

Opinnäytetyö AMK

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri AMK

2021

Petteri Nyroos

LYÖNTIPAALUTUS PERUSTUSVAHVISTETUN RAKENNUKSEN VIERESSÄ

Case: Turun kauppatori

OPINNÄYTETYÖ AMK | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka insinööri, AMK

2021 | 43 sivua, 1 liitesivu

Petteri Nyroos

LYÖNTIPAALUTUS PERUSTUSVAHVISTETUN RAKENNUKSEN VIERESSÄ

Case: Turun Kauppatori

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia lyöntipaalutuksen onnistumista asuinrakennuksen lähellä, jossa on suoritettu perustusten vahvistus puristuspaaluilla. Työssä käsitellään vanhan rakennuksen tärinänkestävyyttä sekä paalutustyön aiheuttamaa tärinää savimaassa.

Työn teoriaosuudessa on käyty läpi tärinän tyypillisiä arvoja sekä taajuutta. Tärinää vertailtiin Suomessa sekä Kaliforniassa tehtyjen tutkimusten tuloksien perusteella. Työssä suuntaa antavia tärinäarvoja suuruuksia tutkittiin laskemalla teoriaosuudessa käytettyjä kaavoja. Tärinän todellisia arvoja saatiin asennetuista tärinämittareista. Työssä on tarkasteltu myös painumamittauksia, joita suoritettiin tarkkavaaituksella.

Paalutuslaitteita sekä paaluja on monia ja tässä opinnäytetyössä keskitytään ainoastaan hydraulivasaralla toteutettavaan pienteräspuutkipaalutukseen. Työssä on hyödynnetty RIL oppaita sekä kohteessa tehtyjä geoteknisiä tutkimuksia ja kirjallisuutta.

Työn tuloksena syntyi kokonaisuus, jota voidaan käyttää vastaavassa kohteessa lähtötietona sekä suuntaa antavana mallina.

Työ on suunnattu suunnittelijoille sekä toteuttavalle työmaahenkilöstölle avustamaan paalutuksen toteutuksessa.

ASIASANAT:

tärinä, perustustenvahvistus, lyöntipaalutus, geotekniikka, maanrakennus

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil and construction engineering

2021 | number of pages: 43, number of pages in appendices: 1

Petteri Nyroos

INSTALLATION OF NEW DRIVEN PILES NEXT TO UNDERPINNED BUILDING

Case: The market square of Turku

The purpose of this thesis was to study the success of impact piling near a residential building where the foundations have been reinforced with compression piles. The work deals with the vibration resistance of an old building and the vibration caused by piling work in clay soils.

In the theoretical part of the work, the typical values of vibration and frequency are reviewed. Vibration was compared based on the results of studies conducted in Finland and California. In the work, the magnitudes of the vibration values were studied by calculating the formulas used in the theoretical part. Actual vibration values were obtained from the installed vibration meters. Settlement measurements performed by precision leveling were also considered in the work.

There are many piling devices and piles, and this thesis focuses only on piling small steel piles with a hydraulic hammer. RIL guides as well as geotechnical studies and literature carried out at the site are utilized in the work.

As a result of the work, an entity was created that can be used in the corresponding object as a starting point and as a guiding model. The work is aimed for the structural engineers and the construction site personnel to assist in the implementation of the piling.

KEYWORDS:

vibration, foundation reinforcement, percussion piling, geotechnics, civil engineering

SISÄLTÖ

SANASTO	7
1 JOHDANTO	9
2 LYÖNTIPAALUTUS	11
2.1 Lyöntipaalutuskalusto	12
2.2 Lyöntilaitteet	12
2.2.1 Pudotus- ja hydraulijärkäleet	12
2.2.2 Dieseljärkäleet	12
2.2.3 Paineilmavasara	13
2.2.4 Hydraulivasarat	13
3 PERUSTUSTEN VAHVISTUKSET	14
3.1 Menetelmät	15
3.2 Puristuspaalu	15
3.3 Porapaalu	16
4 TÄRINÄ	18
4.1 Tärinä lyöntipaalutuksessa	22
4.2 Tärinämittarit	24
5 CASE TURUN KAUPPATORI	25
5.1 Maaperäolosuhteet	25
5.2 Perustusten vahvistus Kauppiaskadulla	27
5.3 Kauppiaskatu 9a:n perustustenvahvistus	28
5.4 Paalutustyö	30
5.5 Paalutuskalusto	32
5.6 Tärinä- ja painumamittaus	34
6 MITTAUSTULOSTEN JA LASKELMIEN VERTAILU	37
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	41
LÄHTEET	43

KAAVAT

Kaava 1. Tärinälähteestä syntyvän heilahdusnopeuden raja-arvon laskentakaava huomioiden viereisen rakennuksen kestävyys.	19
Kaava 2. Maapohjan vakioarvot.	22
Kaava 3. Maksimiheilahdusnopeuden laskentakaava.	22
Kaava 4. Kaliforniassa tehtyjen tutkimusten tärinän maksimiarvon laskentakaava.	23
Kaava 5. Maksimitärinä savimaalla.	39
Kaava 6. Maksimitärinä tiiviissä maakerroksessa.	39
Kaava 7. Huonokuntoisen rakennuksen maksimitärinänsieto.	39
Kaava 8. Hyväkuntoisen rakennuksen maksimitärinänsieto.	40
Kaava 9. Aiheutetun tärinän maksimiarvo Kalifornialaisessa lähteessä määritetyllä laskukaavalla.	40
Kaava 10. Kaliforniassa tutkitun kaavan mukaan tärinän sieto on vanhan- ja uuden rakennuksen sietokyvyn välissä.	40

KUVAT

Kuva 1. Torialueen kiinteistörajat.	10
Kuva 2. Kauppiaskatu 9a. Kiinteistön yleiskuva.	10
Kuva 3. Maaperätutkimuskartta.	25
Kuva 4. Puristin-heijarikairaus Hp18.	26
Kuva 5. Puristin-heijarikairaus Hp11.	26
Kuva 6. Kauppiaskatu 9a:n pohjatutkimustulokset- saven alapinnan käyrästönä.	27
Kuva 7. PP4:n sijainti vanhassa rakennuksessa.	28
Kuva 8. PP4:n sijainti paalutuspiirustuksessa ympyröitynä keltaisella. Mustalla ympyröidyt paalut ovat vanhoja puristuspaaluja ja lilan viivan alapuolella olevat paalut uusia lyöntipaaluja.	29
Kuva 9. Puristuspaalujen tarkastuspöytäkirja.	29
Kuva 10. Paalutusalue.	30
Kuva 11. Paalutuspöytäkirja. Keltaisella merkitty paalutusalueen paalut.	31
Kuva 12. Paalutuskalusto.	32
Kuva 13. Hydraulivasaran tekniset ominaisuudet.	32
Kuva 14. Hydraulivasaran loppulyöntipainumat käytettäessä RR170/12,5 paaluja.	33
Kuva 15. SPD2000 Hydraulivasara.	34
Kuva 16. Tärinämittarien asetukset hälytysten osalta.	35
Kuva 17. Tarkkavaaituksen mittapiste 2.	35
Kuva 18. Tarkkavaaituksen mittapisteen ilmakuvassa.	36
Kuva 19. Tarkkavaaituksen tulokset.	37

Kuva 20. Tärinäarvot paalutuksen aikana.	38
Kuva 21. Tärinäarvot paalutuksen jälkeisellä viikolla.....	38
Kuva 22. Tärinäarvot kaksi viikkoa paalutuksen jälkeen.....	39

TAULUKOT

Taulukko 1. Paalutustyöluokan valinta.	11
Taulukko 2. Tärinän vaativuusluokan valinta.....	19
Taulukko 3. Rakennustapakertoimen valinta.....	21
Taulukko 4. Heilahdusnopeuden arvon valinta työmenetelmittäin maa- ja kalliopohjille perustetuille rakennuksille.....	21
Taulukko 5. Paalutustyöluokka.	33

LIITTEET

Liite 1. Kaliforniassa toteutetun tutkimuksen toteamat tärinänsietoarvot rakenteille.	1
--	---

SANASTO

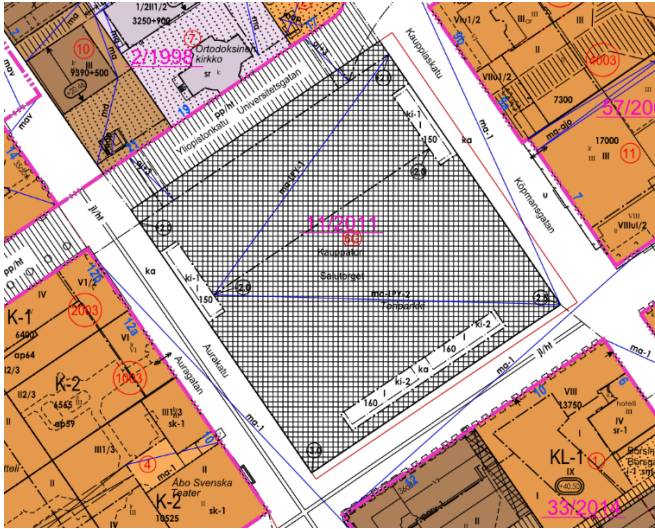
geofonianturi	tärinän mittausanturi, joka mittaa heilahdusnopeutta (RIL 253-2010)
GL1-3	geotekninen luokka 1–3 (RIL 253-2010)
injektointi	nestemäisen kovettuvan seoksen tunkeminen maan tai rakenteen sisään, esim. juotoslaasti (RIL 254-2016)
koheesiopaalu	paalu, joka siirtää kuormat paalun vaippapinnan ja viereisen maan adheesion välityksellä (RIL 254-2016)
maata syrjäyttävä paalu	paalu, joka asennetaan kaivamatta tai poistamatta maata (RIL 254-2016)
mega-paalu	keskeltä ontto lyhyistä betonielementeistä valmistettu puristuspaalu (Lehtonen 2006)
perustus	kantava rakenne, joka välittää kuormat ylärakenteiden kuormat maahan (RIL 253-2010)
pohjarakennustyö	rakennuksen ja rakenteiden perustusten ja maapinnan alapuolisten tilojen rakentamiseen tarvittavat työt (RIL 253-2010)
tärinä	rakentamisen aiheuttama maan värähtely (RIL 253-2010)
jälki-injektoitu paalu	paalu, jonka varsi ja/tai pohja injektoidaan asentamisen jälkeen (RIL 254-2016)
kalliokärki	rakenne, jonka tarkoituksena on tunkeutua kallioon luotettavasti ja estää paalun kärjen liukuminen sivusuunnassa. (RIL 254-2016)
maakärki	rakenne, joka vahvistaa tai muodostaa paalun kärjen (RIL 254-2016)
iskusarja	paalua lyödään yhtäjaksoisilla useilla peräkkäisillä iskuilla, joista muodostuu iskusarja. Iskusarja käsittää tyypillisesti 10 lyöntiä tai ajanjakson 30 s tai 60 s (RIL 254-2016)
liikkuva osa	lyöntilaitteen osa, jonka liike-energiaa käytetään paalun upottamiseen (RIL 254-2016)
loppulyönnit	paalun lyönnin viimeiset iskusarjat, joiden painumatulosten perusteella asennustyö lopetetaan. (RIL 254-2016)
loppupuristus	todetaan puristuspaalun saavuttaneen suunnitelmissa määrättyt kriteerit mittaamalla puristus. (Lehtonen 2006)

pienpaalu	teräspaalu, jonka halkaisija asennustavasta riippuen on vähintään 30 mm tai 60 mm mutta enintään 300 mm (RIL 254-2016)
piezosähköinen anturi	tärinän mittalaite, jonka toimintaperiaate perustuu kiihtyvyyteen. (RIL 253-2010)
tukipaalu	paalu, joka siirtää kuormia maahan kärkeen kohdistuvan puristuksen välityksellä. (RIL 254-2016)
vaarnoitus	luodaan paalua suurempi reikä, joka täytetään injektoimalla tehostamaan paalun laastin ja maan välistä tartuntaa. (Lehtonen 2006)

1 JOHDANTO

Rakentaminen aiheuttaa usein tärinää. Tärinä voi olla haitallista, jos rakentaminen tapahtuu olemassa olevan rakennuksen läheisyydessä ja vanhan rakennuksen perustukset ovat huonossa kunnossa. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia lyöntipaalutuksen vaikutuksia perustusvahvistetun rakennuksen välittömässä läheisyydessä. osoittaen työn tuloksia sekä onnistumiseen johtaneita päätelmiä ja selventää paalutuksen vaikutuksia läheiselle rakennukselle. Lähteinä työssä käytetään kirjallisuutta, haastatteluja sekä ohjeita. Työssä lasketaan teoreettisia tärinäarvoja Suomessa sekä kansainvälisesti käytetyillä laskentakaavoilla ja verrataan näitä toteutuneihin arvoihin. Työn tavoitteena on, että opinnäytetyön päätelmiä voidaan hyödyntää tulevissa vastaavissa kohteissa.

Opinnäytetyössä tarkastellaan teräspalkkipaalutusta Turun Metro Koy:n näkökulmasta. Työmaa sijaitsee Turun kauppatorilla (kuva1) vanhan Kauppiaskadun osuudella. Kauppiaskatu 9a (kuva 2) on aikanaan perustettu puupaalujen varaan ja myöhemmin perustusvahvistettu puupaalujen ja kantavuuden heikentymisen vuoksi. Turun Metro KOy työmaa perustettiin tammikuussa 2021. Opinnäytetyön toimeksiantajana on Skanska Infra Oy, joka on vastuussa työmaan maanrakennustöistä. Työmaan toteuttajana toimii Skanska talonrakennus Oy. Haasteena uuden työalueen paalutukselle on Kauppiaskatu 9a: n perustustenvahvistustapa, joka on toteutettu jälki-injektoiduilla puristuspaalulla, jotka ovat herkkiä tärinälle.



Kuva 1. Torialueen kiinteistörajat.



Kuva 2. Kauppiaankatu 9a. Kiinteistön yleiskuva.

Turun kauppatoria on käytetty kauppapaikkana historiallisen pitkään, jo 1600-luvulta asti. Maanalaista pysäköintiä torille on kaavailtu jo 1990-luvulta lähtien. Kauppatorin Toriparkki-hanke on osa Turun kaupungin 2016 aloittamaa neljän hankkeen kärkihanketta. Rakennuslupa torialueelle myönnettiin 2017. Hanke käynnistyi toukokuussa 2018 torirakennusten purkamisella ja arkeologisilla kaivauksilla. (Turun Kaupunki 2021).

2 LYÖNTIPAALUTUS

Lyöntipaalutus on suosittu paalutusmenetelmä uudisrakentamisessa kustannusten sekä asennusnopeuden vuoksi. Lyöntipaalutus luokitellaan maata syrjäyttäväksi paaluksi. Muita maata syrjäyttäviä paalutusmenetelmiä on täryttäminen, puristaminen, ruuvaaminen ja näiden menetelmien yhdistelmät. (RIL 254-2016.)

Lyöntipaalu on esivalmistettu ja määrämittainen paalu, joka on valmistettu joko puusta, betonista ja teräksestä. Lyöntipaalutuksessa paalu nostetaan pystyyn ja asennetaan maahan iskemällä, täryttämällä tai painamalla paalun yläpäähän. Teräsputki-paalun alapää varustetaan tyypillisesti joko maa- tai kalliokärjellä. Paalun kärki syrjäyttää maahan upotessaan maa-ainesta. (RIL 254-2016.)

Paalutustyötä suunnitellessa paaluun kohdistuvat kuormitus- ja rasiustilat sekä paalutuksen olosuhteet määrittelevät paalun rakenteelliset ominaisuudet paalutustyöluokkien mukaan, PTL1–PTL3. Paalutustyöluokka 1 (PTL1) on vaatimustasoltaan kevyin ja paalutustyöluokka 3 (PTL3) on haastavin. Paalutustyöluokan (taulukko 1) valinnassa tulee ottaa huomioon myös työkohteen seuraamusluokka ja geotekninen luokka. (RIL 254-2016). Geotekninen luokka 1 (GL1) tarkoittaa pohjaolosuhteiltaan tavanomaista kohdetta ja geotekninen luokka 3 (GL3) erittäin vaativaa pohjaolosuhdetta. (RIL 254-2016)

Taulukko 1. Paalutustyöluokan valinta.

Geotekninen luokka, ks. kohta 2.3	Seuraamusluokka, ks. SFS-EN 1990		
	CC1	CC2	CC3
GL1*	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL2...(PTL3)
GL2	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL3
GL3	PTL2...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL3

2.1 Lyöntipaalutuskalusto

Lyöntipaalutuksessa voidaan käyttää tela-alusteista kaivinkonetta tai traktoria. Paalutuskalustoon kiinnitetään puomi, joka valikoituu koneessa käytettävän lyöntilaitteen sekä käyttökohteen vaatimuksien mukaan. Puomin akselien lukumäärä vaikuttaa iskutehon sekä koneen käyttöön. Useammalla akselilla olevalla puomilla paalun käsittely helpottuu.

2.2 Lyöntilaitteet

2.2.1 Pudotus- ja hydraulijärkäleet

Pudotus- ja hydraulijärkäleet soveltuvat parhaiten teräsbetonipaaluille.

Pudotusjärkäleet ovat tyypillisesti vaijeriripusteisia. Niiden järkäle nostetaan vinssillä haluttuun pudotuskorkeuteen. Kun vaijeri vapautetaan, putoavat sekä vaijeri että järkäle iskutyynyyn tai kappaleeseen. Pudotusjärkäle voi myös olla vapaasti putoava, jossa järkäle vapautetaan laukaisulaitteella. (RIL 254-2016)

Hydraulijärkäleet ovat yksi- tai kaksitoimisia. Yksitoimisessa hydraulijärkäleessä liikkuva osa nostetaan ylös hydraulisella sylinterillä, jonka jälkeen sylinteri päästetään tyhjenemään, jolloin liikkuva osa tippuu. Kaksitoimisessa hydraulijärkäleessä liikkuvaa osaa kiihdytetään putoamisen aikana hydraulisesti. (RIL 254-2016)

2.2.2 Dieseljärkäleet

Dieseljärkäleet soveltuvat teräsputki- ja teräspalkkipaaluille ja ovat yläpäätä avoimia (OED open end dieselhammer) tai suljettuja (CED closed end dieselhammer). Dieseljärkäleitä käytetään suurläpimittaisten paalujen asentamiseen. Dieseljärkäleet aiheuttavat järkäletyypeistä eniten melua sekä saasteita. (RIL 254-2016)

2.2.3 Paineilmavasara

Kaksitoimista paineilmavasaraa käytetään pienpaalujen asentamiseen. Paineilmavasaran iskumäntä nostetaan alasylinteriin johdetun paineilman avulla ylös. Iskumännän saavutettua lakikorkeus, alasylinteri tyhjenee samalla kuin yläsylinteri täyttyy ja kiihdyttää iskumäntää sen pudotessa. Paineilmavasara soveltuu teräsputkipaalutukseen (RIL 254-2016)

2.2.4 Hydraulivasarat

Hydraulivasarat ovat kiven rikkomiseen suunniteltuja laitteita, joita käytetään myös pienpaalujen asentamiseen. Hydraulivasaran iskumäntä nostetaan hydraulisesti ja kaasupaine kiihdyttää iskumäntää männän liikkeessä alaspäin. Männän terä on tyypillisesti 1,3–2,0-kertainen männän massaansa verrattuna. Lyöntilaitteen iskuvoimaa pystytään säätämään käyttöpainetta muuttamalla. Iskulukuun voidaan myös vaikuttaa lisäämällä tai vähentämällä hydraulivirtausta. Isku keskitetään paaluun teräsisellä sovittimella, joka asennetaan terän ja paalun pään väliin. Hydraulivasaroita käytetään teräsputkipaalutuksessa. (RIL 254-2016)

3 PERUSTUSTEN VAHVISTUKSET

Puupaaluja on käytetty Suomessa rakennusten perustamiseen pehmeäpohjaisilla sijainneilla 1960-luvulle asti. Puupaaluja ei yleensä lyöty kantavaan kerrokseen, jonka seurauksena puupaalujen kantokyky perustui maan ja paalun välille syntyvään adheesioon eli tartuntavoimaan. Alkuperäisiä puupaaluja on tyypillisesti jatkettu kantavan kerroksen saavuttamiseksi. Betonianturoiden yleistyessä paalujen päät jätettiin betonivaluun, jolloin betoni suojasi puuta. Saven tai betonin suojaava vaikutus jatkui yleensä niin kauan kuin orsiveden pinta perustusten ympärillä säilyi perustusten puurakenteiden yläpuolella. (Jääskeläinen 2006, 11.)

Perustusten vahvistuksia on tehty Suomessa erityisesti 1900-luvun loppupuolelta alkaen johtuen puupaalujen turmeltuneisuuden johdosta sekä kantavuuden heikkenemisen ja kuormatarpeen lisääntyttä. Perustustenvahvistuksia on tehty tyypillisesti syventämällä perustustasoa, kunnes antura tukeutuu ehjään puupaaluun. Nykyisin perustustenvahvistukset toteutetaan muilla menetelmillä johtuen puupaalujen epävarmuudesta lahoamisen suhteen. Paalu voi lahota myös saastuneen pohjaveden takia. (Lehtonen 2007, 11.)

Suomessa perustusten uudelleenpaalutuksessa ensimmäisinä paaluina on käytetty puristuspaaluihin kuuluvia megapaaluja, joista kuitenkin luovuttiin, kun tutkimukset osoittivat kantavuuden heikkenemistä asennusvaiheen jälkeen. (Lehtonen 2007,12.)

Vaativissa (GL2) ja erittäin vaativissa (GL3) perustustenvahvistuskohteissa on tehtävä yksityiskohtainen kuntotutkimus, jolla selvitetään perustusten vahvistamisen tarve, syy ja rakenteiden kestävyys sekä toiminta. Syynä perustustenvahvistuksen tarpeelle voi olla mm. liiallinen painuminen. Kuntotutkimuksessa selvitetään myös maanvastaisten rakenteiden ominaisuudet sekä toiminta sekä ympäristön tärinätaaso. (RIL 253-2010.)

3.1 Menetelmät

Menetelmiä perustusten vahvistamiselle on lukuisia. Käytetty menetelmä valikoidaan aina käyttökohteen sekä olosuhteiden mukaan. Perustuksia voidaan vahvistaa maanvaraisten sekä paaluilla perustettujen rakennusten osalta. Tässä työssä keskitytään vain yleisimpiin paalutusmenetelmiin ja niiden asennustapoihin.

3.2 Puristuspaalu

Puristuspaalujen asennus tapahtuu hydraulisilla tunkeilla käyttäen vahvistettavaa rakennusta vastapainona. Paalun asennustavasta johtuen asennuskaluston ja -tavan oltava sellaisia, että paalutus voidaan toteuttaa turvallisesti aiheuttamatta vahinkoa rakenteille kuitenkin niin että puristusvoima suuntautuu keskeisesti paaluun. Asennukseen käytettävä mittalaitteella on pystyttävä mittaamaan luotettavasti. (Lehtonen 2007, 44.)

Puristuspaalu puristetaan tukipaaluksi tiiviiseen maakerrokseen asti. Suomessa puristuspaalut ovat tyypillisesti RR-paaluja, jotka on kehitetty lyötävistä pituus-saumahitsatuista teräsputki RR-paaluista ottamalla huomioon holkkijatkoksen. Puristuspaalut koekuormitetaan asennustavasta johtuen vähintään 1,5-kertaisen käyttötilan kuormitukseen asti jatkosten rakenteellisen kestävyuden varmistamiseksi. Tyypillisten puristuspaalujen koot ovat RR115/8...RR140/10, Näillä paalukoilla kantavuusalue käyttörajatilassa on 350...500kN. Mikäli puristuspaalu jälki-injektoidaan, voidaan asentaa paalun alapäähän suljettu kärkielementti, jossa on reiät injektointia varten. Injektointi tehdään tyypillisesti kärjen sekä vaipan alaosan geoteknisen kestävyuden parantamiseksi. (Lehtonen 2007, 45.)

Jälki-injektoitavassa puristuspaalussa kärkiosalla on useampi tarkoitus: Kärkita-pin tehtävä on ohjata paalua ja keskittää kuorma, kun kaulusosan tarkoitus on suojata tulpattuja injektointireikiä ja muodostaa maahan paalua suurempi reikä johon injektointiaine tarttuu. Vaarnoituksella tehostetaan tartuntaa. Puristuspaaluille suoritetaan loppupuristukset, kun paalun pituus on lähellä tavoitetasoa,

jolloin varmistetaan geotekninen kestävyys. Jälki-injektoitu paalu injektoidaan loppupuristusten jälkeen. (Lehtonen 2007, 45.)

Puristuspaalujen asentaminen on lähtökohtaisesti hidasta mutta varteenotettava vaihtoehto mikäli muiden paalutyyppeiden asennuskalusto ei mahdu tiloihin ilman erikoisjärjestelyitä tai paalutussijainti on lähellä rakennetta, jota voidaan käyttää vastapainona. (Lehtonen 2007, 45.)

3.3 Porapaalu

Porapaalut ulotetaan perustusten vahvistuskohteissa lähes aina tukipaaluina kalliioon. Porapaalut Suomessa asennetaan iskevillä porausmenetelmillä käyttäen samanaikaisesti syöttövoimaa, pyöritystä, iskuja ja huuhtelua. Porapaalut ovat tyypillisesti paksuseinäisiä teräsputkipaaluja, joissa teräsputkea käytetään porausputkena ja valmiissa paalussa kantavana rakenteena. Porapaalu täytetään betonilla tai juotoslaastilla. (Lehtonen 2007, 41.)

Porapaalu (RD) koostuu pituussaumahitsatusta teräsputkesta, jatkoksesta, mahdollisesta pysyvästä kruunusta sekä paaluhatusta. Yleisimmät paalukoot perustusten vahvistuskohteissa ovat RD90...RD170/10, jolloin kantavuusalue käyttörajatilassa saavuttaa 300...1300kN. Porapaaluja jatketaan joko hitsaamalla tai holkillisella kartiokierrejatkoksella kohteesta riippuen, perustusten vahvistuskohteissa on tyypillistä käyttää mekaanista hitsausta. Holkillisen jatkoksen etu on tasainen laatu vaikeissa ja ahtaissakin olosuhteissa. (Lehtonen 2007, 45.)

Porapaaluja voidaan asentaa keskeisellä- tai epäkeskeisellä porausmenetelmällä. Keskeisellä porausmenetelmällä porapaalun alapäähän jää avarrinkruunu sekä maakenkä ja epäkeskeisellä porausmenetelmällä alapäähän jää vain maakenkä. Perustustenvahvistuskohteissa yleensä valittu menetelmä on keskeinen porausmenetelmä. (Lehtonen 2007, 46.)

Porauslaitteet ovat päältä lyötäviä vasaraan tai uppovasaraan perustuvia laitteita. Porauslaitteisiin lukeutuvat myös hydraulinen pyöritysyksikkö ja poratangot.

Päältä lyövällä porauslaitteella voidaan porata enintään noin 200 mm porausputkea. Päältä lyövä poravasara iskee poratankoon ja edelleen paalun pohjassa sijaitsevaan maakenkään, jolloin poravasaran iskuteho heikkenee poratankojen jatkosten kasvaessa, näin ollen päältä lyövän poravasaran suurin paalun asennuspituus on noin 30 m. Uppovasaraan perustuvan porauslaitteen vasara sijaitsee paalun alapäässä kiinnittyen poraustankoon sekä porakruunuun ohjausosan niskan välityksellä maakenkään, jolloin porausputki niin sanotusti vedetään maahan. Uppovasaran pyöritysyksikkö sijaitsee paalun yläpäässä. Käyttämällä uppovasaraa on mahdollista asentaa jopa 800 mm porausputkea eikä paalun pituudella realistisilla paalutuspituuksilla ole juurikaan vaikutusta tehoon tai nopeuteen. Perustusten vahvistuskohteissa käytetään tyypillisesti uppovasaraa. (Lehtonen 2007, 42.)

Porapaalutuksessa on tyypillisesti suuremmat kustannukset kuin lyöntipaalutuksessa. Porapaalutuksella on kuitenkin etuja, joiden vuoksi porapaalutus on järkevää. Porapaalu voidaan käytännössä aina porata kallioon asti mahdollisten esteiden läpi. Porapaalutuksen aiheuttama tärinä on pientä eikä poraaminen yleensä syrjäytä maata. (Lehtonen 2007, 43.)

4 TÄRINÄ

Tärinä aiheuttaa maanpinnassa aaltoliikkeitä, joita voidaan jakaa kahteen eri pääluokkaan: Ensisijaiset P-aallot ja toissijaiset S-aallot. P- ja S-aaltoja voidaan kutsua ”keho aalloiksi”, joissa P-aaltojen liike näyttää vetämiseltä ja työntämiseltä aallonharjaa kohti, S-aaltojen liike taas näyttää poikittaissuuntaiselta liikkeeltä. Näiden aaltojen lisäksi on myös R-aalto, jossa komponentit liikkuvat vaaka- ja pystysuuntaisesti nopeasti, mutta tärinä heikentyy syvyyden kasvaessa muita aaltoja nopeammin. (Jones & Stokes 2004.)

Työmaalla useat eri toiminnat aiheuttavat tärinää kuten räjäytykset, paalutus, tukiseinien asentaminen, työkoneiden liike sekä liikenne. (Vuolio & Halonen 2010, 298.) Työmaalla tärinää aiheuttavien työvaiheiden tiedostaminen on tärkeää. Työmaan sijaitessa jo rakennetulla alueella tärinän ymmärrys sekä tiedostaminen korostuu entisestään. Tärinästä on tärkeä tietää sen aiheuttamien yleisten riskien lisäksi myös mahdollisesti tarkasteltavan työvaiheen tärinän taajuus. Taajuus vaikuttaa merkittävästi tärinän vaikutuksiin. Taajuuden avulla voidaan verrata aiheutettavan tärinän taajuutta tarkasteltavan riskirakenteen taajuudensietokykyyn. Kun tärinän aiheuttaminen tiedostetaan, voidaan asiaan vaikuttaa, esimerkiksi esikaivamalla saveen ennen paalutuksen aloittamista. (RIL 253-2010.)

Rakentamisen aiheuttamien tärinöiden huomioon ottaminen jaetaan kolmeen vaativuusluokkaan 1 (helppo), 2 (vaativa) ja 3 (erittäin vaativa). Vaativuusluokka määritetään viimeistään suunnitteluvaiheessa. (RIL 253-2010.)

Vaativuusluokka valikoidaan huomioiden tärinän suuruus, työmenetelmät ja työn kesto. Tärinän riskien suuruuden arvioinnissa otetaan huomioon ympäristön rakenteet, tärinälle herkät laitteet ja koneet sekä mahdollisesti myös ihmiset ja luonto. Taulukko 2 havainnollistaa vaativuusluokan valintaperusteita. Kaikissa tärinäarvioissa on kuitenkin otettava huomioon kohteen yksilölliset ominaisuudet. (RIL 253-2010.)

	A Lyhytaikainen tärinävaikutuksen kesto, pienet suoritemäärät	B Tavanomainen tärinävaikutuksen kesto, keskimääräi- set suoritemäärät	C Pitkä tärinä- vaikutuksen kesto, suuret suoritemäärät
Tärinän vaikutusalueella ei ole tärinistä häiriintyviä erityisiä luonnonarvoja tai ihmisiä tai vaurioituvia rakenteita tai rakennuksia	1	1	2
Kohde on asutulla alueella, tavanomaisia rakennuksia tai rakenteita	2	2	3
Lähellä on tärinäherkkiä rakenteita ja erityistä varovaisuutta edellyttäviä kohteita	3	3	3

Taulukko 2. Tärinän vaativuusluokan valinta. (RIL 253-2010)

Perustuksien tärinäkriteerejä tarkasteltaessa käytetään tyypillisesti suurimman komponentin maksimiarvoa, joka voi olla joko pysty- tai vaakakomponentti. Heilahdusnopeuden maksimiarvosta käytetään symbolia v_{max} . Mikäli tärinävaikutusten arvioinnissa on todettu muun tavan olevan riittävä, voidaan v_{max} jättää huomioida. (RIL 253-2010.)

Heilahdusnopeutta käytetään tyypillisesti vaurioalttiuden kriteerinä, koska sen mittaaminen on helpompaa kuin siirtymien tai kiihtyvyyden. Heilahdusnopeus v (mm/s) saadaan laskemalla (kaava 1).

$$v = F_k \times v_o$$

Kaava 1. Tärinälähteestä syntyvän heilahdusnopeuden raja-arvon laskentakaava huomioiden viereisen rakennuksen kestävyys.

kaavassa 1

F_k = rakennustapakerroin

v_o = heilahdusnopeuden taulukkoarvo ($\frac{\text{mm}}{\text{s}}$)

Vauriot rakenteissa aiheutuvat kuitenkin yleensä rakenteiden siirtymäeroista tai kiihtyvyyden aiheuttamista rasitteista. Heilahdusnopeuden ollessa sama,

matalataajuisen tärinän aiheuttamat siirtymät ovat suurempia kuin korkeataajuisen tärinän. (RIL 253-2010.)

Korkeataajuinen värinä vaimenee maassa nopeammin kuin matalataajuinen värinä, jolloin korkeataajuinen värinä muuttuu matalataajuisemmaksi. Etäisyyden huomiointi ohjearvoissa tehdään työmenetelmän mukaan. Esimerkiksi louhintatyössä ohjearvoon on otettu kantaa etäisyyden välityksellä, mutta maa- ja pohjarakennustöiden osalta vastaavaa vaikutusta ei huomioida värinäalueen ollessa suppeampi kuin louhintatöissä. (RIL 253-2010.)

Tärinän ollessa saman taajuista kuin maakerrosten ominaistaajuus, etäisyys värinän vaimenemiselle kasvaa. Ongelmallisia maaolosuhteita ovat pehmeät savet, joissa alin ominaistaajuus voi sattua raskaan liikenteen, syvätiivistyksen tai paalutustärinän kanssa samalle taajuusalueelle. Työvaiheet, jotka voivat aiheuttaa värinäkuormituksen lisäksi muita siirtymiä rakenteelle, rakenteiden värinän ohjearvoja tyypillisesti alennetaan. (RIL 253-2010.)

Perustuksissa rakennustapakeroiin valitaan rakennetyypin sekä kunnan perusteella taulukko 3. Rakennustapakertoimen avulla voidaan laskea rakenteelle heilahdusnopeuden raja-arvo. Kohteet, joissa esiintyy esimerkiksi kuonossa kunnossa olevia perustuksia, on rakenteiden kestävyys todettava erikseen. Hyväkuntoisille tukipaaluille perustetulle rakennukselle voidaan ohjearvoa korottaa 20 %. Taulukossa olevat kelpoisuudet tarkoittavat vastaavan suunnittelijan tai värinäasiantuntijan kelpoisuutta.

Taulukko 3. Rakennustapakertoimen valinta. (RIL 253-2010)

Rakenneluokka (hyväkuntoinen rakenne)	Rakennustapa- kerroin F_{k_1} (kelpoisuus a-luokka)	Rakennustapa- kerroin F_{k_2} (kelpoisuus aa-luokka)
1. Raskaat teräsbetoni- ja teräsrakenteet, kuten sillat ja laiturit	1,75	2,00
2. Teräsbetoniset, teräksiset ja puurakenteiset teollisuus- ja varastorakennukset, ruiskubetonoidut kalliotilat (ks. myös kohta 3.9), yleensä staattisesti määrätyt rakenteet, joissa ei asuta tai työskennellä	1,25	1,50
3. Pilariperustuksille rakennetut elementtirakenteiset teräsbetonirakenteet, teräs- ja puurakenteiset toimisto- ja asuinrakennukset, muut puu- ja teräsrakennukset, johdot ja maakaapelit (ks. myös kohta 3.9)	1,00	1,20
4. Massiiviseinäiset tiili-, kevytsoraharkko- ja teräsbetonirunkoiset teollisuus-, toimisto- ja asuinrakennukset, lasiseinäiset teräsrunkoiset sekä tiiliverhotut puurunkoiset rakennukset, ruiskubetonoimattomat kalliotilat (ks. myös kohta 3.9)	0,85	1,00
5. Rakennukset, joissa on kevytbetoni- tai kalkkihiekkatiilirakenteita, tai muuta vaurioherkkää materiaalia, värinä- ja värähtelyherkät vanhat rakennukset, kuten kirkot tai korkeita holveja käsittävät rakenteet	0,55	0,65

Taulukko 4. Heilahdusnopeuden arvon valinta työmenetelmittäin maa- ja kalliopohjille perustetuille rakennuksille. (RIL 253-2010)

1	2	3	4	5
Työmenetelmä	Pehmeä savi, leikkauslujuus < 25 kN/m ²	Sitkeä savi, siltti, löyhä hiekka	Tiivis hiekka, sora, moreeni, rikkonainen tai löyhä kallio	Kiinteä kallio
Pudotustiivistys, lyöntipaalutus, maankaivu, työmaaliikenne, pontitus lyömällä ja täryttämällä, tärytiivistys, porapaalutus, iskuvasaran käyttö eri tarkoituksiin *)	5	7	10	12

4.1 Tärinä lyöntipaalutuksessa

Paalutusmenetelmistä selvästi suurimmat tärinäarvot syntyvät lyöntipaalutuksessa. Paalutus pudotusjärkäleellä on iskumaista ja hydraulivasaralla jaksollisesti iskumaista. Suurin tärinä lyötäessä syntyy paalun kärjestä. Paalun heiluminen voi aiheuttaa tärinää, ja tiiviissä maassa sivuvastuksella voi myös olla merkitystä. Paalutus lähietäisyydellä pudotusjärkäleellä aiheuttaa 5-40 Hz:n tärinää alentuen matkan kasvaessa 5-20 Hz:n alueelle. Hydraulivasaralla tärinän taajuus pysyy 5-100 Hz alueella, riippuen lyöntitiheydestä ja sen monikerroista. (RIL 254-2010.)

Paalutustyön aiheuttaman tärinän arviointiin voidaan käyttää RIL-ohjekirjassa esitettyä laskukaavaa, joka perustuu paalutuksen osalta nimelliseen iskuenergiaan W , etäisyyteen r sekä maaperän arvoon k . Kaavat 2 ja 3 kuvaavat valittavien arvojen valintaperusteita. (RIL 254-2010). Kaavan avulla voidaan maaperäkohtaisesti määrittää paalutuksessa syntyvä maksimiheilahdusnopeus. Vastaavasti Kaliforniassa tehtyjen kokeellisten tutkimusten ja näiden pohjalta määritettyjen laskentakaavojen perusteella voidaan tehdä arvioita tärinävaikutuksesta. (Jones & Stokes. 2004.) Kaliforniassa tehty tutkimus ei ota huomioon eri maaperän arvoja.

$k = 1,0$ TIVIS MAAPOHJA

$k = 0,6$ KESKITIIVIS
MAAPOHJA

$k = 0,2$ PEHMEÄ
MAAPOHJA

Kaava 2. Maapohjan vakioarvot. (RIL 253-2010)

$$V_{max} = k \times \frac{\sqrt{W}}{r} \text{ mm/s}$$

Kaava 3. Maksimiheilahdusnopeuden laskentakaava. (RIL 253-2010)

Kaliforniassa tehtyjen tutkimusten perusteella pätee hydraulivasaraa käyttävän paalutuskoneen tärinän maksimiarvolle seuraava kaava (kaava 4), rakenteiden maksimitärinänsiedolle ohje arvot (taulukko 5) (Jones & Stokes. 2004)

$$PPV_{hydraulic\ Breaker} = PPV_{ref} \times \left(\frac{25}{D}\right)^n \times \left(\frac{E_{equip}}{E_{ref}}\right)^{0,5} (in/sec)$$

Kaava 4. Kaliforniassa tehtyjen tutkimusten tärinän maksimiarvon laskentakaava.

jossa

$$PPV_{ref} = \text{hydraulivasaran vakioarvo } 0,24 \frac{\text{in}}{\text{sec}} = 6,1 \text{ mm/s}$$

D = etäisyys tarkasteltavaan pisteeseen

n = vakioarvo maaperälle 1,1

E_{equip} = käytettävän hydraulivasaran teho

E_{ref} = Vakioarvo hydraulivasaran teholle 5000 lbs – ft = 6779Nm

Taulukko 5. Rakennusten suurin tärinänsieto. Taulukko vapaasti käännetty, alkuperäinen liitteessä 1. (Jones & Stokes. 2004)

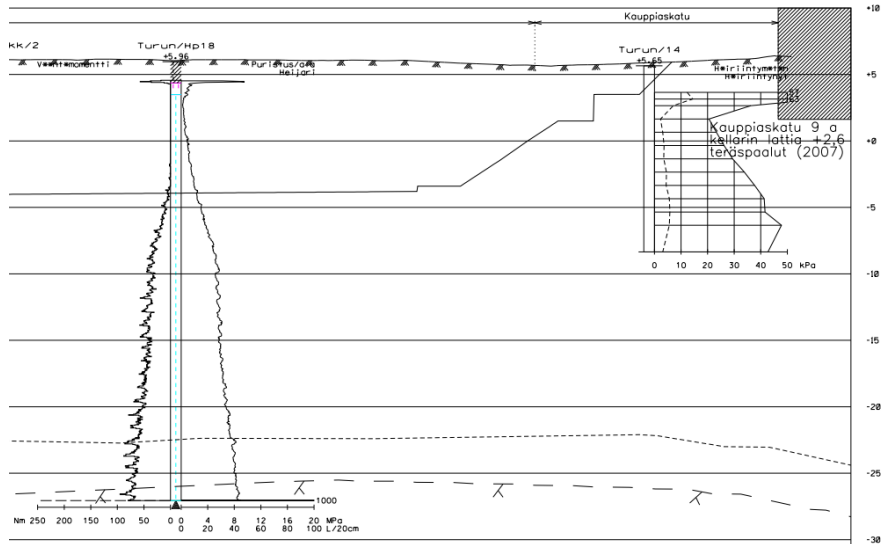
Rakenne ja rakenteiden kunto	Suurin tärinänsieto (mm/s)	
	Lyhytaikainen tärinä	Jatkuva tai usein toistuva tärinä
Erittäin hauraat historialliset rakennukset, muinaisjäännökset	3,048	2,032
Hauraat rakennukset	5,08	2,54
Historialliset ja jotkin vanhat rakennukset	12,7	6,35
Vanhat asuinrakennukset	12,7	7,62
Uudet asuinrakennukset	25,4	12,7
Uudet tehtaat ja kaupalliset tilat	50,8	12,7

4.2 Tärinämittarit

Rakennushankkeissa tärinämittareiden avulla saadaan tietyn työvaiheen, kuten paalutuksen aiheuttama tärinä ja maksimi heilahdusnopeus. Mittari asetetaan tyypillisesti rakennuksen perustusten ulkopuolelle. Mittarille voidaan asettaa tietty kynnysarvo, jonka jälkeen tulosten rekisteröinti alkaa. Rekisteröinnin kestolle voidaan myös asettaa aikaraja, jonka sisällä mittaustulokset tallentuvat. Mittaukset, joissa tärinämittari on lähellä tärinälähdettä, keskittyy tulosten paino usein korkeille taajuuksille, jonka seurauksena mittauskriteerin ollessa heilahdusnopeus tai kiihtyvyys on tuloksilla todettu suuri huippuarvo, vaikka siirtymäamplitudi olisi-kin pieni. (RIL 253-2010.)

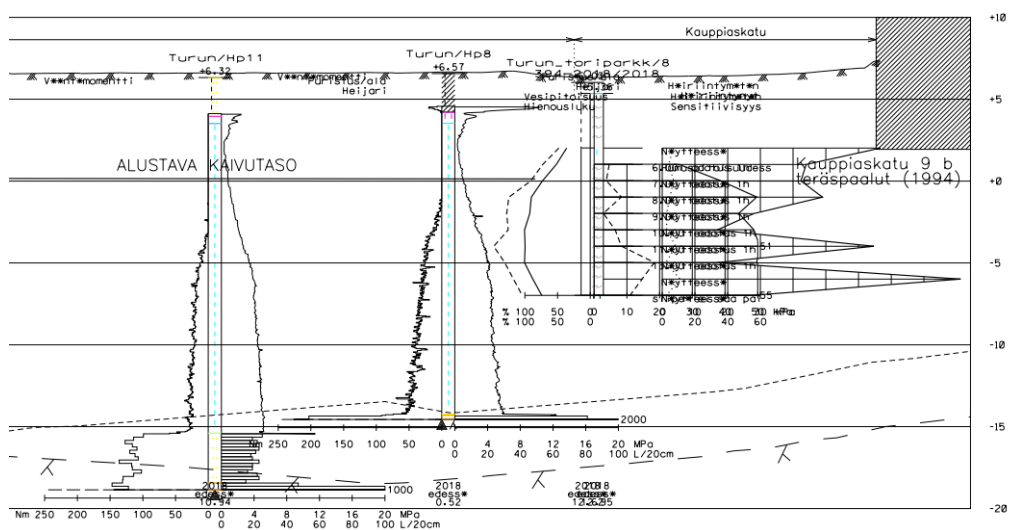
Mittareissa on yleensä anturi, joka on geofoni tai piezosähköinen, joista geofoni on yleisin. Geofonianturi mittaa heilahdusnopeutta taajuudella 5-300 Hz, kun taas piezosähköisen anturi on verrannollinen kiihtyvyyteen. Mittareilta vaaditut ominaisuudet ovat enintään 5 %:n epätarkkuus taajuusvälillä 10-200 Hz ja signaalikohinasuhteen tulisi olla vähintään 10dB. (RIL 253-2010.)

Puristin-heijarikairauksessa Hp18 C-C linjalla todentuu maaperän luonne tasaisena paksuna savikerroksena, jonka alla on moreenikerrostuma noin -22 m syvyydessä sekä oletettu kallio noin -26 m syvyydessä. (kuva 6)



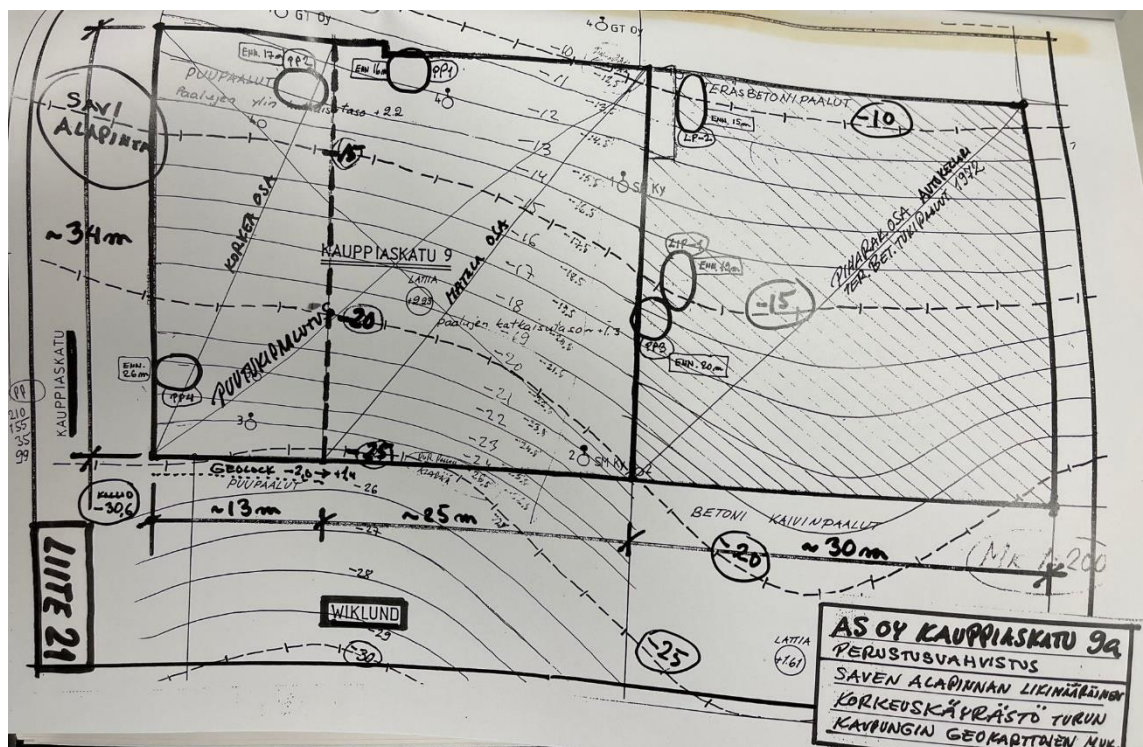
Kuva 4. Puristin-heijarikairaus Hp18.

Puristin-heijarikairauksessa Hp11 D-D linjalla kairaus saavuttaa moreenin yläpinnan - 15 m korkeudessa sekä oletetun kallion noin -18 metrissä. Kairauksen osuudella moreenin sekä kallion pinta nousee kohti Kauppiaskatua. (kuva 7)



Kuva 5. Puristin-heijarikairaus Hp11.

Toriparkkityömaan aikana tehtyjä tutkimuksien todenperäisyyttä Kauppaiskatu 9a:n osalta vahvistaa myös kiinteistössä toteutettu pohjatutkimus perustusten vahvistusta varten. Pohjatutkimuksissa on todettu moreenin alapinnan olevan rakennuksen kohdalla syvimmillään noin. -25 metrissä sekä korkeimmillaan -10 metrissä. Tämän opinnäytetyön kohteen paalutus sijaitsee alueella, jonka moreenin yläpinta on välillä - 18 m ja -25 m (Kuva 8)



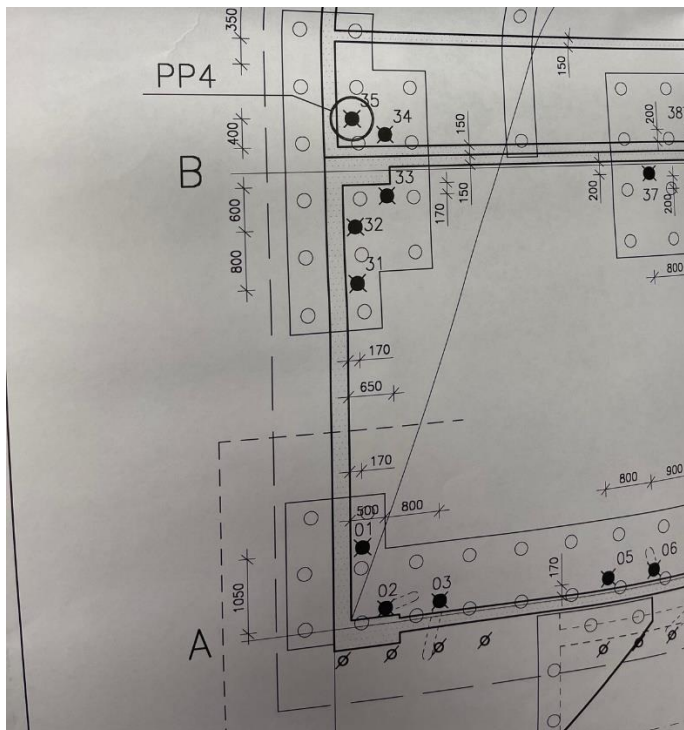
Kuva 6. Kauppaiskatu 9a:n pohjatutkimustulokset- saven alapinnan käyrästä.

5.2 Perustusten vahvistus Kauppaiskadulla

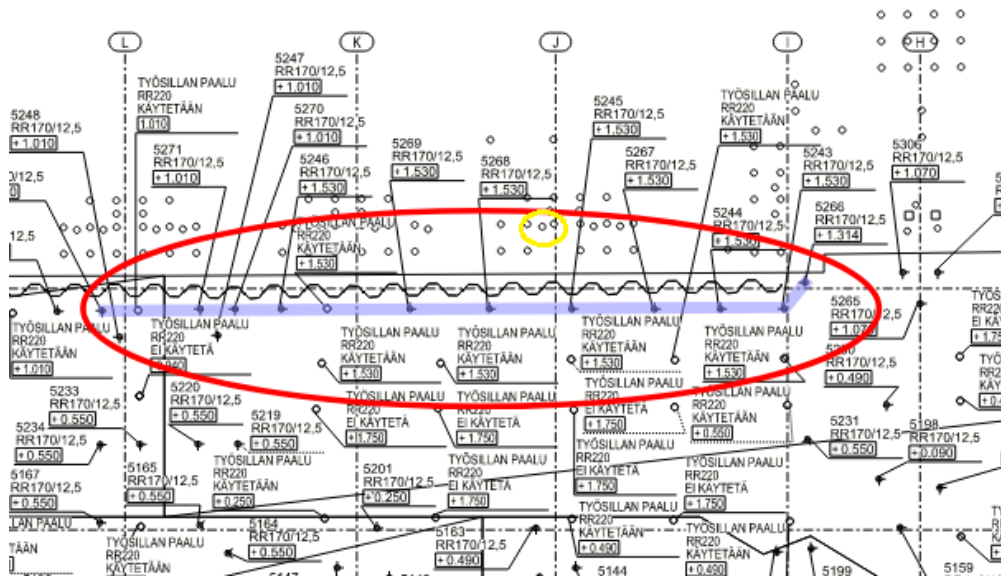
Kauppatorin Kauppaiskadun osalta perustusten vahvistusta on toteutettu kahdella eri menetelmällä: Porapaalutuksella ja puristuspaalutuksella. Näistä menetelmistä puristuspaalutus ylettyy vain pehmeän maakerroksen läpi, eikä kallioon tai välttämättä tiiviiseen moreenikerrokseen, kun taas porapaalu porataan lähes poikkeuksetta kallioon. Näin ollen puristuspaalu on heikoin sekä altis lähellä suoritettavan paalutuksen tärinälle.

5.3 Kauppiaskatu 9a:n perustustenvahvistus

Kauppiaskatu 9a:n perustustenvahvistus on suoritettu jälki-injektoiduilla puristuspaaluilla. Puristuspaalut on asennettu rakennuksen seinämän sisäpuolella, koska tekniikan ja kustannusten vuoksi ulkopuolelta asentaminen ei olisi ollut kannattavaa. Laadunvalvontaan on valittu tiettyjä puristuspaaluja, joita on tarkasteltu tarkemmin kokein. Tässä työssä keskitytään tarkastukseen otettuun PP4-paaluun, joka sijaitsee lähimpänä lyöntipaalutusaluetta. (kuvat 9 ja 10.) Lyöntipaalutusalue on kuvan 9 PP4-paalun vasemmalla puolella.



Kuva 7. PP4:n sijainti vanhassa rakennuksessa.



Kuva 8. PP4:n sijainti paalutuspiirustuksessa ympäröitynä keltaisella. Mustalla ympäröidyt paalut ovat vanhoja puristuspaaluja ja lilan viivan alapuolella olevat paalut uusia lyöntipaaluja.

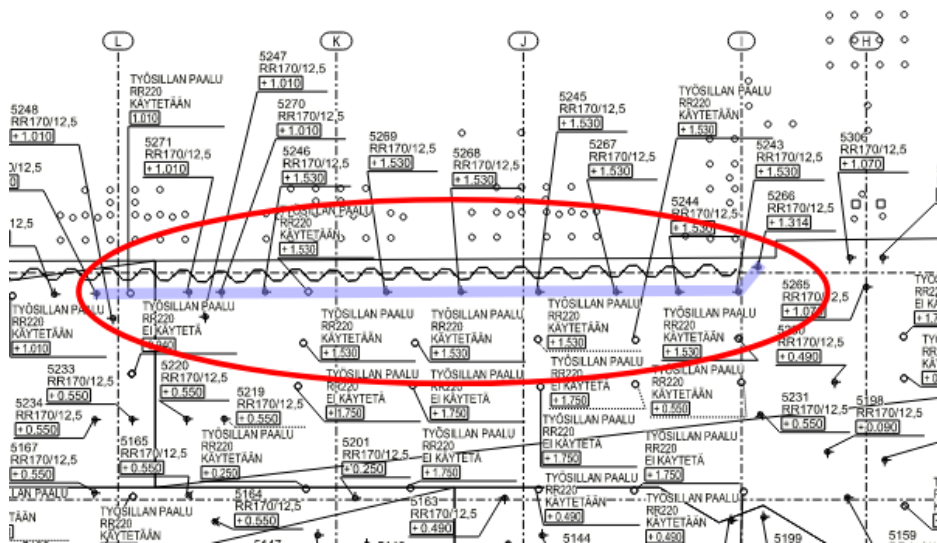
Paalut, jotka on otettu koepaaluiksi, on merkattu erilliseen pöytäkirjaan, joista selviää paalun pituus, koekuormitusarvot, painuma, palautuma, käyryys sekä sallitut kuormat. PP4-paalun osalta pöytäkirjaan on merkitty paalun pituudeksi 23,7 m (kuva 11). Koepaaluista saatiin selville tämän kohteen kantavuuksia ja kuinka suuria kantavuuksia voidaan olettaa näillä puristuspaaluelementeillä.

KOE-PAALUN "KOODI"	KOE-PAALUN NUMERO	KOE-PAALUN PITUUS [m]	KOE-JAALUN KÄYRYYS SÄDE R [m]	MAX. KOESTUSVOIMA [kN]	MITATTU MAX. PAINUMA MAX. KUORMALLA [mm]	MITATTU PALAUTUMA (SUOST) PÄÄLLIN [mm]	LASKENNALLINEN PALAUTUMA (SUOST) TÄLLÄISIN [mm]	LIEMENILASETTU TODELLINEN PÄÄLLINEN TÄLLÄISIN [mm]	PAALUN SALLITTU KUORMA ESTÄTTELEEN [kN]
PP1	210	14,2	33	720	18,3	7,1	10,8	7,9	$F_{rak} = 310$ $F_{sall} = 60$ $F_{max} = 370$
PP2	155	14,0	110	930	33,7	11,1	13,8	14,5	$F_{rak} = 400$ $F_{sall} = 80$ $F_{max} = 480$
PP3	99	21,2	"LAHPU-SUORA"	1070	35,9	21,9	24,0	15,5	$F_{rak} = 460$ $F_{sall} = 90$ $F_{max} = 550$
PP4	35	23,7	"LAHPU-SUORA"	1000	37,1	22,9	25,1	16,0	$F_{rak} = 460$ $F_{sall} = 90$ $F_{max} = 550$
PP5	209	14,2	"LAHPU-SUORA"	1070	14,7	8,5	16,2	6,3	$F_{rak} = 460$ $F_{sall} = 90$ $F_{max} = 550$

Kuva 9. Puristuspaalujen tarkastuspöytäkirja.


5.4 Paalutustyö

Kauppiaskatu 9a:n alueen paalutus suoritettiin kahdessa osassa työvaiheiden yhteensovittamisen onnistumiseksi. Ensimmäisen osan paalutustyö (kuva 12) oli tämän tutkimuksen aiheena koska paalutustyö oli haasteellisempi maaperäominaisuuksien vuoksi. Pisimmän paalut sijaitsevat tällä alueella.



Kuva 10. Paalutusalue.

Lyötävien paalujen koko oli RR170/12,5. Paalujen alapää oli varustettu kalliokärjillä. Matkaa lähimmältä lyötävältä paalulta Kauppiaskatu 9a:n anturaan on noin 1,5 m ja puristuspaaluun 2,5 m. Lyödyistä paaluista pisin sijaitsi pisteellä 5266, paalun pituudeksi tuli 41,5 m. Lähimpänä tarkasteltua puristuspaalua olevan paalupisteen 5245 paalupituudeksi tuli 25 m (kuva 13)

			Paalutuskone Liebherr 939 Järkäle/vasara SPD 2000 Järkäleen massa 101 kg Iskutyyny Ei käytössä Iskusuoja Ei käytössä Apupaalu Ei käytössä Paalumateriaali Teräs Paalutyyppe RR 170 Lujuusluokka Rasitusluokka Jatkostyyppi Holkkijatkos										Työmaan nimi Työmaan osoite Tilaaja Skanska Suunnitelma Piirrustuksen numero Loppulyöntiehto 30s painuma 2mm tai alle.													
			Paalutustyönjohtaja Patrik Thesleff / Tommi Rantanen Paalutuskoneen käyttäjä Joni Parkkila																							
Numero	Asennus-pvm	Valmistaja	Valmistuspäivämäärä [pp.kk.vv]				Elementtien pituudet [m]				Kärki	Pituus yht. [m]	Haikaisija / Sivumitta [mm]	suoruus / valon näky	Loppulyönnit					Energia [kJNm]	Pudotus-korkeus [m]	Korko			Lopullinen pituus [m]	
			Ala	Väli	Väli	Ylä	Ala	Väli	Väli	Ylä					1	2	3	4	5			Yläpää	Katkaisu	Alapää		
5145	1.9.21	ssab					12	12	12		kallio	36	168,3	ok	4	3	2		5,00						-36,00	36,00
5146	2.9.21	ssab					12	4,7	5,7	6,2	kallio	28,6	168,3	ok	5	3	3	2	5,00						-28,60	28,60
5147	2.9.21	ssab					12	11,2	1,7		kallio	24,9	168,3	ok	3	3	2		5,00						-24,90	24,90
5163	2.9.21	ssab					12	12	6,9		kallio	30,9	168,3	ok	4	3	2		5,00						-30,90	30,90
5201	2.9.21	ssab					12	12	4,1		kallio	28,1	168,3	ok	4	3	3	2	5,00						-28,10	28,10
5246	2.9.21	ssab					12	12	12		kallio	36	168,3	ok	4	2	2		5,00						-36,00	36,00
5219	2.9.21	ssab					12	12	4,4		kallio	28,4	168,3	ok	5	3	3	2	5,00						-28,40	28,40
5271	2.9.21	ssab					12	7,6	7,6	7,3	kallio	34,5	168,3	ok	3	3	2	2	5,00						-34,50	34,50
5247	2.9.21	ssab					12	12	12		kallio	36	168,3	ok	3	3	2		5,00						-36,00	36,00
5165	2.9.21	ssab					12	12	12		kallio	36	168,3	ok	3	2	2		5,00						-36,00	36,00
5220	2.9.21	ssab					12	12	12		kallio	36	168,3	ok	4	4	2	2	5,00						-36,00	36,00
5270	3.9.21	ssab					12	7,8	6,7	7,1	kallio	33,6	168,3	ok	4	2	2		5,00						-33,60	33,60
5231	3.9.21	ssab					12	12	9,3	6,7	kallio	40	168,3	ok	3	3	2		5,00						-40,00	40,00
5233	3.9.21	ssab					10,7	5	10,1		kallio	25,8	168,3	ok	4	3	2		5,00						-25,80	25,80
5198	31.8.21	ssab					1	12	8,5		kallio	21,5	168,3	ok	4	3	3	2	5,00						-21,50	21,50
5230	31.8.21	ssab					12	12	9,4		kallio	33,4	168,3	ok	3	3	2		5,00						-33,40	33,40
5159	31.8.21	ssab					12	12	7,2		kallio	31,2	168,3	ok	5	3	2	2	5,00						-31,20	31,20
5199	31.8.21	ssab					12	12	7,6		kallio	31,6	168,3	ok	4	3	2	2	5,00						-31,60	31,60
5197	31.8.21	ssab					12	12	8,5		kallio	32,5	168,3	ok	4	3	2		5,00						-32,50	32,50
5196	31.8.21	ssab					12	12	6,2		kallio	30,2	168,3	ok	4	3	2		5,00						-30,20	30,20
5160	31.8.21	ssab					12	12	12		kallio	36	168,3	ok	3	3	2		5,00						-36,00	36,00
5305	1.9.21	ssab					12	12	12	3,5	kallio	39,5	168,3	ok	3	2	2		5,00						-39,50	39,50
5265	1.9.21	ssab					12	12	12	3,5	kallio	39,5	168,3	ok	4	4	2		5,00						-39,50	39,50
5306	1.9.21	ssab					12	12	12	4,7	kallio	40,7	168,3	ok	4	3	2	2	5,00						-40,70	40,70
5266	1.9.21	ssab					12	12	12	5,5	kallio	41,5	168,3	ok	4	3	2		5,00						-41,50	41,50
5244	1.9.21	ssab					12	12	3,5		kallio	27,5	168,3	ok	3	3	2		5,00						-27,50	27,50
5267	1.9.21	ssab					12	12	7,5		kallio	31,5	168,3	ok	3	2	2		5,00						-31,50	31,50
5243	1.9.21	ssab					12	12	8,7	7	kallio	39,7	168,3	ok	3	3	2		5,00						-39,70	39,70
5245	1.9.21	ssab					12	12	1,7		kallio	25,7	168,3	ok	0	kivi			5,00						-25,70	25,70
5268	1.9.21	ssab					12	10,3	12	3,8	kallio	38,1	168,3	ok	4	4	3	2	5,00						-38,10	38,10
5269	1.9.21	ssab					12	12	12		kallio	36	168,3	ok	4	3	2		5,00						-36,00	36,00
5144	1.9.21	ssab					12	12	12		kallio	36	168,3	ok	3	2	2		5,00						-36,00	36,00

Kuva 11. Paalutuspöytäkirja. Keltaisella merkitty paalutusalueen paalut.

5.5 Paalutuskalusto

Paalutustyössä käytettiin kohteessa paalutuskoneena Skanska Infra Oy:n Liebherr 936 tela-alusteista kaivinkonetta, johon oli liitetty SPD2000–hydraulivasara (kuva 17) sekä apukoneena tela-alusteista cat4636–kaivinkonetta. (kuva 14)

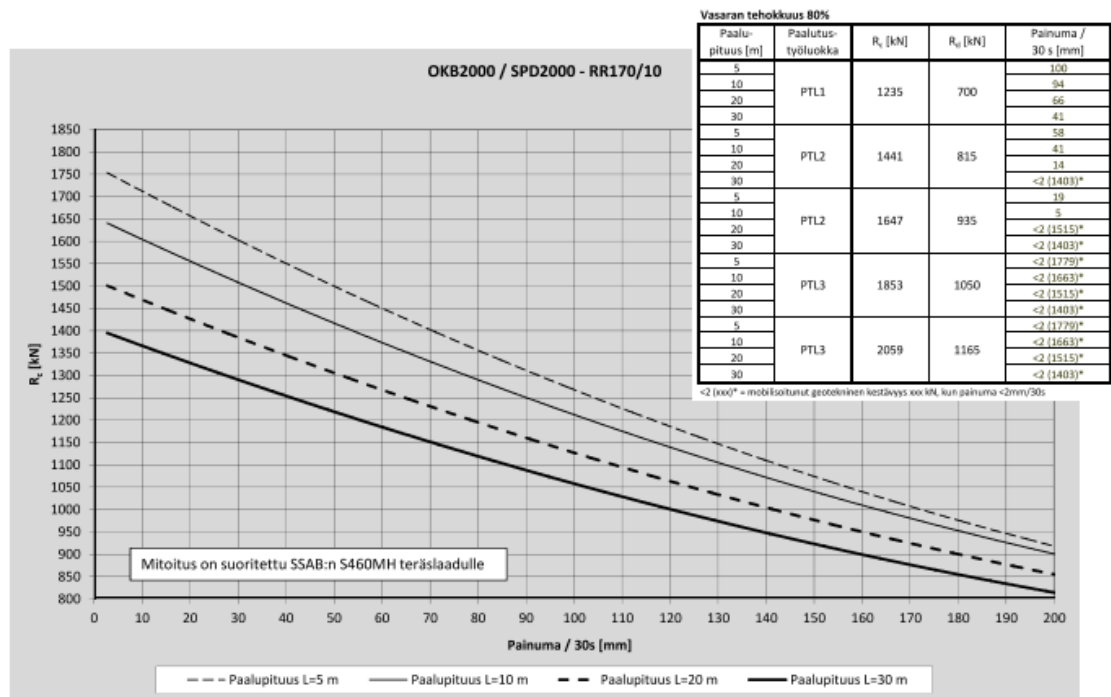


Kuva 12. Paalutuskalusto.

Kuvassa 15 on esitetty käytetyn hydraulivasaran tekniset ominaisuudet sekä kuvassa 16 käytetyn hydraulivasaran loppulyöntipainumat käytettäessä RR170/12,5 Paaluja.

OKB2000 / SPD2000		
Iskumäntä		
Männän massa [kg]	m_r	106
Männän halkaisija [mm]	D_r	140
Männän pituus [mm]	L_r	1320
Teoreettinen energia [J]	E_{rated}	5290
Männän tehokkuus [%]	HE	80
Ekvivalentti pudotuskorkeus [m]	H_{ekv}	5,39
Teoreettinen iskuluku [isku/min]	BPM	400...800
Todellinen iskuluku teoreettisesta [%]	η	69
Mitattu / laskennassa käytetty iskuluku [isku/min]	BPM_m	550
Iskukappale		
Kappaleen läpimitta [mm]	D_i	135
Kappaleen korkeus [mm]	L_i	700
Kappaleen massa [kg]	m_i	77

Kuva 13. Hydraulivasaran tekniset ominaisuudet.



Kuva 14. Hydraulivasaran loppulyöntipainumat käytettäessä RR170/12,5 paaluja.

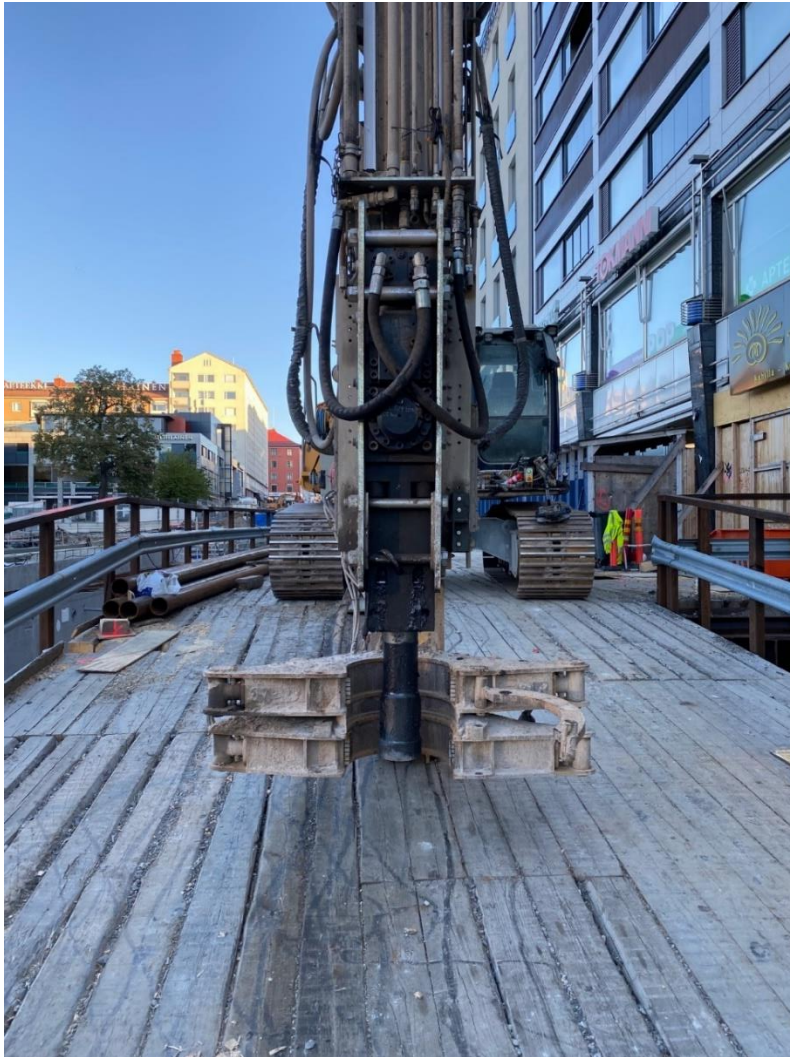
Paalutustyöluokka määräytyy suunniteltavan kohteen vaatimusluokan mukaan. Tässä kohteessa paalutustyöluokka oli PTL3 (taulukko 8) (Kärki 2021).

Vasaran tehokkuus 80%

Paalupituus [m]	Paalutustyöluokka	R_c [kN]	R_d [kN]	Painuma / 30 s [mm]
5	PTL1	1520	860	80
10				58
20				25
30				3
5	PTL2	1773	1005	39
10				14
20				<2 (1657)*
30				<2 (1521)*
5	PTL2	2026	1150	8
10				<2 (1881)*
20				<2 (1657)*
30				<2 (1521)*
5	PTL3	2280	1295	<2 (2079)*
10				<2 (1881)*
20				<2 (1657)*
30				<2 (1521)*
5	PTL3	2533	1435	<2 (2079)*
10				<2 (1881)*
20				<2 (1657)*
30				<2 (1521)*

<2 (xxx)* = määritetty geotekninen kestävyys xxx kN, kun painuma <2mm/30s

Taulukko 5. Paalutustyöluokka.



Kuva 15. SPD2000 Hydraulivasara.

5.6 Tärinä- ja painumamittaus

Tärinämittauksissa mittarit Kauppiskatu 9a:ssa sijaitsivat kellarin sprinklerihuoneessa sekä viidennessä kerroksessa, Mittareiden toiminta perustui geofonianturiin. Tärinämittarit olivat jatkuvassa mittauksessa vuorokauden ympäri. Mittareiden rajat olivat hälytystason osalta asetettu 5 mm/s, jolloin mittari lähetti ilmoituksen rajan ylittyessä. Varoitushälytys oli asetettu lukemaan 10 mm/s. (kuva 17) Suunnittelija määritteli mittarien rajat aikaisemman kokemuksen perusteella.

MITTAUSPISTE

TIETOJA	LISÄTIEDOT	HÄLYTYS JA ILMOITUKSET	KUVAT
✓ AKTIVOI VIESTIN LÄHETYS		ILMOITUSRAJAN ARVO (mm / s) 5	
✓ KÄYTÄ HÄLYTYSRAJOJA		HÄLYTYKSET (mm / s) 5	VAROITUS (mm / s) 10
✗ HÄLYTYS / VAROITUS PROSENTEINA			
✗ HÄLYTYSTIEDOT		KIIHTYVYYDEN YLITYS (m / s ²)	HÄLYTYS UM () m

MP HISTORIA

MP5V	I-4658:G-13970	2019-01-25 09:50 -
MP5L	I-4658:G-13971	2019-01-25 09:50 -
MP5T	I-4658:G-13972	2019-01-25 09:50 -

✗ SULJE

Kuva 16. Tärinämittarien asetukset hälytysten osalta.

Painumamittaus suoritettiin tarkkavaaituskojeella puolen rakennuksen osalta kolmessa mittauspisteessä, sekä kahdessa tarkepisteessä joihin tarkkavaaituksella jänämittattuja arvoja verrattiin painuman tarkepisteisiin. Mittapisteisiin porattiin reikä, johon asetettiin kiila-ankkuri. (kuva 19) Mittapisteet on esitetty kuvassa (kuva 20)



Kuva 17. Tarkkavaaituksen mittapiste 2.



Kuva 18. Tarkkavaaituksen mittapisteet ilmakuvassa.

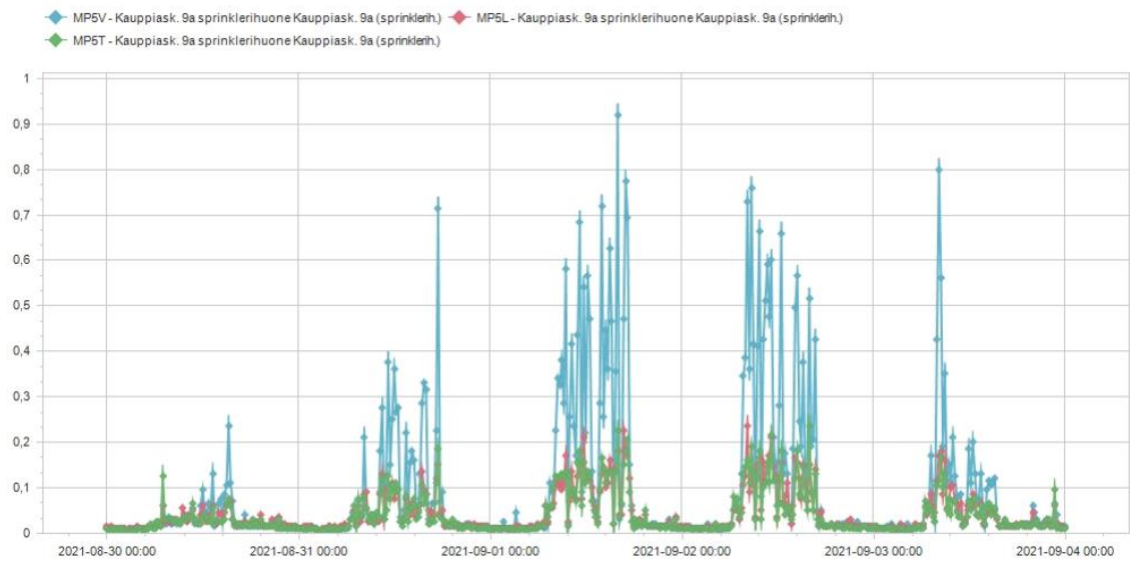
6 MITTAUSTULOSTEN JA LASKELMIEN VERTAILU

Seurantavaaituksen osalta kahden mittauksen keskiarvotuloksiksi saatiin ensimmäisen mittauksen osalta $-0,00073$ mm ja toisen mittauksen osalta $-0,00053$ mm. Mittauksen osalta virhearvot ovat mahdollisia mutta vaikea todentaa, kun kyseessä on hyvin pienet lukemat. (Kuva 21.)

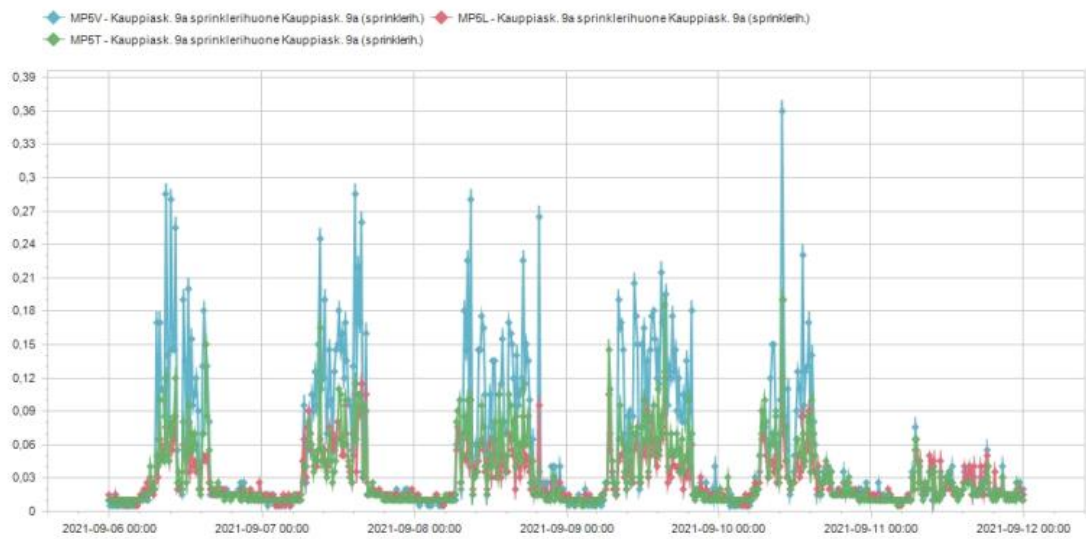
Metro paalutuksen seurantavaaitus		Lähtötilanne	Seuranta 1	lähtötilanteeseen mm	Seuranta 2	ero edelliseen mm	lähtötilanteeseen mm
		31.8.2021	3.9.2021				
tarkkailupiste	2	99,3969	99,3962	-0,0007	99,3965	0,0003	-0,0004
	3	99,6608	99,6605	-0,0004	99,6599	-0,0006	-0,0009
	4	100,6608	100,6597	-0,0011	100,6605	0,0007	-0,0003
Mittauspäivä	31.8.2021		Mittauspäivä	3.9.2021	Mittauspäivä	8.9.2021	
Mittaaja	Jari Jalavikko		Mittaaja	Jari Jalavikko	Mittaaja	Jari Jalavikko	
Seurannan lähtöpiste 100, jolle annettu erillisjärjestelmän korkeus 100.0000							

Kuva 19. Tarkkavaaituksen tulokset.

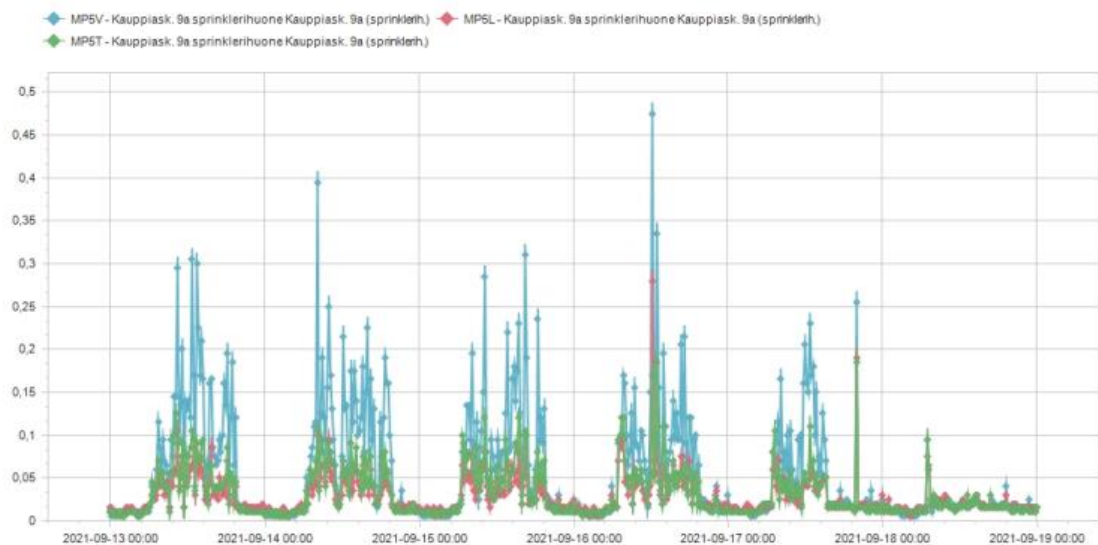
Tärinämittareiden arvot kohosivat paalutustyön ollessa käynnissä korkeintaan arvoon $0,93$ mm/s. Vertailun vuoksi voidaan verrata paalutuksen jälkeisiä viikkoja. Vertailussa paalutuksen jälkeisen viikon maksimitärinäarvo oli $0,36$ mm/s. Kaksi viikkoa paalutuksen jälkeen otetussa vertailuarvossa maksimitärinä oli $0,47$ mm/s. Tulosten perusteella paalutus on aiheuttanut huomattavasti suurempaa tärinää kuin työmaaliikenne tai muut työvaiheet alueella. (kuva 23) (kuva 24) (kuva 25.)



Kuva 20. Tärinäarvot paalutuksen aikana.



Kuva 21. Tärinäarvot paalutuksen jälkeisellä viikolla.



Kuva 22. Tärinäarvot kaksi viikkoa paalutuksen jälkeen.

Kauppiaskadun lyöntipaalutuksen aiheuttamia teoreettista heilahdusnopeutta arvioitiin luvussa 4.2 esitetyin tavoin, huomioiden käytetyn hydraulivasaran iskuenergia.

$$V_{max} = k \times \frac{\sqrt{W}}{r} = 0,2 \times \frac{\sqrt{4232Nm}}{2,5m} = 5,2 \text{ mm/s}$$

Kaava 5. Maksimitärinä savimaalla.

Maaperätutkimusten mukaan tiiviin maakerroksen osuus paalupituudesta on noin 2 m, jolloin käytetyllä paalutuskoneistolla tämän maaperän tärinäosuudeksi saadaan

$$V_{max} = k \times \frac{\sqrt{W}}{r} = 1 \times \frac{\sqrt{4232Nm}}{2,5m} = 26 \text{ mm/s}$$

Kaava 6. Maksimitärinä tiiviissä maakerroksessa.

$$V = Fk \times V_o = 0,55 \times 10 \frac{mm}{s} = 5,5 \text{ mm/s}$$

Kaava 7. Huonokuntoisen rakennuksen maksimitärinäsieto.

$$V = Fk \times V_0 = 0,65 \times 10 \frac{mm}{s} = 6,5 \text{ mm/s}$$

Kaava 8. Hyväkuntoisen rakennuksen maksimitärinäsieto.

$$PPVhydraulic \text{ breaker} = 0,24 \text{ in/sec} \times \left(\frac{25}{8,2ft}\right)^{1,1} \times \left(\frac{3121ft-lbs}{5000ft-lbs}\right)^{0,5} = 0,65 \frac{\text{in}}{\text{sec}} = 16,5 \text{ mm/s}$$

Kaava 9. Aiheutetun tärinän maksimiarvo Kalifornialaisessa lähteessä määritetyllä laskukaavalla.

Kalifornialaisen tutkimuksen kaavaa käyttämällä saadaan laskettua tulokseksi 16,5 mm/s, jonka lähde toteaa olevan vanhan ja uuden rakennuksen sietokyvyn välissä.

$$1 \text{ in/sec} > 0,65 \text{ in/sec} > 0,5 \text{ in/sec}$$

Jossa

$$1 \frac{\text{in}}{\text{sec}} = 25,4 \text{ mm/s}$$

$$0,65 \frac{\text{in}}{\text{sec}} = 16,5 \text{ mm/s}$$

$$0,5 \frac{\text{in}}{\text{sec}} = 12,7 \text{ mm/s}$$

Kaava 10. Kaliforniassa tutkitun kaavan mukaan tärinän sieto on vanhan- ja uuden rakennuksen sietokyvyn välissä. (taulukko 6)

Tärinämittarit sijaitsivat betoniseinän takana, jonka voidaan olettaa pienentävän tärinää. Tärinän siirtoarvo rakenteessa voidaan olettaa olevan 0,3–0,55. (Hakulinen 2009.)

Kauppiaskatu 9a:n tärinälle mitattu arvo 0,93 mm/s laskettuna siirtoarvon mukaisesti antaa tuloksen 1,35–1,58 mm/s, joka on huomattavasti pienempi kuin laskettu teoreettinen RIL:n ohjeen mukaan arvioitu tärinä 5,3 mm/s.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Kauppiaskatu 9a:n edessä suoritettavan paalutuksen vaikutusta puristuspaaluilla vahvistetun rakennuksen perustukseen. Opinnäytetyössä käsiteltävässä tapauksessa uhkana paalutuksessa oli aiheutettu tärinä, joka pahimmassa tapauksessa voi tiivistää puristuspaalun alapuolella olevaa maakerrosta ja aiheuttaa painumaa olemassa oleville paaluille ja rakennukselle. Paalutusten lisääntyessä lähempänä jo rakennettua ja mahdollista perustusvahvistettua rakennusta tärinätulosten laskeminen sekä suunnittelu on tärkeää.

Suomessa käytettävät laskelmat ovat suuntaa antavia ja testattu hydraulivasaran osalta vain tavanomaisilla 2 000–3 000 joulen lyöntienergiämäärillä. Kaliforniassa testattu laskumenetelmä ei ota kantaa maaperään, jonka vuoksi laskentaa ei voi suoraan hyödyntää Suomen olosuhteisiin. Kaliforniassa toteutetun tutkimuksen laskukaavan avulla päästään samoihin rakenteiden kestävyysluokkiin, mutta tärinäarvot käytetylle paalutuskalustolle antavat huomattavasti suurempia arvoja kuin mitä toteutuneet mitatut arvot osoittivat tässä kohteessa. Saatavilla olevien laskentamenetelmien ollessa vain suuntaa antavia, suunnittelijan vastuu kasvaa. Suunnittelijat perustavat tietonsa tässä asiassa laskujen lisäksi pitkälti kokemukseen ja aikaisempien kohteitten paalutukseen.

Tämän opinnäytetyön paalutuskohteen paalutyypiksi valittiin pieniläpimittainen 170/12,5 RR-paalu sekä lyöntilaitteeksi hydraulivasara tärinän minimoitumiseksi. Kohteessa seurattiin myös painumia sekä tärinämittareiden tuloksia. Painumia seurattiin yhdellä mittauksella ennen paalutusta sekä kahdella mittauksella paalutuksen jälkeen, ensimmäinen heti paalutuksen jälkeen ja toinen kolme päivää työvaiheen päättymisestä. Tärinämittarien seuranta oli jatkuvaa määritettyjen rajojen kanssa. Kauppiaskatu 9a:n perustusten vahvistus on suoritettu 2005, joten tärinän kestävyysarvojen oletettiin koskevan hyväkuntoisen rakennuksen tasoa. Puristuspaalujen maksimikestävyyttä ei voitu korottaa mahdollista 20 % suuruutta teknisten ominaisuuksien vuoksi. (Kärki 2020.) Tärinä- ja

painumamittausten perusteella paalutuksesta syntyneet värinäarvot olivat maltillisia ja alhaisempia, mitä laskelmin voitiin ennakoida.

LÄHTEET

Hakulinen, Matti 2009. Rakentamisen aiheuttamat tärinät -tutkimushanke.

Tärinämittausraportit. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavilla <https://sgy.fi/wp-content/uploads/2017/04/taerinaemittausraportit.pdf>

Jääskeläinen, Raimo 2012 Pohjarakennuksen perusteet. Tampere: Tammertekniikka. Jyväskylä

Jones & Stokes 2004. Transportation- and Construction-Induced Vibration Guidance Manual. California Department of Transportation Noise, Vibration, and Hazardous Waste Management Office. Sacramento.

Kärki, Tuomas. Sipti Oy. Geotekninen suunnittelija. sähköposti- ja puhelinhaastattelu. 2021

Kärki, Tuomas 2021a. Sipti Oy:n geoteknistä suunnittelijaa haastatteli puhelimitse Petteri Nyroos 7.11.2021.

Kärki, Tuomas 2021b. Sipti Oy:n geoteknistä suunnittelijaa haastatteli sähköpostitse Petteri Nyroos 15.9.2021.

Lehtonen, Jouko 2006 Perustusten vahvistaminen – näkymätöntä korjaustyötä. Turku: Turun ammattikorkeakoulu.

Maanmittauslaitos: karttapaikka. Verkkopalvelu. <https://asiointi.maanmittauslaitos.fi/karttapaikka/> [Viitattu 05.10.2021]

RIL 254-2016. Paalutusohje 2016. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry.

RIL 253-2010. Rakentamisen aiheuttamat tärinät. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry.

Turun kaupunki 2021. Kauppatorin tarina. Viitattu 5.10.2021. <https://www.turku.fi/turun-uusi-kauppatori/uusi-kauppatori/kauppatorin-tarina>

Liite 1

Liite 1. Kaliforniassa toteutetun tutkimuksen toteamat tärinäsietoarvot rakenteille.

Structure and Condition	Maximum PPV (in/sec)	
	Transient Sources	Continuous/Frequent Intermittent Sources
Extremely fragile historic buildings, ruins, ancient monuments	0.12	0.08
Fragile buildings	0.2	0.1
Historic and some old buildings	0.5	0.25
Older residential structures	0.5	0.3
New residential structures	1.0	0.5
Modern industrial/commercial buildings	2.0	0.5