cd, str}



Esimerkki teräspaalujen rakenteellisesta kestävyydestä

Taulukko 22a. RR- ja RRs-paalujen rakenteen puristuskestävyyden mitoitusarvot sekä geoteknisen kestävyiden mitoitussarvot eri paalutustyöluokissa. Rakenteen puristuskestävyys mitoitettu teräsrakenteena.

Korroosiovara 1,2 mm											
Paalu	Teräslaji	Alkutaipuma	Rakenteen puristuskestävyyden mitoitusarvo R_d [kN] suljettu leikkauslujuus c_{uk} [kPa]						Geoteknisen kestävyiden mitoitussarvot R_d [kN]		
			5	7	10	15	20	30	PTL1	PTL2	PTL3
RR75	S460MH	$L_{cr}/400$	210	257	318	359	377	398	195	259	324
		$L_{cr}/600$	245	298	346	377	395	415			
RR90	S460MH	$L_{cr}/400$	274	336	406	439	458	481	230	307	384
		$L_{cr}/600$	320	389	427	460	479	501			
RR115/6,3	S460MH	$L_{cr}/400$	421	516	562	600	622	648	301	401	502
		$L_{cr}/600$	489	550	590	628	649	672			
RR115/8	S460MH	$L_{cr}/400$	464	568	694	751	786	826	376	502	627
		$L_{cr}/600$	541	657	730	788	822	860			

$R_{cd, str}$

RR®- ja RD®-paalut

SUUNNITTELU- JA ASENNUSOHJEET

Ohje käsittelee SSAB:n valmistamia lyömällä ja puristamalla asennettavia RR- ja RRs-paaluja, poraamalla asennettavia RD- ja RDs-paaluja sekä lyömällä asennettavia injektaita RR-paaluja. Ohjeessa käsitellään kaikki SSAB:n teräspaalujen paalukoot. Ohje perustuu Paalutusohje PO-2016 -ohjeeseen ja Eurokoodi suunnittelujärjestelmään. Ohjeessa esitetään SSAB:n teräspaalujen ja paaluperustusten suunnittelun ja mitoituksen perusteet, suosituksia paalutyypin ja -koon valintaan, paalujen käsittely- ja asennusohjeet sekä paalutustyön laadunvalvonnan, mittausten sekä dokumentoinnin ohjeet. Ohje sisältää suunnittelua ja toteutusta helpottavia valmiiksi laskettuja mitoitustaulukoita sekä suunnittelu- ja toteutus esimerkkejä.

Käyttökohteet:

- pientalot
- yksi- ja monikerroksiset liike-, toimisto-, teollisuus- ja varastorakennukset
- monikerroksiset asuinkerrostalot
- urheiluareenat
- perustusten vahvistus
- sillat
- väylien ja kunnallistekniikan paalulaatat ja muut rakenteet
- melusteet ja aidat
- satamat
- tuuli- ja muut voimat



SSAB on maailmanlaajuisesti toimiva pohjoismainen ja yhdysvaltalainen teräsyhti. Yhtiön lisäarvoa tarjoavat tuotteet ja palvelut on kehitetty tiiviissä yhteistyössä asiakkaiden kanssa. Tavoitteena on vahvempi, kevyempi ja kestävämpi maailma. SSAB:llä on työntekijöitä yli 50 maassa ja tuotantolaitoksia Ruotsissa, Suomessa ja Yhdysvalloissa. Yhtiö on noteerattu NASDAQ OMX Nordic Tukholmassa ja toissijaisesti NASDAQ OMX Helsingissä.

www.ssab.fi/infra



Paalun puristuskestävyyden murtorajatilan suunnitteluarvo

Paalun kestävyys on geoteknisestä ja rakenteellisesta kestävyydestä pienempi:

$$R_{cd} := \min (R_{cd_geo} , R_{cd_str})$$

Yhteenveto

- Paalun geotekninen kestävyys $R_{cd,geo}$ määräytyy pääasiallisesti loppulyöntikriteerien perusteella.
- Loppulyöntikriteerien noudattaminen ja paalutuspöytäkirjojen tarkastaminen on siksi tärkeää.
- Paalun rakenteellisen kestävyuden määrittämisessä $R_{cd,str}$ huomioidaan paalun rakenne sekä paalua ympäröivän maan antama sivutuki.
- Paalun mitoituskestävyys on geoteknisestä ja rakenteellisesta pienempi:

$$R_{cd} := \min (R_{cd_{geo}} , R_{cd_{str}})$$

Kiitos

Antti Larkela, Ramboll Finland Oy
antti.larkela@ramboll.fi

RAMBOLL

Bright ideas.
Sustainable change.