

Suurpaalujen kantokestävyys tiivissä kitkamaassa

SGY Paalutuskoulutus 01.04.2026

Iida Kinnunen

AFRY Finland Oy

Diplomityö

- Työ valmistui 12/2025 ja löytyy julkisena netistä
- Työn on tilannut Väylävirasto toimeksiantona AFRY Finland Oy:ltä
- Tutkimuksen tausta
- Tutkimuksen tavoitteet
- Tutkimustyö
- Tutkimuksen tulokset
- Tutkimuksen johtopäätökset



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**LYÖTÄVIEN SUURILÄPIMITTAISTEN
TERÄSPUTKIPAALUJEN KANTOKESTÄVYYS
TIIVIISSÄ KITKAMAASSA:
KOEKUORMITUSTEN JA
SUUNNITTELUOHJEIDEN VERTAILU**

Iida Kinnunen

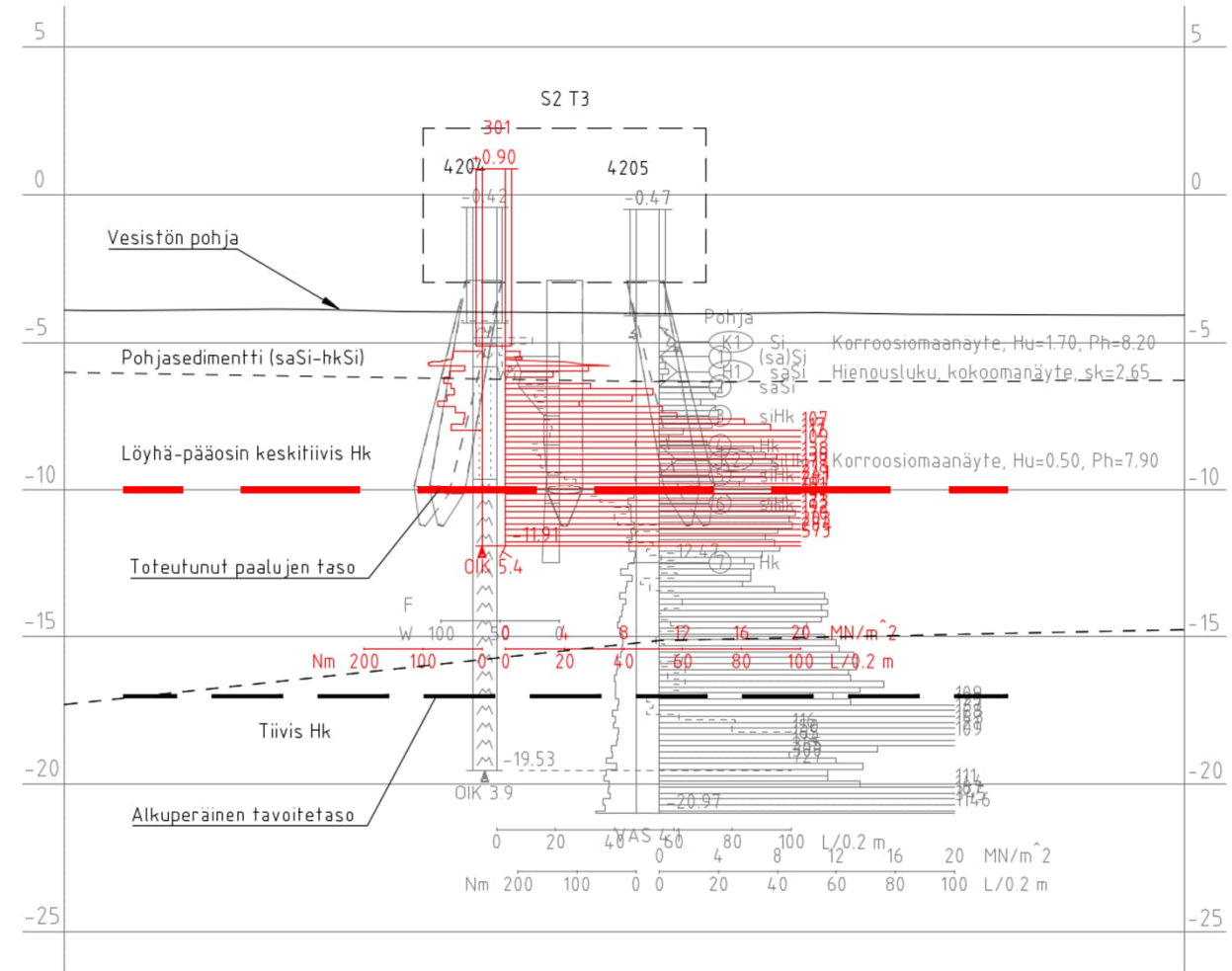
RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö

Joulukuu 2025

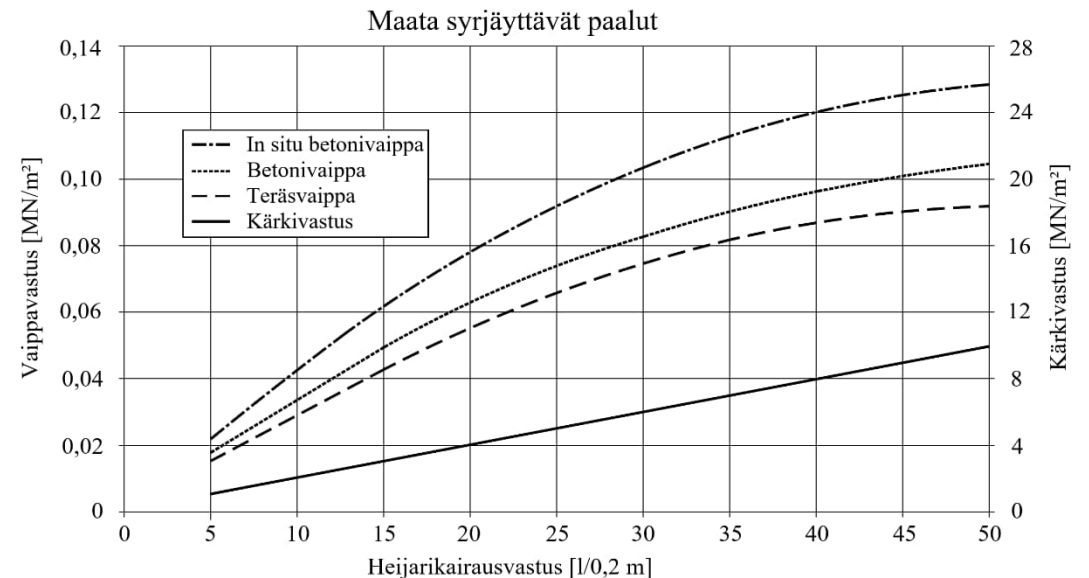
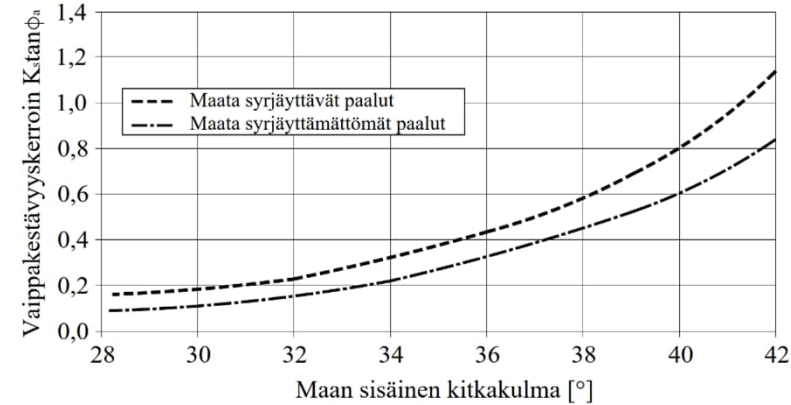
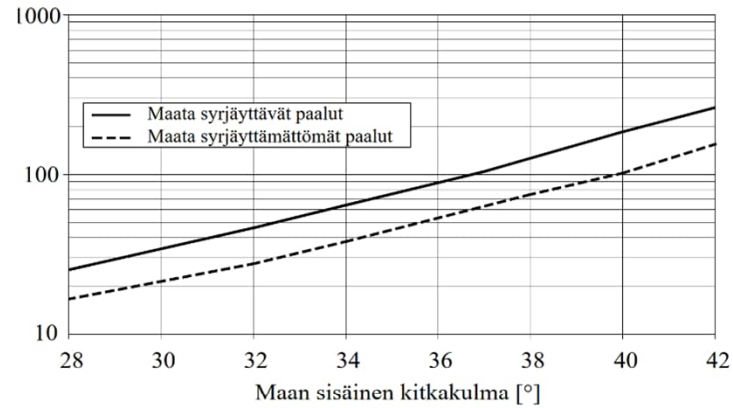
Tutkimuksen tausta

- Tutkimuskohteena on kaksi Suomessa lähes kokonaan vesistöalueelle sijoittuvaa siltaa
- Tutkimuskohteissa toteutetun paalutustyön aikana on havaittu merkittäviä poikkeamia toteutuneissa paalupituuksissa verrattuna koepaalutuksen ja suunnitteluohjeiden mukaisesti määritettyihin paalupituuksiin
- Työmaalla havaittujen haasteiden vuoksi koettiin tarpeelliseksi selvittää, miksi toteutuneet paalupituudet poikkeavat suunnitteluohjeen mukaisesti määritetyistä paalupituuksista



Tutkimuksen tausta

- Suomessa paalujen mitoitus tapahtuu suunnitteluohjeiden RIL 254-2016 Paalutusohje PO-2016 ja Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohjeen Geotekninen suunnittelu – NCCI 7 perusteella
- Suunnitteluohjeiden mukaan paalujen geotekniseen mitoitukseen liittyvät parametrit määritetään pohjatutkimus- tai koekuormitustuloksiin perustuen
- Pohjatutkimustuloksien perusteella määritetyt parametrit sisältävät usein sisäistä varmuutta
 - Tarvittavan paalukoon tai paalun upotussyvyyden ylimitoittaminen



Tutkimuksen tavoitteet

Taulukko 25. Kärki- ja vaippakestävyyden murtoarvojen arviointi kairausvastukseen perustuen karkearakeisissa maalajeissa (mukaillen RIL 2016, s. 68).

Tiiviys	Kitka- kulma [°]	Paino- kairaus [pk / 0,2 m]	Heijari- kairaus N ₂₀ [l/ 0,2 m]	CPT q _c [MPa]	Kärkivastus q _b [MPa]		Vaippavastus q _s [kPa]		
					Lyönti- ja puristus- paalut	Pora- paalut	Injek- toidut paalut	Lyönti- ja puristus paalut	Pora- paalut
Erittäin löyhä	29–33	<10	<5	<3	<1,0	<1,0	<50	<15	<15
Löyhä	33–35	0–20	5–10	3–7	1,0–2,0	1,0–1,5	50–100	15–30	15–25
Keski- tiivis	35–37	20–30	10–15	7–10	2,0–3,0	1,5–2,5	100–150	30–45	25–40
Tiivis	37–39	30–50	15–20	10–14	3,0–4,0	2,5–3,5	150–200	45–60	40–50
Erittäin tiivis	39–42	50–80	20–40	14–20	4,0–8,0	3,5–7,0	200–250	60–90	50–70

1. Dynaamisten koekuormitustulosten perusteella takaisinlaskea tutkimuskohteen paalujen kantokestävyyden suunnitteluarvot ja verrata niitä nykyisin käytössä olevien suunnitteluohjeiden mukaisiin arvoihin.

2. Tutkia paalutuksen aiheuttamaa maaperän tiivistymistä sekä selvittää mahdollisia syitä paalupituuksien poikkeavuuksiin analysoimalla kerättyä mittausaineistoa.

3. Saada valtakunnallisesti arvokasta tutkimustietoa tulevien siltahankkeiden paalutussuunnittelua sekä suunnitteluohjeiden kehitystyötä varten.

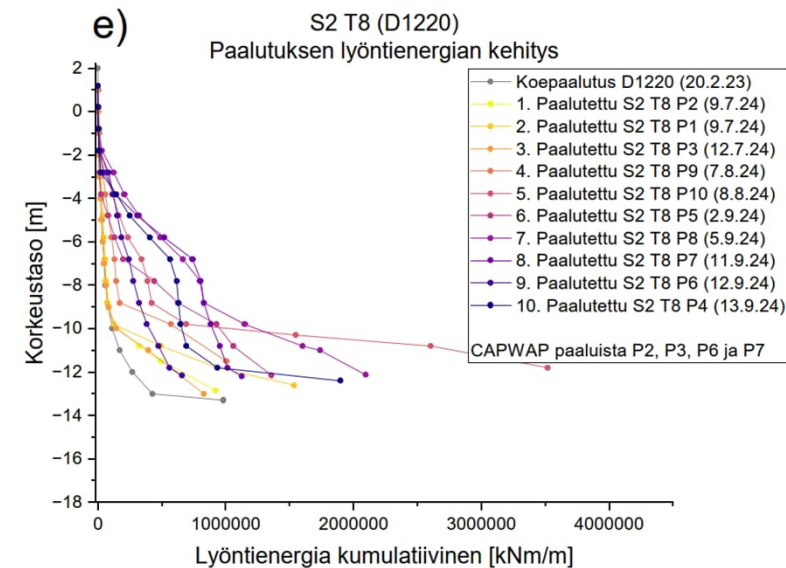
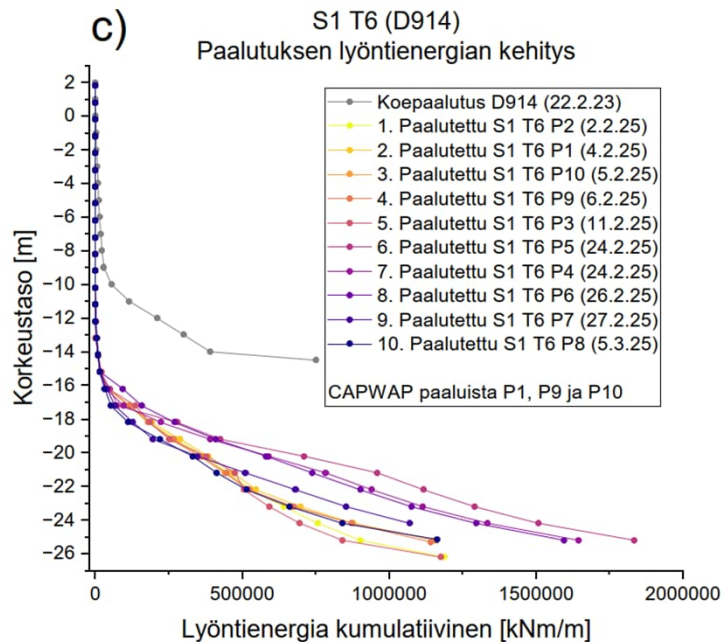
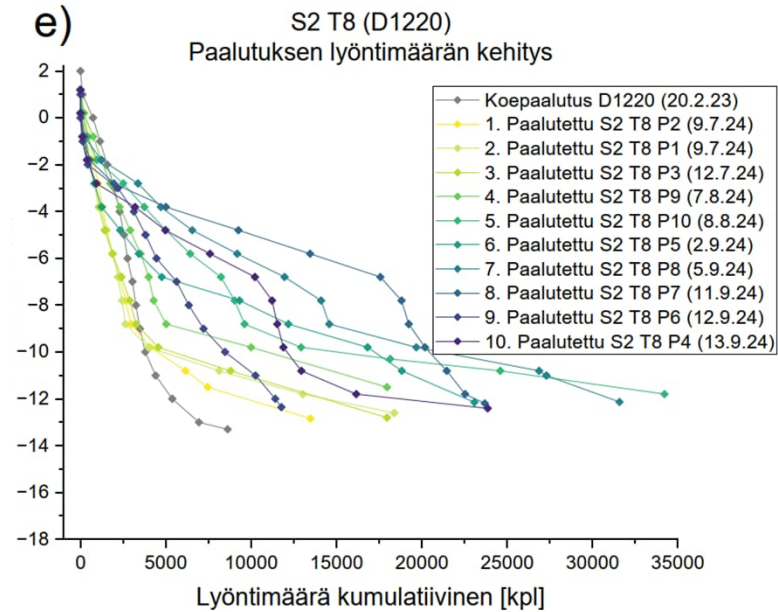
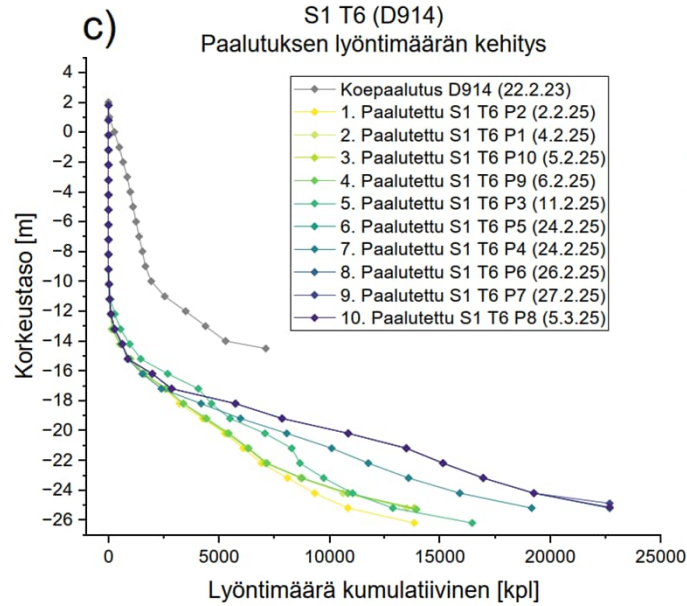
Tutkimustyö

- Lähtöaineisto kairaukset, paalutuspöytäkirjat, PDA-mittaukset, CAPWAP-analyysit
- Kairausten ja mittausten tulkinta
- Heijari- ja puristinheijarikairausten kairausvastuksen suhteen määrittäminen
- Vaippa- ja kärkivastuksen takaisinlaskenta PO-2016 mukaisilla kaavoilla
 - PDA- ja CAPWAP-perusteella
 - Heijari- ja puristinheijarikairauksen perusteella
- Maapohjan tiivistymisen arviointi
 - Lyöntienergian, paalutusajan ja kairausvastuksen sekä maan lujuusparametrien muutoksen perusteella

5	TUTKIMUSKOHTTEEN MITTAUSTULOKSET JA LASKELMIEN ESITTELY	58
5.1	Heijarikairauksen ja puristinheijarikairauksen kairausvastuksen suhde	58
5.2	Dynaamiset koekuormitukset ja CAPWAP-analyysit	60
5.3	Vaippakestävyuden kehittyminen	62
5.4	Paalun vaippavastuksen takaisinlaskenta	65
5.4.1	Dynaamisten koekuormitusten ja CAPWAP-analyysien perusteella	65
5.4.2	Heijarikairausvastuksen perusteella	67
5.4.3	Puristinheijarikairausvastuksen perusteella	67
5.5	Paalun kärkivastuksen takaisinlaskenta	70
5.5.1	Dynaamisten koekuormitusten ja CAPWAP-analyysien perusteella	70
5.5.2	Heijarikairausvastuksen perusteella	71
5.5.3	Puristinheijarikairausvastuksen perusteella	72
5.6	Maapohjan tiivistyminen paalujen lyönnin vaikutuksesta	73
5.6.1	Lyöntienergian perusteella	73
5.6.2	Paalutusajan perusteella	77
5.6.3	Kairausvastuksen ja maan lujuusparametrien muutoksen perusteella	79
6	TULOSTEN TARKASTELO JA POHDINTA	82
6.1	Takaisinlaskennan tulosten vertailu suunnitteluohjeisiin	82
6.2	Kairausvastussuhde	84
6.3	Maaperän tiivistyminen	85
6.4	Tulosten luotettavuus, toistettavuus ja merkittävyys	87
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	89
8	YHTEENVETO	93

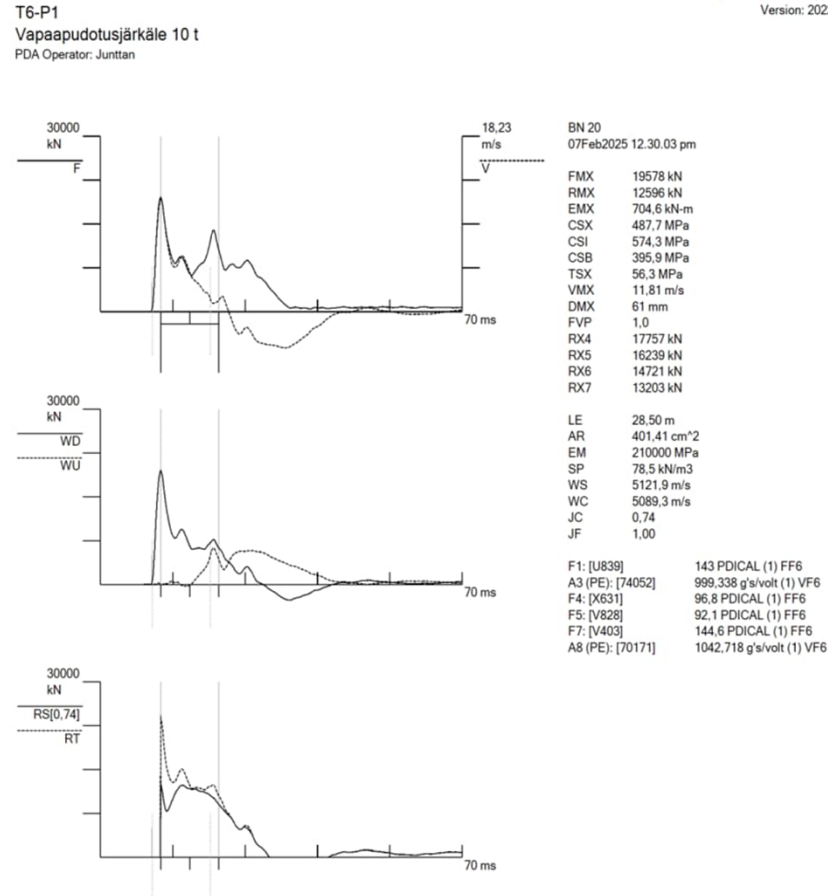
Aineisto: paalutustyö

- Lyötävät teräspalkkipaalut, mitoitettu kitkapaaluina
- S2 maatuilla Ø610/12,5 ja välituilla Ø1220/12,5
- S1 maatuilla Ø610/12,5 ja välituilla Ø914/12,5
- S2 Paalutus työpenkereeltä & S1 työsillalta
- S2 7 tn hydraulijärkäle & S1 9 tn
- Alusta alkaen paalujen tunkeutuminen keskitiiviiksi tulkittuun kerrokseen oli hankalaa
- Ø1220-paalut jäivät säännönmukaisesti alkuperäisestä tavoitetasosta
 - Lyöntimäärät jopa tuhansia lyöntejä metriä kohti
- S1:n Ø914-paaluilla samanlaisia haasteita kuin S2:n Ø1220-paaluilla
- Kuvaajissa esitetty paalujen kumulatiivinen lyöntimäärän ja -energian kehitys



Aineisto: PDA-mittaukset ja CAPWAP-analyysit

- PDA-mittauksella määritetään paalun geotekninen kantokestävyys kuormitushetkellä
- Saadaan selville mm. iskun keskeisyys sekä lyönnistä paaluun siirtynyt energia
- CAPWAP-analyysiä käytetään PDA-mittauksesta saatujen mittaustietojen analysointiin
- Arvioidaan tarkemmin paalun geoteknistä kantokestävyyttä
- Paalun kärki- ja vaippakestävyuden jakautuminen mittaushetkellä



File: T6-P1
Test: 07-Feb-2025 12:30
Vapaapudotusjärkäle 10 t; Blow: 20
JUNTTAN OY
CAPWAP (R) 2014-3
OP: Junttan

Version: 2022

CAPWAP SUMMARY RESULTS									
Total CAPWAP Capacity: 12786.6; along Shaft 6013.1; at Toe 6773.5 kN									
Soil Sgmt No.	Dist. Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru kN	Force in Pile kN	Sum of Ru kN	Unit Resist. (Depth) kN/m	Unit Resist. (Area) kPa		
1	12.2	1.7	78.3	12708.3	78.3	45.67	15.91		
2	14.3	3.8	146.8	12561.5	225.1	72.11	25.12		
3	16.3	5.8	195.8	12365.7	420.9	96.18	33.50		
4	18.3	7.8	244.7	12121.0	665.6	120.20	41.87		
5	20.4	9.9	391.6	11729.4	1057.2	192.36	67.00		
6	22.4	11.9	587.4	11142.0	1644.6	288.55	100.50		
7	24.4	13.9	783.2	10358.8	2427.8	384.73	134.01		
8	26.5	16.0	1762.1	8596.7	4189.9	865.59	301.50		
9	28.5	18.0	1823.2	6773.5	6013.1	895.61	311.95		
Avg. Shaft			668.1			334.06	116.36		
Toe				6773.5			10323.60		

Soil Model Parameters/Extensions		Shaft	Toe
Smith Damping Factor		0.33	0.08
Quake (mm)		1.5	24.3
Case Damping Factor		1.20	0.33
Damping Type		Viscous	Sm+Visc
Unloading Quake (% of loading quake)		101	90
Reloading Level (% of Ru)		100	100
Unloading Level (% of Ru)		50	
Soil Plug Weight (kN)		1.304	8.493
Soil Support Dashpot		3.322	0.000
Soil Support Weight (kN)		29.23	0.00

CAPWAP match quality = 1.14		(Wave Up Match) ; RSA = 0
Observed: Final Set = 10.0 mm;	Blow Count = 100 b/m	
Computed: Final Set = 10.9 mm;	Blow Count = 92 b/m	
Transducer F1 (U839) CAL: 143.0; RF: 1.00; F4 (X631) CAL: 96.8; RF: 1.00		
F5 (V828) CAL: 92.1; RF: 1.00; F7 (V403) CAL: 144.6; RF: 1.00		
A3 (74052) CAL: 999; RF: 1.00; A8 (70171) CAL: 1043; RF: 1.00		
max. Top Comp. Stress = 486.9 MPa		(T= 21.9 ms, max= 1.088 x Top)
max. Comp. Stress = 529.6 MPa		(Z= 14.3 m, T= 24.6 ms)
max. Tens. Stress = -36.84 MPa		(Z= 16.3 m, T= 50.1 ms)
max. Energy (EMX) = 700.3 kJ;		max. Measured Top Displ. (DMX)= 61.0 mm

Tutkimuksen tulokset: takaisinlaskenta

Kairausvastuksen suhde

- Kairausdiagrammeja tarkastellessa silmämääräisesti havaitaan eroavaisuuksia heijarin- ja puristinheijarin kairausvastuksissa
- Kairausvastusten suhde vaihtelee, mutta on pääsääntöisesti alle yhden
 - Puristinheijarikairauksen kairausvastus on keskimäärin pienempi kuin heijarikairaukseen
- Koko tarkastelun kairausvastussuhteen keskiarvo 0,8
- Puristinheijarikairauksen kairausvastus voidaan korjata heijarikairausta vastaavaksi kertomalla se kairausvastussuhteen 0,80 käänteisluvulla 1,25

Taulukko 11. Sillan S1 puristinheijari- ja heijarikairauksen kairausvastusten suhde syvyyden funktiona.

Syvyys [m]	Kairausvastuksen suhde				
	HP 4105 / HE 20 (S1 T2)	HP 59 / HE 22 (S1 T5)	HP 63 / HE 24 (S1 T6)	HP 1028 / HE 27 (S1 T9)	HP 1031 / HE 28 (S1 T10)
-6				1,00	0,27
-8	1,00			0,83	0,83
-10	0,82	0,1	0,42	0,46	0,75
-12	0,81	0,1	0,45	0,50	0,68
-14	0,92	0,5	0,55	0,75	0,72
-16	0,79	0,98	0,73	0,61	1,42
-18	0,75	1,07	1,31	1,00	0,73
-19	1,08			0,64	0,67
-20		0,74	0,77		
-22		0,70	0,64		
-24		0,73	0,61		
-25		0,33			
-26			0,89		
-28			0,73		
-30			0,59		
-31			0,46		
KA.	0,88	0,64	0,68	0,72	0,76

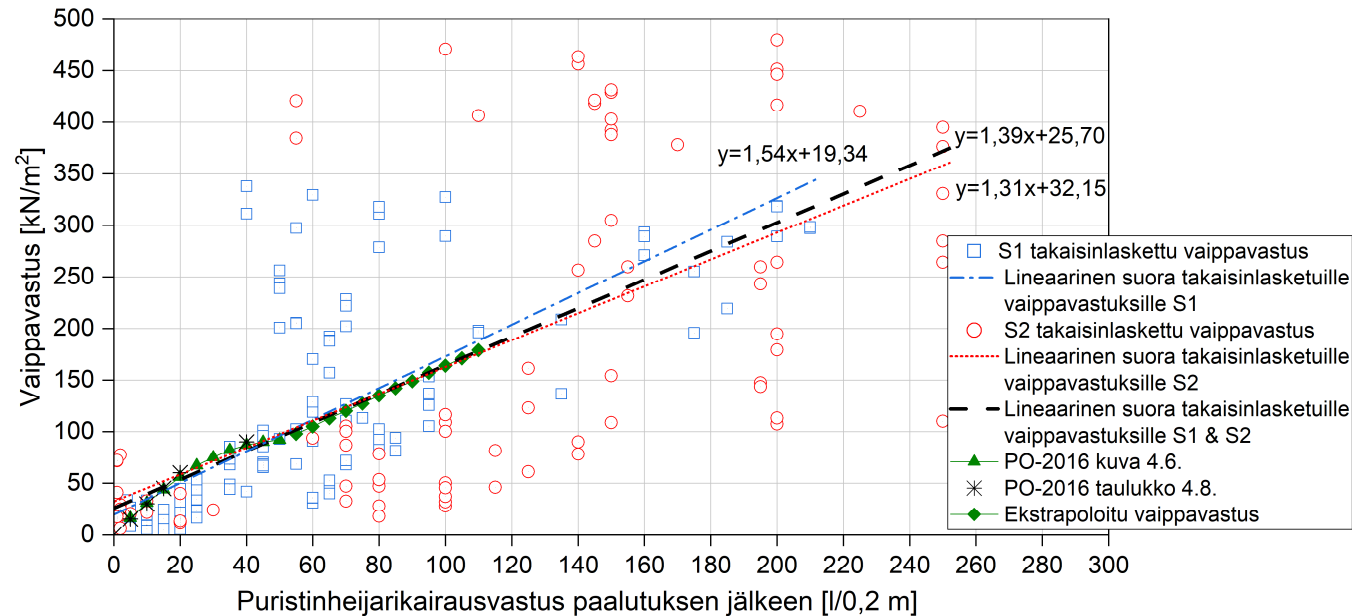
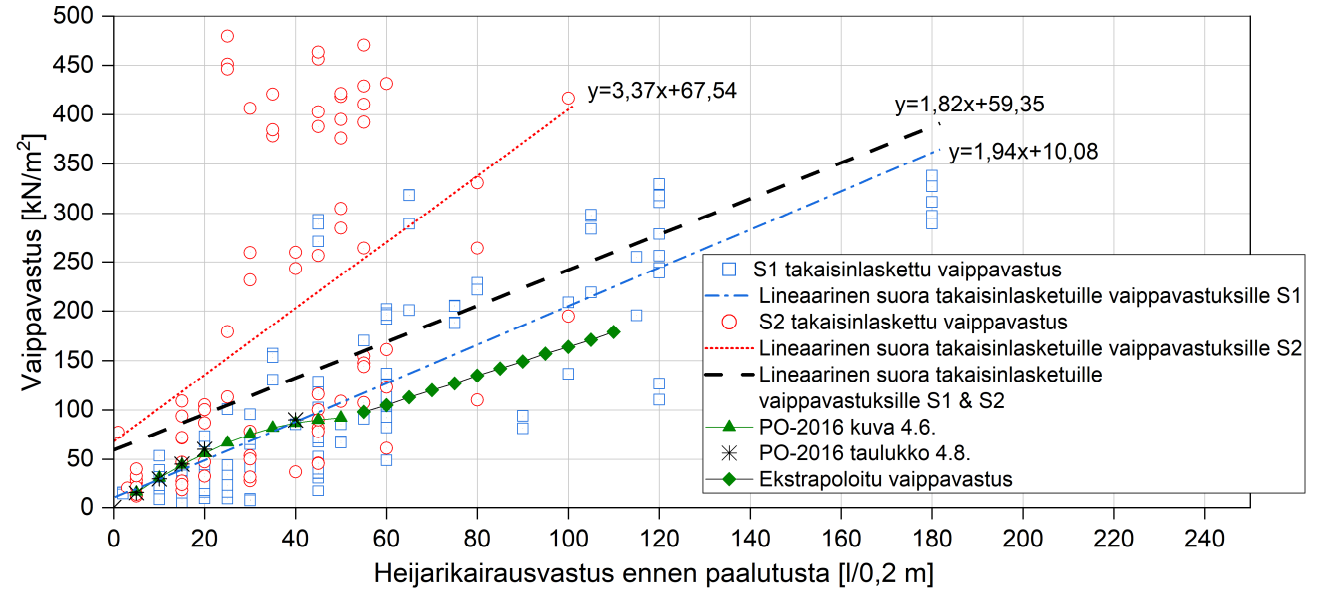
Taulukko 12. Sillan S2 puristinheijari- ja heijarikairauksen kairausvastusten suhde syvyyden funktiona.

Syvyys [m]	Kairausvastuksen suhde				
	HP 4202 / HE 4203 (S2 T2)	HP 4205 / HE 4204 (S2 T3)	HP 502 / HE 4207 (S2 T4)	HP 2018 / HE 124 (S2 T6)	HP 507 / HE 4217 (S2 T8)
-6	1,17	0,83	0,02		
-8	0,92	1,17	0,4	0,88	
-10	0,88	1,75	0,72	0,94	0,32
-12	0,63	0,85	0,73	1,57	1,30
-14	0,55	0,73	0,46	1,13	1,19
-16	0,47	1,00	0,63	0,58	0,98
-17	0,74				
-18		1,5	1,18		0,25
-19		0,29	0,58		
KA.	0,76	1,02	0,67	1,02	0,81

Tutkimuksen tulokset: takaisinlaskenta

Vaippavastus

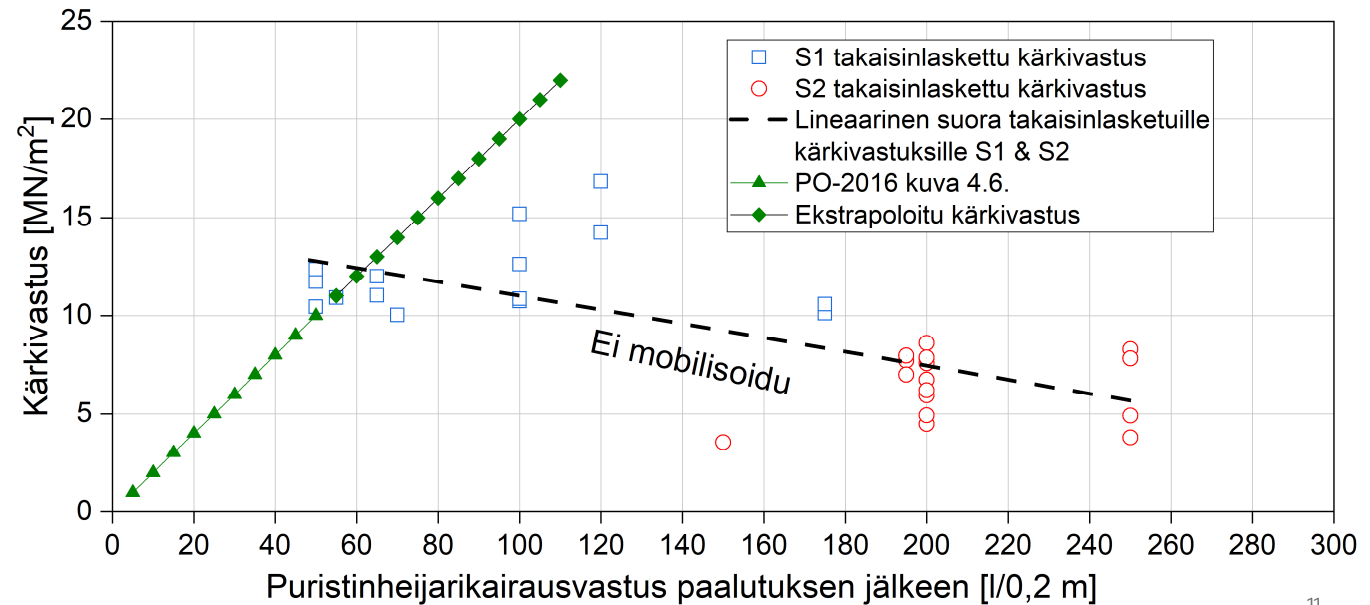
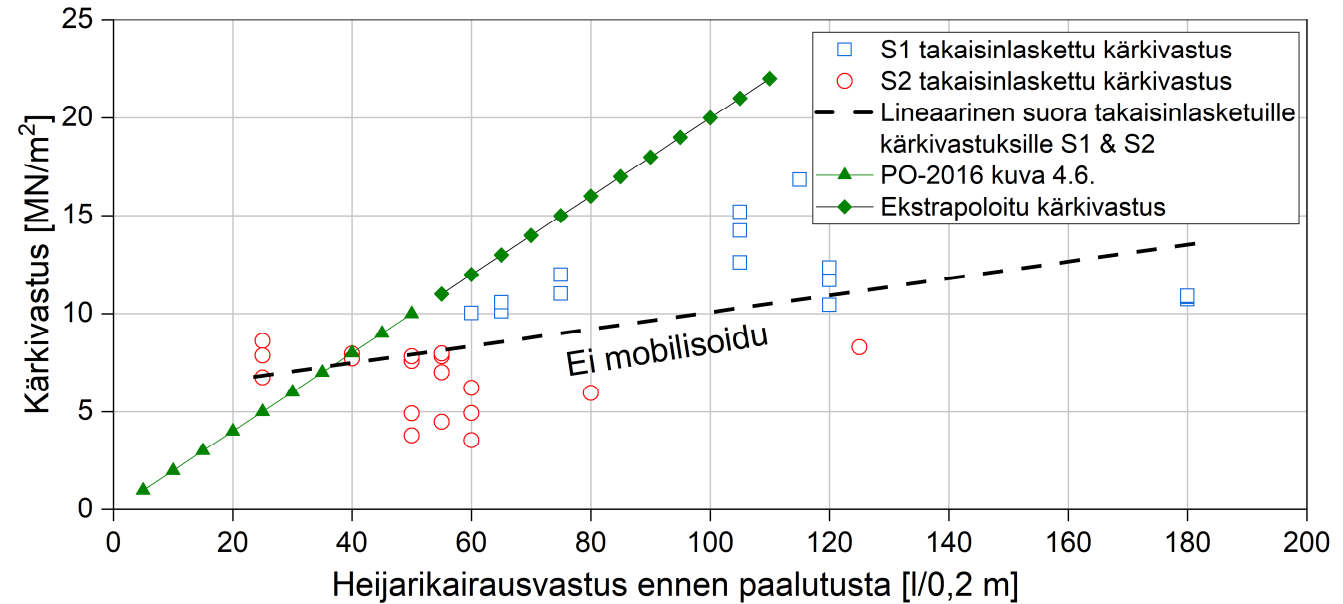
- Suunnitteluohjeen mukainen maksimi 90 kN/m²
- Kirjallisuuden mukainen maksimi 150 kN/m²
- Sillan S2 takaisinlaskennassa suurimmat vaippavastuksien arvot yli 400 kN/m²
 - Prosentuaalisesti suurin ero on 522 % verrattuna suunnitteluohjeen maksimiin
 - 313 % verrattuna kirjallisuuden maksimiin
- Sillan S1 takaisinlaskennassa vaippavastukselle suurimmat arvot ovat yli 300 kN/m²
 - Prosentuaalisesti suurin ero on 375 % verrattuna suunnitteluohjeen maksimiin
 - 225 % verrattuna kirjallisuuden maksimiin
- Takaisinlasketut vaippavastukset vastaavat enemmän paalutuksen jälkeistä jo tiivistynyttä maaperää



Tutkimuksen tulokset: takaisinlaskenta

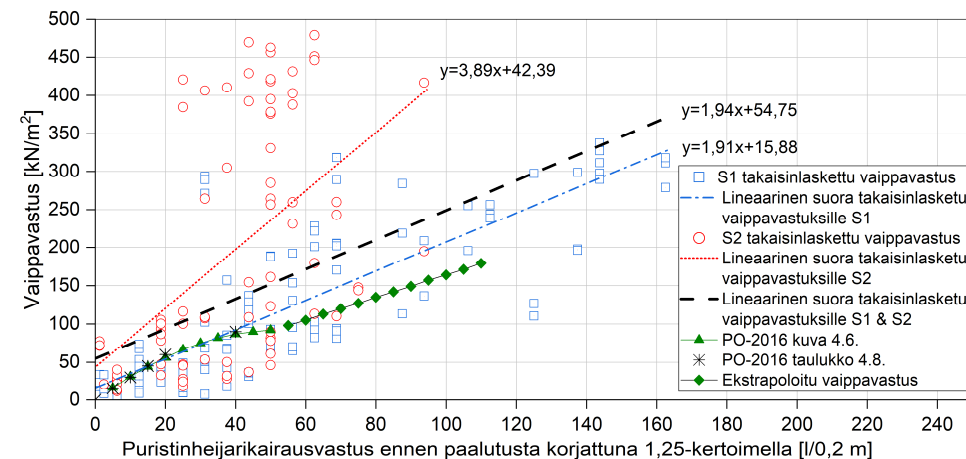
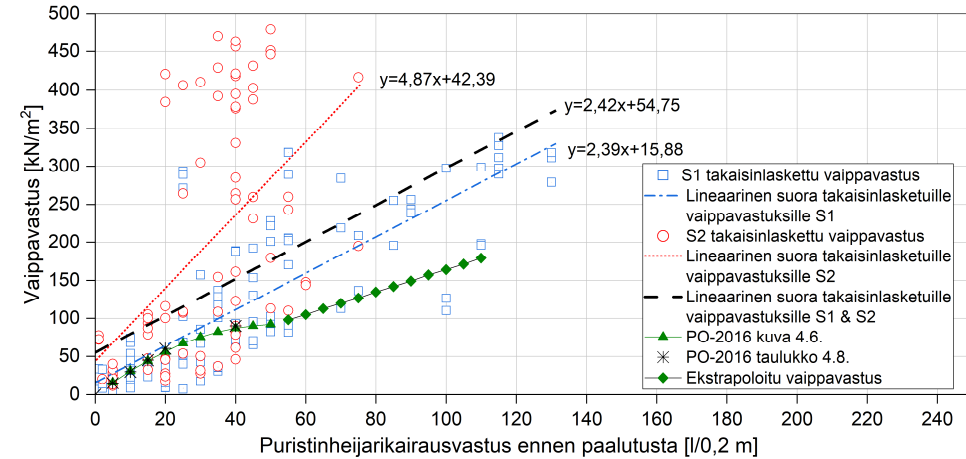
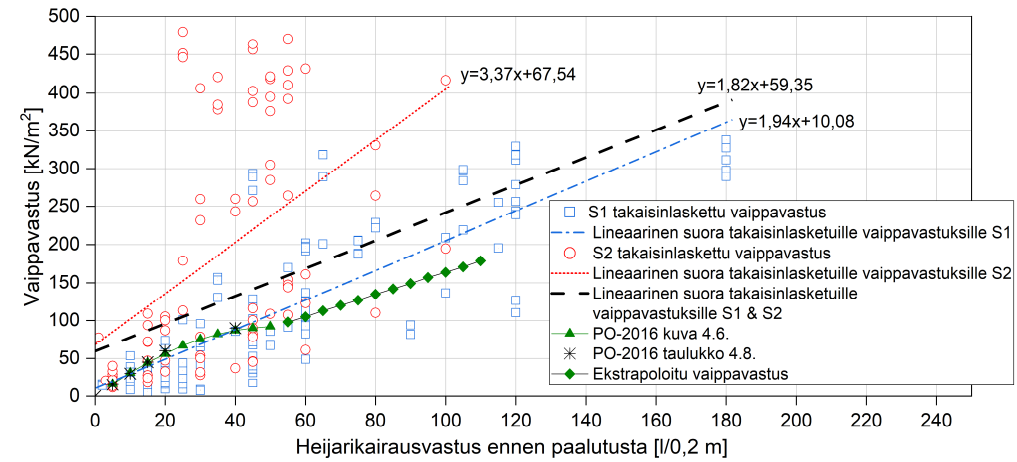
Kärkivastus

- Suunnitteluohjeen mukainen maksimi 8 MN/m²
- Kirjallisuuden mukainen maksimi 15 MN/m²
- Sillan S2 takaisinlasketuista kärkivastuksista suurin osa ei saavuta suunnitteluohjeen mukaista maksimia
- Sillan S1 takaisinlaskennoissa ylitetään 10 MN/m²
 - keskiarvo on 11,873 MN/m²
 - suurin on 16,847 MN/m²
- Kärkikestävyyden heikko mobilisoituminen
 - Takaisinlasketut kärkivastukset ovat pieniä suhteessa suunnitteluohjeisiin
 - Kärkivastuksen takaisinlaskennan tulokset eivät osoittautuneet luotettaviksi



Tutkimuksen johtopäätökset: takaisinlaskenta

- Takaisinlaskenta perusteella nykyiset pohjatutkimuksiin perustuvat mitoitusmenetelmät aliarvioivat vaippavastusta keskitiiviissä ja tiiviissä hiekassa
- Aliarviointi on suurempaa puristinheijarikairauksella kuin heijarikairauksella
- Puristinheijarikairauksen kairausvastuksen muuttaminen vastaamaan heijarikairauksen kairausvastusta korjauskertoimella 1,25 on toimiva ratkaisu
- PO-2016 -ohjeessa esitettyjä vaippa- ja kärkivastuksen ominaisarvoja tulisi tarkentaa suuriläpimittaisille paaluille tiiviissä kitkamaassa
- Tutkimuksen mukaan vaippavastus on 20–50 % suurempi kuin nykyiset ohjearvot
- Kärkivastusten osalta kasvu oli vähäisempää, keskimäärin noin 10 %



Tutkimuksen tulokset: tiivistyminen

- Paalutuksen aiheuttamaa maaperän tiivistymistä tutkittiin lyöntienergian ja paalutusajan perusteella
- Sillalla S1 lyöntienergian ja paalutusajan keskiarvojen perusteella paalutustyön vaikeusjärjestys tukien välillä oli samankaltainen
 - Mitä suurempi energiamäärä tarvitaan, sitä pidempi paalutusaika keskimäärin on
- S2 tehtiin löyhdytysporauksia, minkä vuoksi täysin yhtenevää samankaltaisuutta ei löytynyt
 - Lyöntienergian tarve voi kasvaa vinojen paalujen asennuksessa
- Paalutustyön analysoinnin perusteella 7 tn ja 9 tn järkäleet eivät ole optimaalisia D1220 lyöntipaalun asennukseen hiekkaisessa maaperässä

Taulukko 19. Sillan S1 paalujen keskiarvolliset lyöntienergiat tuittain ja paalukoittain.

Tuki	S1 T2	S1 T5	S1 T6	S1 T9	D914 yht.	S1 T10 D610	Kaikki yht.
Lyöntienergian keskiarvo [kNm/m]	6,47E+5	1,06E+6	1,36E+6	1,01E+6	1,02E+6	6,76E+5	9,48E+5
Järjestys pienimmästä suurimpaan	1.	3.	4.	2.	-	-	-

Taulukko 21. Sillan S1 paalujen keskiarvolliset lyöntiajat tuittain ja paalukoittain.

Tuki	S1 T2	S1 T5	S1 T6	S1 T9	D914 yht.	S1 T10 D610	Kaikki yht.
Lyöntiajan keskiarvo [min]	269	447	610	397	431	370	418
Järjestys pienimmästä suurimpaan	1.	3.	4.	2.			

Taulukko 20. Sillan S2 paalujen D1220 keskiarvolliset lyöntienergiat tuittain.

Tuki	S2 T2	S2 T3	S2 T4	S2 T6	S2 T8	Kaikki yht.
Lyöntienergian keskiarvo [kNm/m]	8,16E+5	8,62E+5	8,77E+5	1,83E+6	8,62E+5	1,05E+6
Järjestys pienimmästä suurimpaan	1.	2.	4.	5.	3.	
Vinojen paalujen lyöntienergian keskiarvo [kNm/m]	8,75+E5	9,80+E5	8,93+E5	1,74+E6	8,38E+5	1,06+E6
Suorien paalujen lyöntienergian keskiarvo [kNm/m]	6,41+E5	3,91+E5	8,13+E5	2,32+E6	9,60E+5	1,03+E3
Ero vinojen ja suorien välillä [%]	36,43	150,87	9,83	-25,19	-12,74	3,82

Taulukko 22. Sillan S2 paalujen D1220 keskiarvolliset lyöntiajat tuittain.

Tuki	S2 T2	S2 T3	S2 T4	S2 T6	S2 T8	Kaikki yht.
Lyöntiajan keskiarvo [min]	471	440	409	754	951	605
Järjestys pienimmästä suurimpaan	3.	2.	1.	4.	5.	

Tutkimuksen tulokset: tiivistyminen

- Paalutuksen aiheuttamaa maaperän tiivistymistä tutkittiin myös kairausvastuksen ja maan lujuusparametrien muutoksella
 - Vertailtiin kairausvastusta ennen ja jälkeen paalutuksen
- Kairausvastusten kasvua havaittiin erityisesti 6–12 metrin syvyysvälillä
 - Vastuksen nousu oli tyypillisesti 30–60 %, mikä viittaa hiekkakerroksen merkittävään tiivistymiseen paalutuksen seurauksena
- Tiivistymisen vaikutukset ulottuivat leveyssuunnassa 3–6 paalun halkaisijan etäisyydelle
 - Kirjallisuudessa esitetty 3–4,5 paalun halkaisijan etäisyydelle
- Syvyys suunnassa tiivistymistä tapahtuu pääasiassa noin 4–6 kertaa paalun kärjen halkaisijan matkalta paalun kärjen alapuolisessa maakerroksessa.
 - Kirjallisuudessa 6 paalun halkaisijan matkalta

Taulukko 23. Sillan S2 ennen paalutusta ja paalutuksen jälkeen tehtyjen puristinheijarikairausten kairausvastusten suhde.

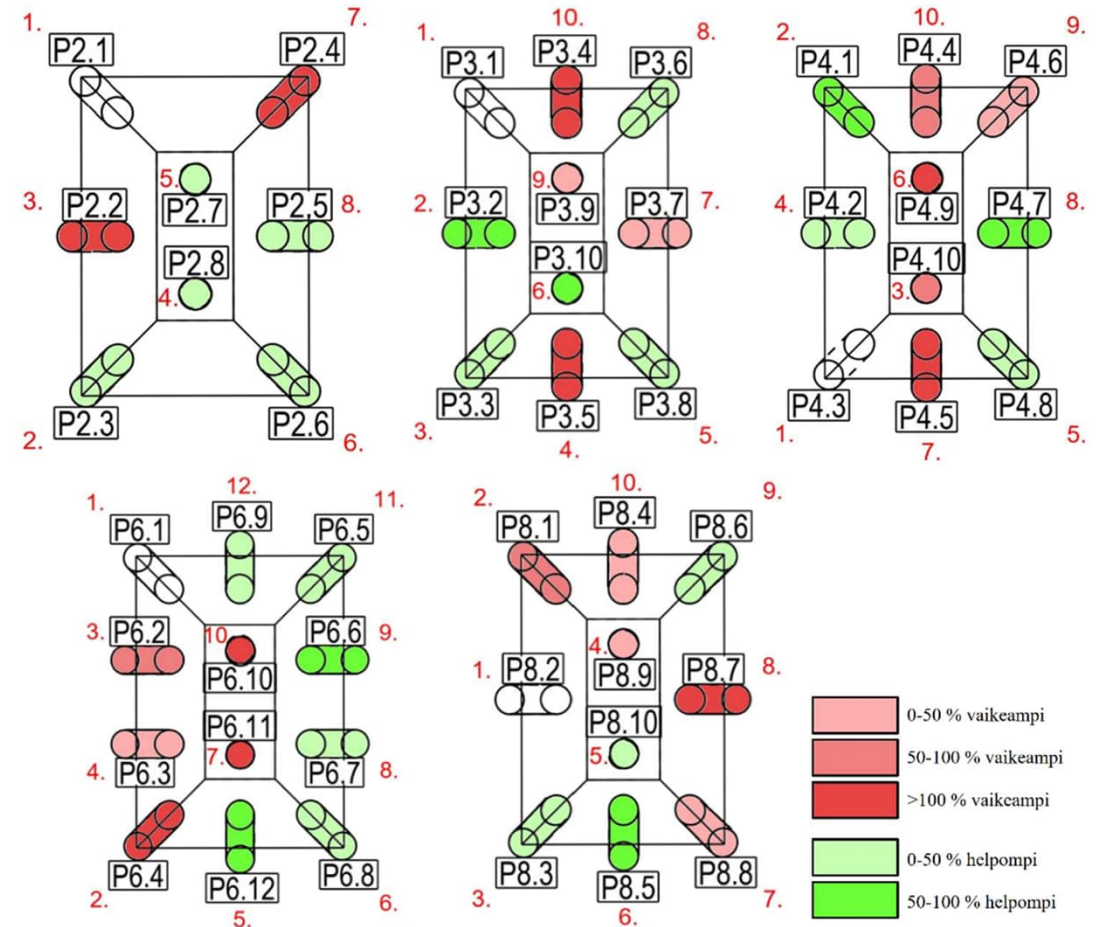
Syvyys [m]	Kairausvastuksen suhde				
	HP 201 / HP 4202 (S2 T2)	HP 301 / HP 4205 (S2 T3)	HP 401 / HP 502 (S2 T4)	HP 601 / HP 503 (S2 T6)	HP 800 / HP 507 (S2 T8)
-5		2,5			
-6	5,0	2,0			
-7	7,4	1,5	6,7	2,0	
-8	11,0	4,0	7,5	2,8	1,0
-9		3,0	8,6	5,5	2,2
-10		5,1		5,8	4,4
-11		4,4			3,3
-12		7,1			
K.A.	7,8	3,7	7,6	4,0	2,7
Järjestys pienimmästä suurimpaan	5.	2.	4.	3.	1.
Kairauspisteiden etäisyys toisistaan [m]	4,7	10,9	3,2	6,8	6,0
Paalutuksen jälkeisen kairauksen etäisyys lähimpään paaluun [D]	1,7	1,0	1,0	1,9	1,9

Taulukko 24. Sillan S1 ennen paalutusta ja paalutuksen jälkeen tehtyjen puristinheijarikairausten kairausvastusten suhde.

Syvyys [m]	Kairausvastuksen suhde				
	HP 201 / HP 4105 (S1 T2)	HP 501 / HP 59 (S1 T5)	HP 601 / HP 63 (S1 T6)	HP 901 / HP 1028 (S1 T9)	HP 1001 / HP 1031 (S1 T10)
-6				1,0	4,0
-7				1,0	2,0
-8				0,5	2,5
-9	0,8			0,5	3,5
-10	1,5		2,5	1,0	3,5
-11	1,0	4,0	5,0	5,0	1,5
-12	1,0	5,0	2,0	2,0	1,7
-13	1,0	4,0	1,7	2,0	1,5
-14	0,6	0,7	1,7	1,0	1,7
-15	1,7	1,3	2,6	1,8	2,5
-16	4,5	2,2	1,3	1,8	1,9
-17	1,5	2,2	1,0	1,1	
-18	1,3	2,1	1,2	0,7	
-19	0,6	1,4	1,6	0,5	
-20	0,8	1,0	1,8	0,4	
-21	0,7	1,0	3,2		
-22	0,7	1,4	4,7		
-23	0,6	1,3	13,5		
-24		1,6			
-25		1,8			
-26		1,1			
-27		0,9			
-28		1,2			
-29		1,1			
K.A.	1,2	1,9	3,1	1,3	2,4
Järjestys pienimmästä suurimpaan	1.	3.	4.	2.	-
Kairauspisteiden etäisyys toisistaan [m]	8,5	19,3	20,2	6,0	12,2
Paalutuksen jälkeisen kairauksen etäisyys lähimpään paaluun [D]	6,0	4,8	5,0	7,1	5,1

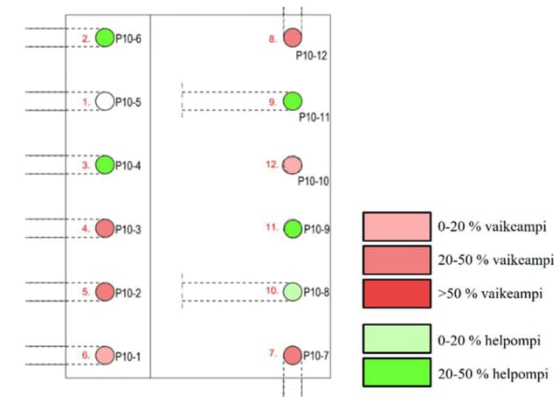
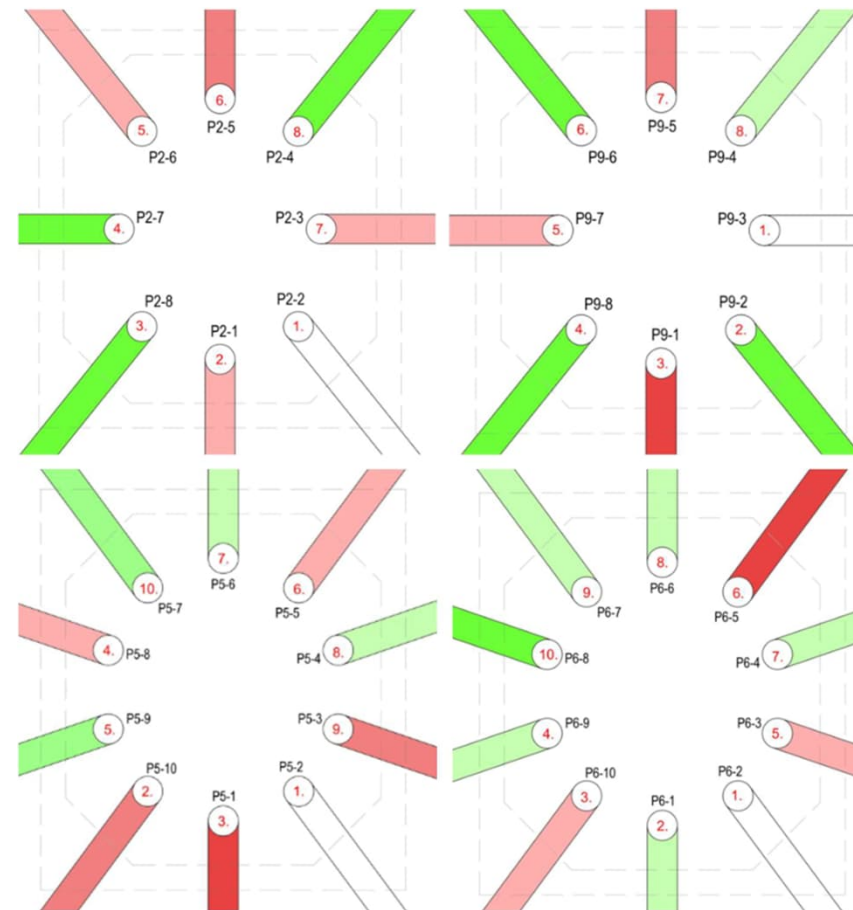
Tutkimuksen johtopäätökset: tiivistyminen

- Tulosten perusteella suuriläpimittaisten teräspalkkipaalujen asennus pudotusjärjelmällä tiivisti voimakkaasti hiekkamaata
 - Tiivistymisen seurauksena vaippa- ja kärkivastukset kasvoivat merkittävästi, mikä lisäsi lyöntimääriä ja hidasti paalutustyötä
- Paalutuksessa käytetty lyöntienergia on selkeässä yhteydessä paalutusaikaan ja puristinheijarikairauksen kairausvastuksella määritettyyn tiivistymisen suuruuteen
- Lyöntienergian tarve voi kasvaa jopa 60 % vinojen paalujen asennuksessa D1220-paaluilla
- Paalutustyön ajallinen hidastuminen on tutkimuksen mukaan keskimäärin 20–40 % paalutustyön edetessä
- Paalutusajan kasvu vastaa noin 60 % pidempää asennusaikaa halkaisijan kasvaessa 610 millimetristä 1220 millimetriin



Miksi paalupituudet poikkesivat suunnitellusta?

- Paalutuksen aiheuttama maaperän tiivistyminen on merkittävin yksittäinen tekijä, joka selittää toteutuneiden paalupituuksien poikkeamat suunnitteluohjeisiin nähden
 - Suunnittelussa vaippa- ja kärkivastukset olisi pitäneet olla moninkertaisia kirjallisuuden maksimista
 - Tiivistyminen kasvattaa hiekan sisäistä kitkakulmaa ja siten parantaa maaperän lujuusominaisuuksia
- Muut tekijät:
 - vinopaalujen käyttö suorien paalujen sijaan
 - koepaalujen ja siltapaalujen seinämävahvuuden erot
 - paalun kärjen alapuolella rakeisuudeltaan erilainen maakerros
- Tiivistymisvaikutuksen erot siltapaikkojen S1 ja S2 välillä selittyvät paalukoon ja rakentamismenetelmän eroilla, sillä sillalla S2 työpenkereen paino on osaltaan lisännyt maaperän tiivistymistä
- Huomioitava paalukohtainen vaihtelu



Kuva 26. Sillan S1 paalujen lyöntienergian prosentuaalinen muutos edelliseen paaluun verrattuna.

Mitä jatkotutkimustarpeita tai pohdittavaa?

1.

Kenttätutkimuksien laajentaminen eri maaperäolosuhteisiin eri puolilla Suomea, jotta voidaan muodostaa tilastollisesti kattava aineisto suuriläpimittaisten paalujen käyttäytymisestä eri kitkamaalajeissa. Näin voitaisiin vahvistaa tutkimustulosten yleistettävyyttä ja kehittää kansallisia suunnitteluparametreja.

2.

Puristinheijarikairauksen ja heijarikairauksen välisen korjauskertoimen 1,25:n tarkentaminen laajempien kenttätutkimusten ja todellisten suunnittelukohteiden avulla, jotta korjauskertoimen luotettavuus ja soveltavuus voidaan varmentaa.

3.

GRLWEAP-analyysien laajempi käyttö myös Suomessa olisi perusteltua erityisesti

- tiivistyvissä maaperissä
- pitkien paalujen tapauksissa
- tilanteissa, joissa tärinät ja ympäristövaikutukset on minimoitava

4.

Paalun geoteknisen kestävyuden määrittäminen suoraan puristinheijarikairauksen perusteella.

Puristinheijarikairaus on yleistynyt Suomessa 2000-luvulla ja tällä hetkellä mitoittaminen suhteutetaan muihin kairauksiin oman menetelmän sijaan.

