

# Paalutyypin vaihto projektissa



 **PAALU**  
**SEMINAARI**  
**2012**

*Ajankohta: 29.11.2012*

*Paikka: Rantasipi Airport Congress Center, Robert Huberin tie 4, 01510 Vantaa*

# Tarmo Tarkkio, Skanska Infra oy

- PAALUTYYPIN  
VALINTA-
  - MYSTEERI?

# Pohjarakennus selostusta

Maa-alueella nykyinen maaperä koostuu pintaosaltaan erilaisista kadun ja puistoalueen rakennekerroksista sekä niiden alapuolella sekalaisista täytemaakerroksista aina 4...7 m syvyyteen. Täytemaakerrokset ovat lähinnä moreenia, hiekkaa, soraa, siltistä hiekkaa, silttiä, kiviä, lohkareita, mahdollisesti tukkipuita, sekalaista täytemaata sekä pintamaita. Täytemaakerrokset ovat painuneet ja sekoittuneet aikojen kuluessa huomattavastikin alapuoliseen liejuun ja pehmeisiin savi- ja silttikerrokseen, joiden paksuus maa-alueella on noin 2-4 m.

# Pohjarakennus selostusta, jatkuu

Paalut ovat 273x12,5 S440J2H putkipaaluja. Paaluputkien jatkokset on tehtävä hitsaamalla PPO-2007 ohjeiden mukaan siten, että jatkos vastaa lujuudeltaan täyttä poikkileikkausta. Kohteen vaativuusluokka (A), hitsiluokka C. Paalujen lyönnissä seurataan PPO:n 2007 paalutusluokan II ohjeita. Paalutuksesta on pidettävä paalukohtaistapöytäkirjaa, josta tulee käydä ilmi **paitsi loppulyönnit myös lyöntityön vaiheet eri maakerroksissa.**

Vanhan ja/tai uuden rantapenkereen läpäisy paaluilla voi olla vaikeaa. Tämän vuoksi varustetaan paalut kalliokärjellä. Ennen paalujen lyömistä asennusta avustetaan kaivamalla penkereestä pois suuret kivet ja lohkareet ja/ tai käytetään apupaalua esireiän tekemiseen varsinaiselle paalulle.

Paalut lyödään tukipaaluiksi moreenikerrokseen. Paalujen tavoitetasot on esitetty pohjaatutkimuspiirustuksissa.

# Pohjarakennus selostusta, jatkuu...

Suurin sallittu paalukuorma on 200 kN puristusta. Paaluille mahdollisesti tulevien lyhytaikaisten/tilapäisten vetokuormien (jään noste) takia tulee paalut pyrkiä lyömään vähintään suunnitelmassa esitettyihin alustaviin tavoitetasoihin asti, vaikka puristuskantavuus olisikin saavutettavissa aiemmin. Paalut on suunniteltu lyötäväksi 3 m moreeniin.

Paalun lyönti voidaan lopettaa ennen tavoitetasoa vain jos se pysähtyy moreenikerroksen kiveen, alkuperäisissä maakerroksissa olevaan lohkareseen, joka ulottuu moreeniin ja jos samalla PPO:n mukaiset loppulyöntiehdot täyttyvät. Paalun tulee kuitenkin aina ulottua liejun, saven ja siltin alapuolisiin tiiviisiin pohjakerrostumiin. Paalut täytetään itsetiivistyvällä betonilla K 40-2.

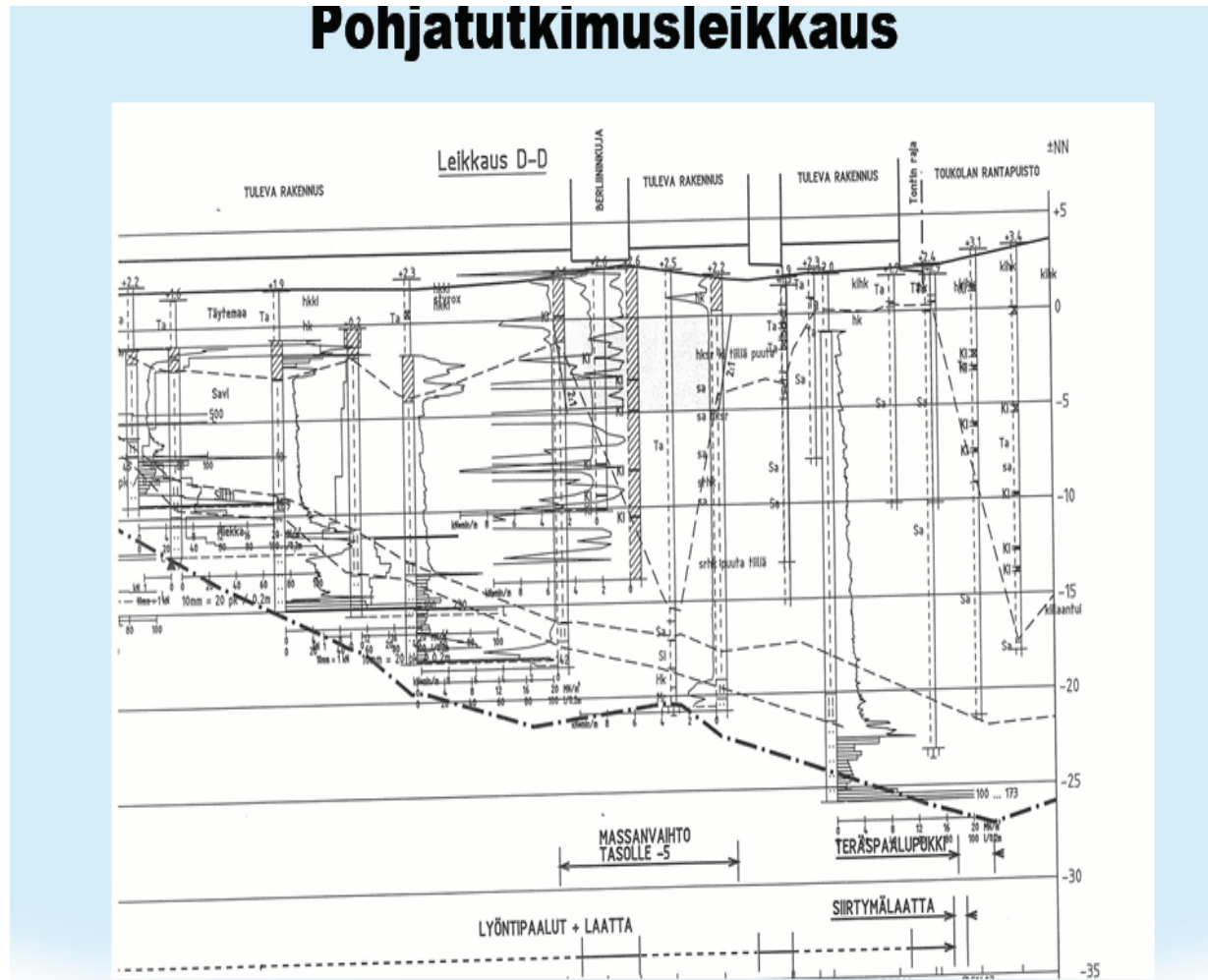
# Juha Vunneli, Vuonna 2008

**Kustannusvertailu Toukoranta 3,  
tb-lyöntipaalu keskimäärin 18 m, teräslyöntipaalu  
19 m, porapaalu 22 m, paaluilla sama kantavuus 810 kN**

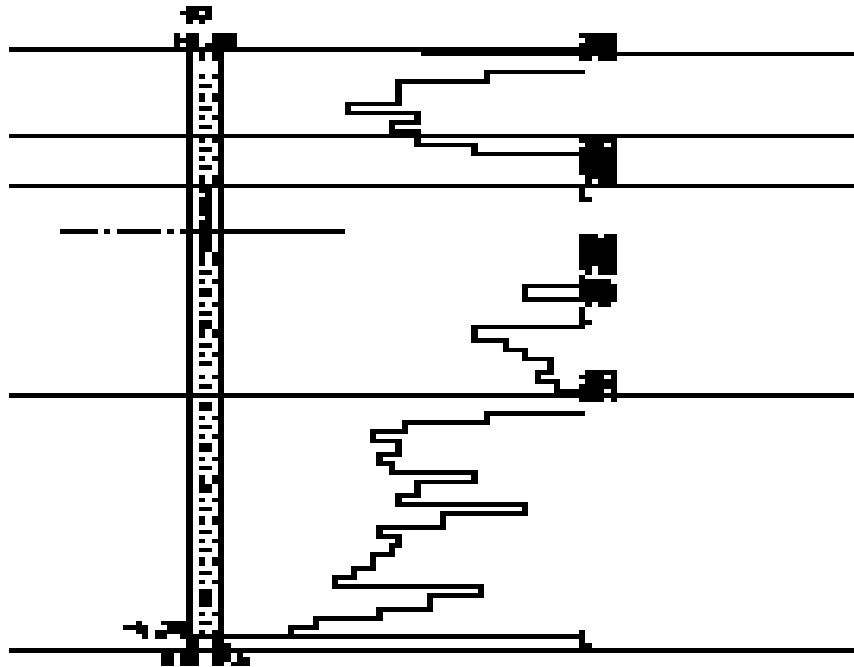
<b>PAALUTYYPPI</b>	<b>TYÖKUSTANNUS</b>	<b>KERROIN</b>
• TB 300 x 300 IB, ei esireikää	750 €/kpl	1
• TB-paalu 300 x 300, esireikä lp-koneella	800 €/kpl	1,07
• TB-paalu 300 x 300, esireikä raskas täry	1.050 €/kpl	1,4
• RR-lyöntipaalu 220 x 12,5, raudoitus+ betoni	2.650 €/kpl	3,5
• RD-porapaalu 220 x 12,5, raudoitus + betoni	5.500 €/kpl	7,3

# Toukorannan olosuhteita , KTK-penger

## Pohjatutkimusleikkaus

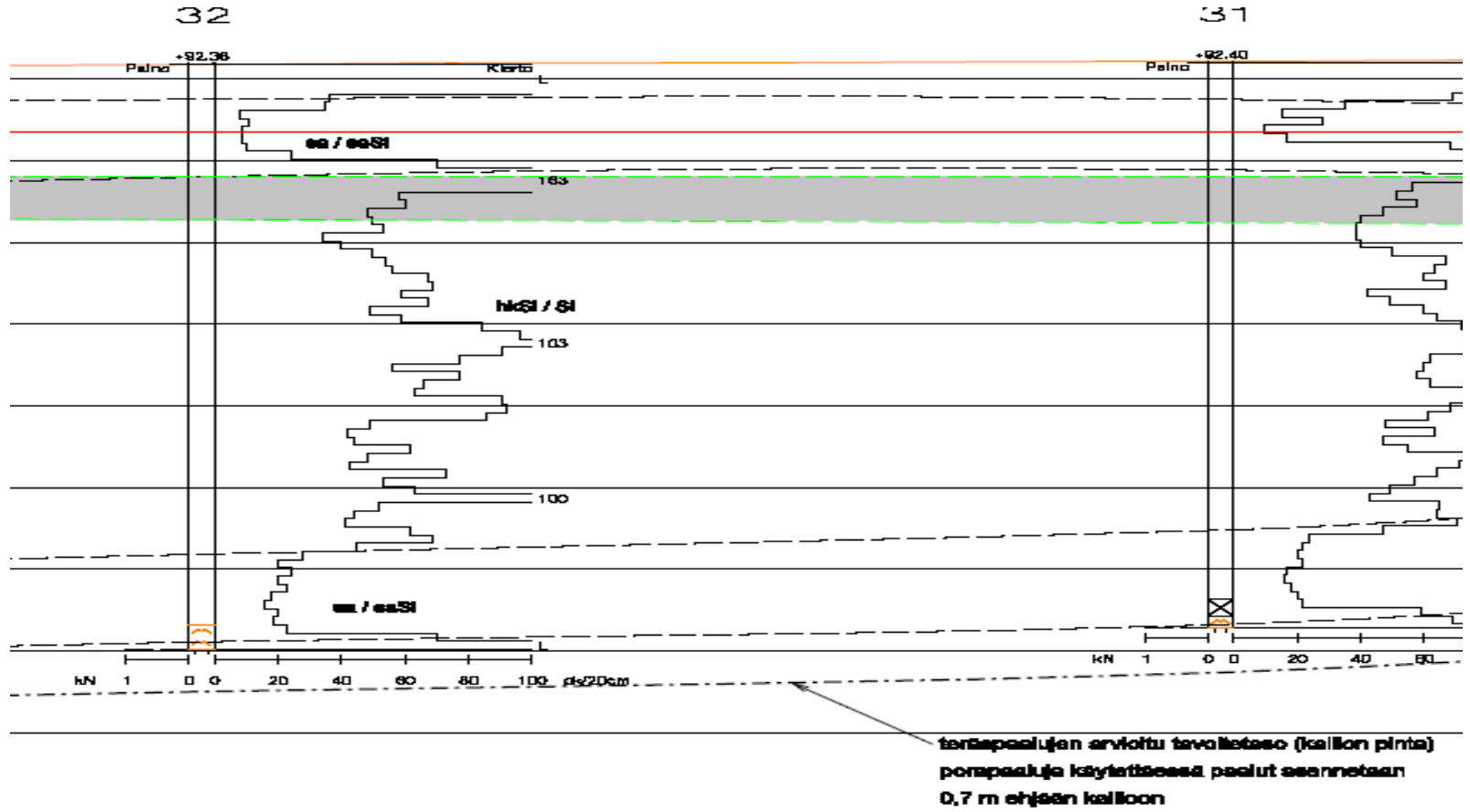


# Lämpöisyongelma?





# Lämpöisyongelma?



# pohdintaa

- Paalun lyönti on dynaaminen tapahtuma
- Dynaaminen ominaisuus paalulle on IMPEDANSSI=  $Z$
- Määritellään
- $Z = E \cdot A / c$
- Jossa  $E$  = kimmomoduuli,  $A$  poikkileikkausala,  $c$  = iskuaallon nopeus

# Pohdintaa...

- KIMMOMODUULIT:
- Betoni 40 GPa
- Teräs 210 GPa
  
- TERÄS lähes 6- kertainen
- Läpäisyyn siis käytettävä teräsprofiileita?

# Pohdintaa...

- Kaavassa on muitakin tekijöitä, jolloin

Paalutyyppe	Impedanssi Z	Vertailuarvo
RR140/10	165 kNs/m	1
RR170/10	251 kNs/m	1,5
TB 250	714 kNs/m	4
TB 300	1028 kNs/m	6

# Pohdintaa..

- Mikä RR paalun koko vastaisi dynaamisilta ominaisuuksiltaan TB 300 – paalua?
- RR 508 / 16mm
- Miksi valitaan pienempiä dimensioita?
- Kantavuus taulukot?



# pohdintaa...

- Teräsputkipaalutaulukoihin on sisäänrakennettu vastuunpakoilu- ehto?

Korroosiovara 2,0 mm											
Paalu	Alkutaipuma $\delta_g$	Suljettu leikkauslujuus, $c_{uk}$ [kPa]						$P_{ball}$ (PPO-2007) [kN]			
		5	7	10	15	20	30	III	II	IB	IA
RRs115/8	Lcr/400	285	347	427	488	523	565	357	433	541	627
	Lcr/600	322	390	458	514	550	592				
RRs140/10	Lcr/400	443	540	664	779	836	908	582	706	883	1024
	Lcr/600	502	607	727	820	880	953				
RRs170/10	Lcr/400	608	740	902	1005	1071	1151	713	864	1080	1253
	Lcr/600	687	830	949	1058	1126	1206				

# Ruotsalaisten esitystapa

Markens skjuvhållfasthet i kPa $C_{ud}$	PM 1A		PM 1B	PM 2	PM 3
	R=100	R=150	R=150	R=200	R=300
3,0	169	198	229	298	326
5,0	201	232	273	374	433
7,0	223	240	302	400	480
9,0	240	240	310	400	480
11,0	240	240	310	400	480
13,0	240	240	310	400	480
15,0	240	240	310	400	480



# Toukoranta, Hannu Kemppainen,DI työ

- Kokemuksia KTK – penkan täyttöjen läpäisystä
- Täytön paksuuden kasvaessa upotusaika kasvaa
- Täytön paksuuden kasvaessa sijaintipoikkeamat lisääntyvät: poikkeamia enemmän ja suurempia kuin tavallisessa kohteessa.

# Toukoranta, Hannu Kemppainen,DI työ

Lyöntipaalutustyö teräsbetonipaalulla onnistuu vaikeasti läpäisevän täytön kohdalla tyydyttävästi, jos

- – paalutustyö suunnitellaan ja toteutetaan huolellisesti ja pohjaolosuhteet huomioiden,
- – paalutuskalusto on kunnossa,
- – paalun lyönti suoritetaan aina siten, että paalu ja järkäle ovat yhdensuuntaiset (tässä on apumiehellä tärkeä rooli),

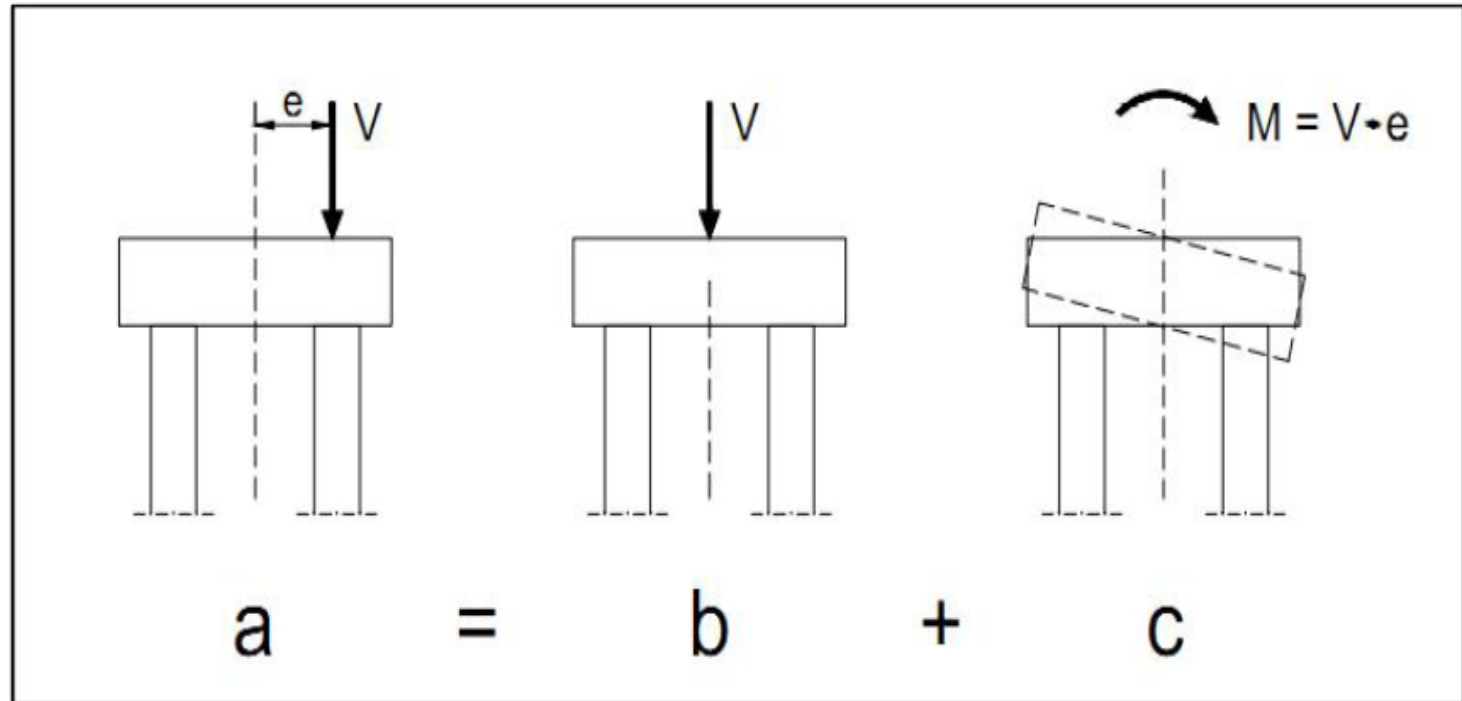
# Toukoranta, Hannu Kemppainen,DI työ

- – paaluun lisätään lisävarusteita, jotka parantavat sen kärjen läpäisyominaisuuksia,
- – läpäisyä helpotetaan etukäteen tehtävillä esirei'illä (esim. piikillä tai poraamalla) ja
- – varmistetaan paalujen kantavuus ja ehjyys jatkuvilla PDA – ja PIT -mittauksilla

# Hallintaa...

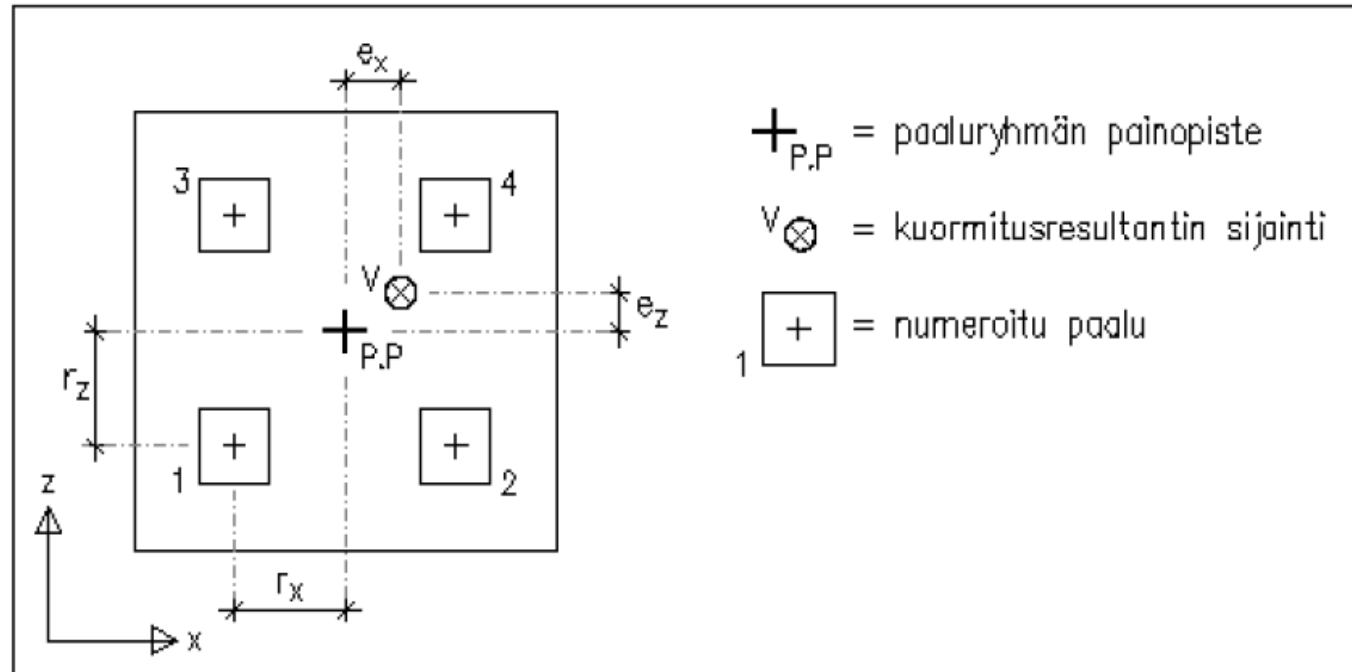
- Täytön läpäisyssä havaittuihin ongelmiin on myös etsitty ratkaisuja:
- Sijaintiongelmiin käsittely nopeasti:  
Esim. Heidi Silvennoisen kehittämä ohjelma, joka määrittelee pikaisesti lisäpaalun tarpeen.

# Hallintaa...



Kuva 4: Pystysuoran paaluryhmän epäkeskeinen kuormitus (Rantamäki & Tamminen, 1979.)

# Hallintaa...



Kuva 5: Pystysuoran paaluryhmän paalukuormien laskeminen

# Toukoranta, Hannu Kemppainen,DI työ

- Lämpäisyn vaikeus ja kipupisteet paalutustyön kannalta:
- WEAP –ANALYYSI = paalutuksen simulointi
- Näillä mm. havaittu että TB-paalun ongelma tilanne tulee, kun paalu on juuri läpäisemässä täyterrosta. Eli vetojännitykset rikkovat paalua.

# WEAP – analyysin tuloksia

## WEAP -ohjelma

WEAP (Wave Equation Analysis of Pile Driving) on järkäleen iskusta paalun aiheutuvaan iskuaaltoon perustuva paalutuksen analysointimenetelmä. Ensimmäinen WEAP -tietokoneohjelma valmistui vuonna 1976. Tässä tutkimuksessa käytetään vuoden 2003 versiota (GRLWEAP version 2003). WEAP -analyysin avulla käyttäjä voi laskea annetuista lähtötiedoista erilaisia haluttuja tietoja, joiden tuloksena voidaan määrittää mm.

- tarvittava siirtymä loppulyöntien aikana halutun kantavuuden saavuttamiseksi (loppulyöntiehto),
- paaluun syntyvät veto- ja puristusjännitykset lyöntityön aikana mahdollisen paaluvaurion arvioimiseksi sekä
- paalutustyön kannalta optimaalinen paalutuskalusto, -tapa ja paalutyyppejä.



# Vetojännitysten hallinta paalutuksessa

- Paalutustapahtumaa pitää pystyä seuraamaan reaaliajassa
  - Ilmi Oy:n paalutustietokone,
  - Kuljettaja pystyy seuraamaan lyöntivastuksen muutoksia ja reagoimaan.

# OSA 2: TÄRINÄ

- Yleinen käsitys on , että klassikko kaavalla selitetään tärinää, ja valvotaan mittareilla.
- Klassikko kaava ei ota huomioon paalutyyppejä, maan ominaisuuksia , etäisyys tärinälähteestä tulkittu väärin, perintönä louhinnasta.
- Tärinähallinta on siten ollut ”kokemusperäisesti havaittu”- menetelmään pohjautuva.
- ONKO MUUTA KEINOA?

# KLASSIKKO KAAVA

$$v_{\max} = k \frac{\sqrt{W}}{r} \quad (3.4)$$

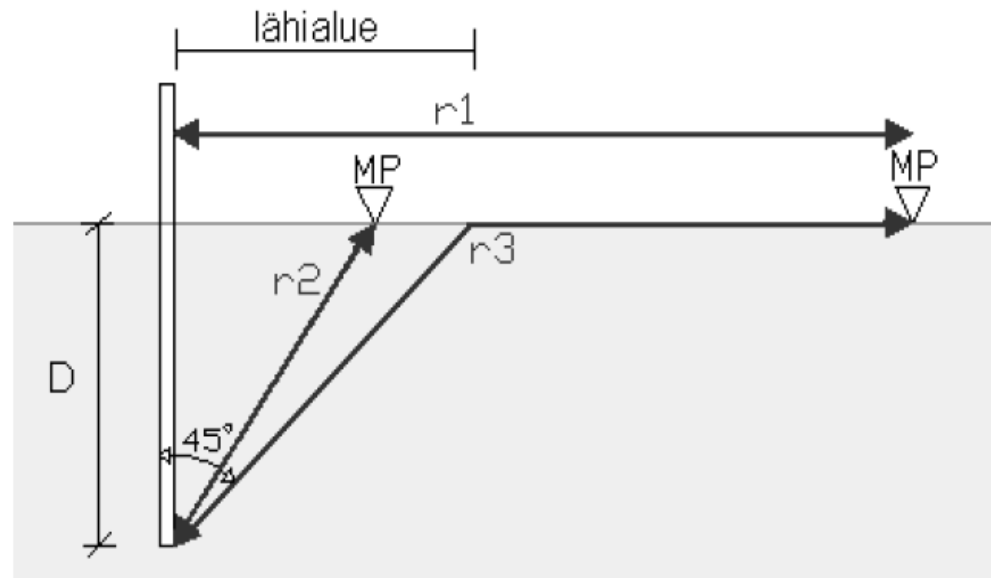
$v_{\max}$  = suurin pystysuora heilahdusnopeus (mm/s)

$k$  = kerroin ( $\text{m}^2/\text{sJ}^{0,5}$ )

$W$  = lyöntienergia/lyönti (Nm)

$r$  = etäisyys paalusta mittauspisteeseen (m)

# Tärinälähteen ja mittapisteen sijainnit



Kuva 5-43: Etäisyyden määrittäminen tärinälähteestä mittapisteeseen.  $r_1$ =vaakaetäisyys,  $r_2$ =etäisyys paalun kärjestä, kun mittapisteen etäisyys on alle paalun tunkeutumissyvyys,  $r_3$ =etäisyys paalun kärjestä, kun mittapisteen etäisyys on suurempi kuin paalun tunkeutumissyvyys.

# Myytin perusteita...

## Espoo, Kilo

- Espoon kohteessa suunnitteilla oli paalujen lyöminen lähimmillään 5m etäisyydelle olemassa olevasta rakennuksesta, jolle oli tärinän raja-arvoksi asetettu 5mm/s.

Maaperä alueella koostuu 1m paksuisesta sekalaisesta täyttökerroksesta joka oli paalutushetkellä jäässä 0,7...0,8m syvyydelle saakka. Tämän alla oli 1,5...2m paksuinen savikerros, ja edelleen 3...5,5m paksuinen silttiä, hiekkaa ja soraa sisältävä kerros, ennen tiivistä pohjakerrostumaa.

Tärinää mitattiin heilahdusnopeutena viereisen rakennuksen perustuksista. 300 x 300 mm<sup>2</sup> kokoisia teräsbetonisia paaluja lyötiin kolmen paalun ryhmissä 16...17m ja 11...12m etäisyydelle rakenteesta. Paalut asennettiin 40 kN hydraulisella lyöntijärkäleellä, pudotuskorkeus oli 0,25m. (Taipale 1990 s.42-44)

Suurimmat tärinäarvot mitattiin paalun läpäistessä jäätynyttä maakerrosta, ja toisaalta kun paalun kärki saavutti saven alapuolisen hiekka ja silttikerroksen. Tärinän pystykomponentti oli hallitseva. Kuvassa 4-1 on esitetty saadut tärinäarvot paalun tunkeutumissyvyyden suhteen kummallakin etäisyydellä yhdessä paalun lyöntivastuksen kanssa. (Taipale 1990 s.42-44)

# Myytin perusteita...

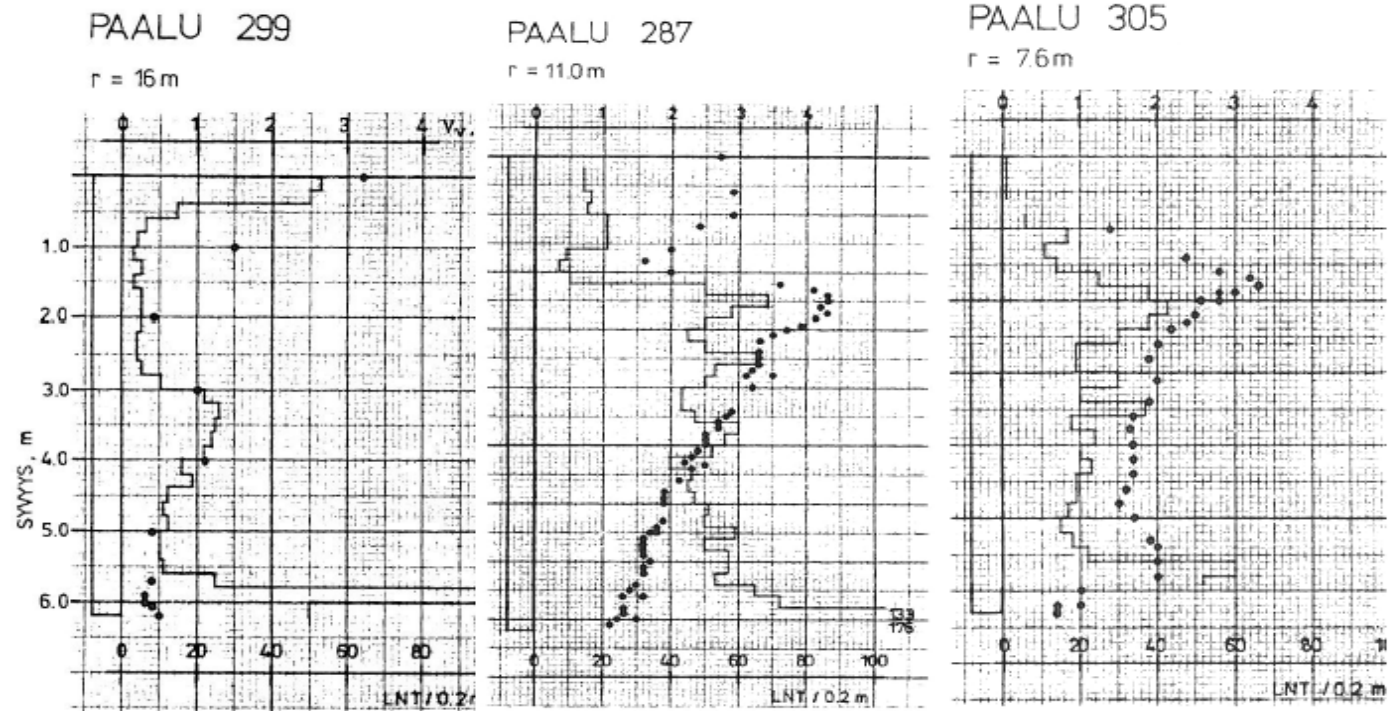
- Saatujen tärinäarvojen perusteella pääteltiin, että teräsbetonisten lyöntipaalujen asentaminen 5m etäisyydellä rakennuksesta johtaisi määritettyä 5mm/s raja-arvoa suurempaan tärinään.

Tämän vuoksi kokeiltiin asentaa halkaisijaltaan 170mm Gustavsberg-putkipaaluja 6,8...8,8m etäisyydelle rakennuksesta.

G-paalujen asennus tehtiin samalla kalustolla kuin TB-paalujen asennus käyttäen samaa pudotuskorkeutta 0,25m. G-paalujen asennuksenaikainen tärinä oli pienempää kuin TB-paaluilla, vaikka etäisyys mittapisteeseen oli pienempi. G-paalujen asennuksenaikainen tärinä on esitetty

kuvassa 4-1. (Taipale 1990 s.44-45)

# Myytin perusteita...



Kuva 4-1: Heilahdusnopeus ja lyöntivastus paalun syvyyden suhteen. Vasemmalla TB-paalu etäisyydellä 16m, keskellä TB-paalu etäisyydellä 11m, oikealla G-paalu etäisyydellä 7,6m. (Taipale 1990, liitteet 2,3, ja 4).

# Myytille vastaiskua...

## Helsinki, Ruoholahti

Helsingin kohteessa asennettiin neljää eri paalutyyppiä louheiselle täyttöalueelle. Paalut olivat teräsbetonipaalu 300 x 300mm<sup>2</sup>, RR teräspalkkipaalu  $\varnothing$  184,5 x 11,5 mm<sup>2</sup>, Frankipaalu ja Vibrex paalu.

Maaperä koostuu pinnan korkeintaan 7m paksusta tiivistämättömästä louhe ja hiekkatäytöstä, sen alapuolisesta noin 1,5m paksusta pehmeästä savi tai liejakerroksesta, ja noin 2,5m paksuisesta kallioon ulottuvasta pohjakerrostumasta. Maan pinnassa on pihan rakennekerrokset ja asfaltti.

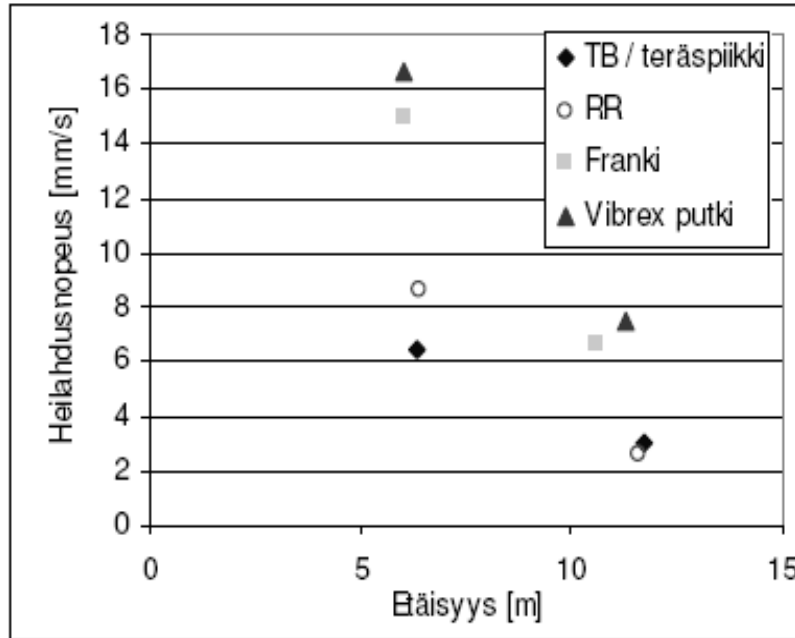
Tärinää mitattiin kaikkien paalujen osalta maan pinnasta kahdella etäisyydellä. (Taipale 1990, s.47-48)

TB-paalu asennettiin 40 kN vapaapudotusjärkäleellä, pudotuskorkeuden ollessa 0,25m. Paalua asennettaessa tehtiin esireikä pinnan rakennekerrosten ja louheisen täytön läpi teräspiikillä. Teräspiikin osalta pudotuskorkeus oli 1m. Suurimmat tärinät mitattiin teräspiikin kärjen ollessa noin 5 m syvyydellä. (Taipale 1990, s. 48)

Kalliokärjellä varustettu RR-paalu asennettiin 20 kN järkäleellä. Pudotuskorkeus oli 1m, ja loppulyöntien aikana 0,3m. Suurimmat tärinäarvot mitattiin paalun läpäistessä pinnan rakennekerroksia. (Taipale 1990, s. 48)



# Myytille vastaiskua...



*Kuva 4-2: Heilahdusnopeus etäisyyden suhteen eri paalutyypeille Helsingin kohteessa. (Taipale 1990, s.48, 49 ja liite 13 mukaisesti)*

# Tärinän syntyminen lyöntipaalutuksen yhteydessä

Lyöntipaalutuksessa paalutuslaitteesta paaluun siirtyvä iskun energia kulkeutuu paalun vartta pitkin paalun kärkeen, jossa se saa aikaan paalun tunkeutumisen.

Paalun tunkeutuminen tapahtuu, kun iskun aiheuttama alaspäin suuntautuva sykäys voittaa paalun hitausvoimat ja maaperän paalun tunkeutumista vastustavat voimat.

Iskun energia ei kuitenkaan kokonaisuudessaan edesauta paalun tunkeutumista, osa siitä hukkuu jo paalutuskoneen ja paalun rajapinnassa. Osa energiasta muuttuu ympäröivän maan tärinäksi. (Woods 1997, p.11, Massarsch 1992, p.16)

# Teoriaa..

Möller et al (2000, s.19) mukaan tärinänsä vaikuttavia tekijöitä ovat mm.

lyöntijärkäleen paino ja muoto, sekä iskun nopeus, lyöntitaajuus, ympäröivän maan ominaisuudet, paalun halkaisija, paalun suoruus ja lyönnin keskeisyys.

# Teoriaa...

Massarsch & Fellenius (2008, p.5) mukaan kaava 3.4 on alun perin kehitetty räjäytystärinän arvioimiseen, eikä sovellu kovin hyvin paalutustärinän arviointiin.

Kaava ei ota varsinaisesti huomioon esimerkiksi paalun ja maaperän ominaisuuksia, energian siirtymistä paaluun tai tärinälähteen sijainnin muuttumista paalutuksen edetessä, joskin näiden tekijöiden voidaan olettaa sisältyvän kertoimeen  $k$ .

Kaavaa 3.4 käytetään joka tapauksessa yleisesti tärinän suuruuden arviointiin.

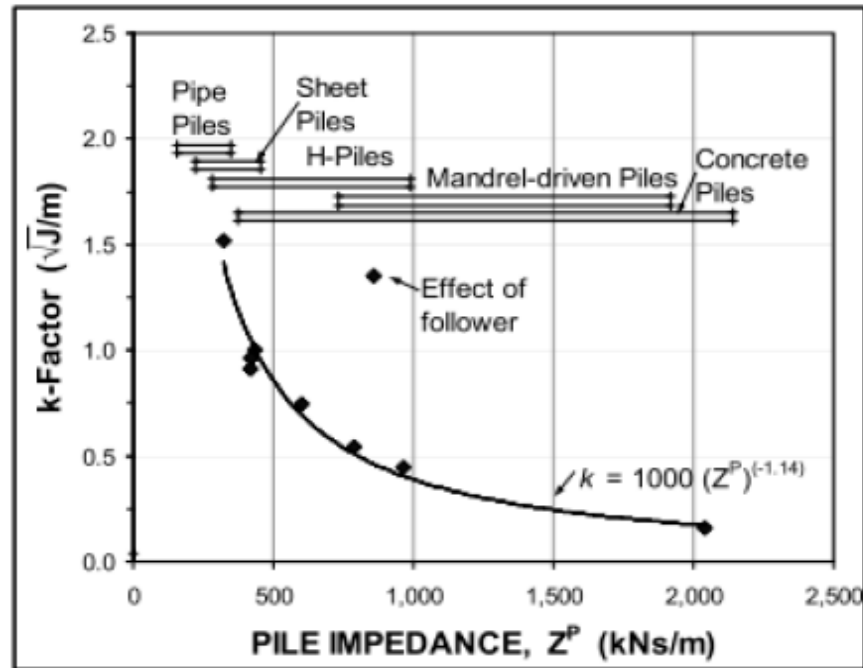
# Teoriaa...

Heckman & Hagerty (1978) tutkivat paalutuksen aiheuttamaa tärinää, ja vertasivat mittaustuloksia kaavaan 3.4.

He havaitsivat, että asennusenergian välittyminen paalun läpi riippuu paalun ominaisuuksista, ja että syntyvään tärinään voidaan vaikuttaa muuttamalla paalun dimensioita tai ominaisuuksia.

Kaavan 3.4 kannalta tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kerroin  $k$  on riippuvainen paalun impedanssista.

# Teoriaa...



Kuva 3-3: Paalun impedanssin vaikutus kaavassa 3.4 esiintyvään kertoimeen  $k$ . (Massarsch 2008, p.15, muokattu Heckman & Hagerty 1978, p.392 pohjalta)

# Teoriaa...

Myös muissa lähteissä on esitetty arvioita paalun impedanssin vaikutuksesta maaperän tärinään siten, että paalun suurempi impedanssi vähentää aiheutuvaa tärinää.

Esimerkiksi Woods (1997, p.12) esittää, että paalun impedanssilla olisi suurempi vaikutus syntyvään tärinään kuin maaperäolosuhteilla.

Dowding (1996, pp.239-240) arvioi puolestaan hieman maltillisemmin, että paalutuksen aiheuttama tärinä saattaa osittain riippua paalun impedanssista siten, että paalun suurempi impedanssi vähentää paalutuksen aiheuttamaa tärinää.

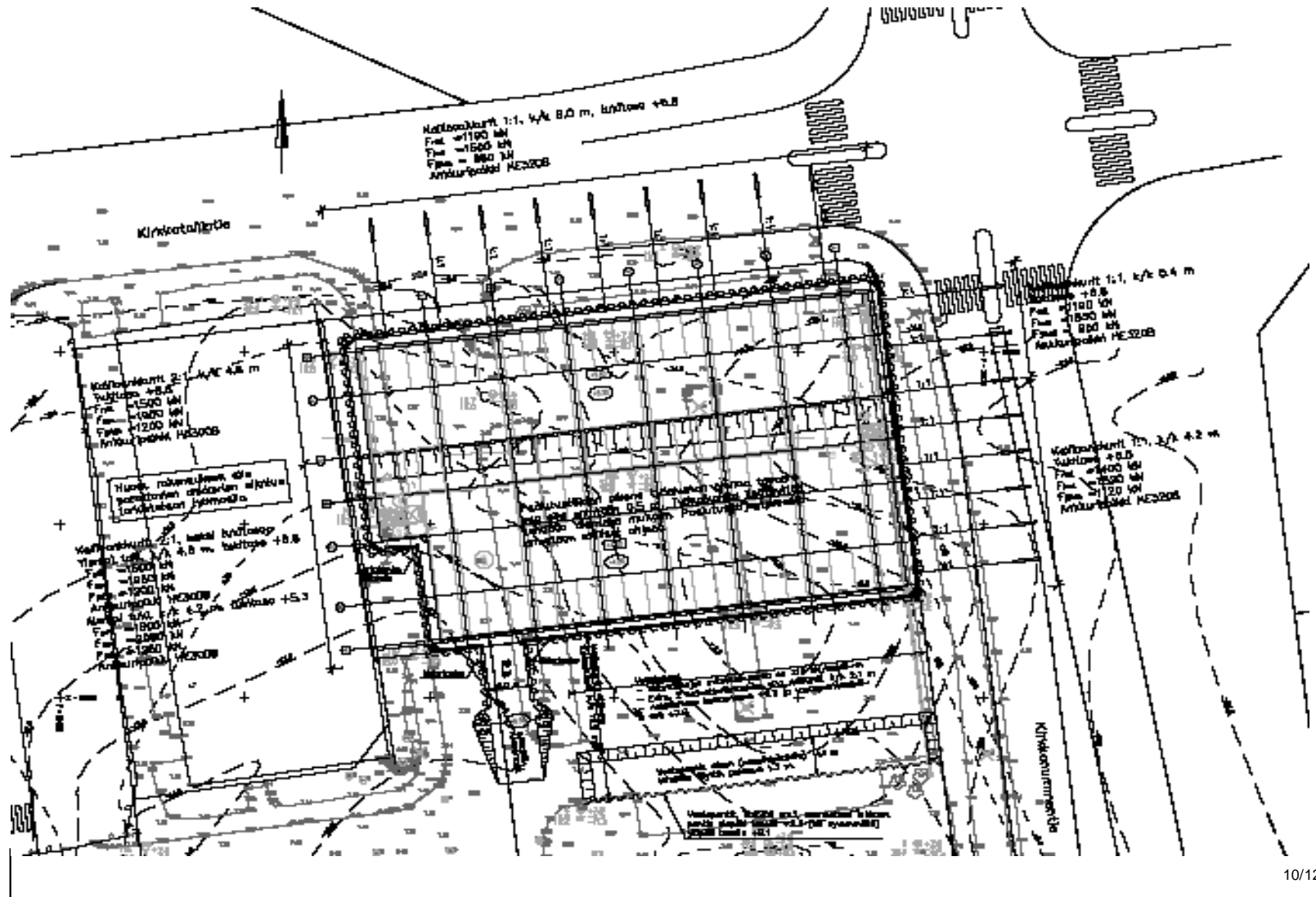
# Yhteenvetona iskuun / tärinään vaikuttaa

Iskun pudotuskorkeus, ja siitä seuraava iskun nopeus, sekä iskuvasaran pituudesta riippuva iskun kesto vaikuttavat paaluun syntyvään iskuaaltoon, kuten myös paalun impedanssi. Myös maan ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus.

Maan impedanssin, eli käytännössä maan jäykkyyden ollessa suuri, välittyy suurempi osa tärinästä ympäristöön, kuin löyhässä maassa.



# Case – Kirkkonummi



# Suunnittelun vaatimukset

## Sallitut heilahdusnopeuden arvot

- Rakennukselle suurin sallittu heilahdusnopeus, kun etäisyys on alle viisi metriä on 10 mm/s.
- Etäisyyden kasvaessa yli viiden metrin on suurin sallittu heilahdusnopeus 5 mm/s.

# Tarkkailun toteutus

- *Mittauspiste: Kirkkotallintie 2, Kirkkonummi.*
- Mittauspisteen ja lähimmän teräsbetonipaalun etäisyys toisistaan oli lähimmillään noin 3 metriä.
- Mittarin anturi oli pultattu työmaan puoleisella sivustalla sijaitsevaan kantavaan rakenteeseen.

# Tärinämittauksen tulokset

- Paalutustyön aikana kiinteistöstä mitatut tärinäarvot olivat suurimmillaan 1,65 mm/s.
- Taajuudet vaihtelivat 15 – 21 Hz:n välillä.

# RR170 vaihto TB 300

- Weap-analyysillä selvitetiin
- PDA:lla varmistettiin
- Tärinämittauksilla todennettiin

# Haaste

- Junttan on kehittänyt paalutuskalustoa

# Haaste

- Suunnittelijat , yliopistot ovat kehittäneet mitoitusta
- Eurokoodit

# Haaste

- Junttan oy ja Ilmi oy on kehittänyt paalutustietokonetta



# HAASTE

- Lyöntipaalutuksesta 80% on TB-paalua
- Miten Paalujaos haluaa kehittää rooliaan TB-lyöntipaalutuksen kehityksen Veturina?