

Kasper Holopainen

Pudotustiivistys As Oy Molskotin pohjan- vahvistusmenetelmänä

Opinnäytetyö
Rakennustekniikka

2018



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Kasper Holopainen	Rakennusinsinööri (AMK)	Joulukuu 2018
Opinnäytetyön nimi		
Pudotustiivistys As Oy Molskotin pohjanvahvistusmenetelmä		49 sivua 3 liitesivua
Toimeksiantaja		
Skanska Infra Oy		
Ohjaaja		
Juha Karvonen		
Tiivistelmä		
<p>Opinnäytetyön aiheena oli tutkia pudotustiivistystä pohjanvahvistusmenetelmänä asuinkerrostalokohteessa. Työn tavoitteena oli hankkia tietoa menetelmästä sekä sen käytöstä tiiviisti rakennetussa ympäristössä. Sen tarkoituksena on jatkossa toimia Skanskan yhtenä tietolähteenä rakennuskohteissa, joissa pudotustiivistystä harkitaan käytettäväksi pohjarakennustyövaiheessa, esimerkiksi kohteen perusmaan ominaisuuksien perusteella. Työn taustalla on myös pudotustiivistyksen vähäinen käyttö asuinrakentamiskohteissa.</p> <p>Työssä on perehdytty maanrakennusalan ja geotekniikan kirjallisuuteen. Tietoa ja kokemuksia on kerätty suunnittelijoilta, urakoitsijoilta ja muilta alan asiantuntijoilta. Työssä on esitetty pudotustiivistys menetelmänä ja siihen käytettävää kalustoa. Työn teoriaosassa on käsitelty soveltuvuus erilaisiin maaperäolosuhteisiin, sekä edellytykset suunnittelulta ja laadunvalvonnalta.</p> <p>Opinnäytetyön yhteydessä toteutettiin pudotustiivistystyö kohteen As Oy Vantaan Molskotti esirakentamisvaiheessa. Työssä päästiin kokonaisuudessaan laatu- ja ym. tavoitteisiin. Kohteen rakentamisessa tuli hyvin esille lähtötietojen, myös pohjavesitietojen merkitys maakerrosten syvätiivistämiseen. Syvätiivistystyön yhteydessä kerrosten vesipitoisuus ja huokosvedenpaineiden kasvu voi edellyttää aikaa ja joustavuutta työsuunnitelmiin ja työjärjestyksiin.</p> <p>Pudotustiivistys on kohteen pohjarakennusvaiheena vaativa työ, eikä sitä ole mahdollista käyttää kaikissa maaperäolosuhteissa. Menetelmä edellyttää hyvät pohjatutkimuksen perusteella saatavat lähtötiedot, sekä kokeneen geosuunnittelijan tekemiä suunnitelmia. Pudotustiivistystyö on kohdekohtaisesti räätälöitävä jokaiseen rakennuskohteeseen erikseen, ottaen huomioon olosuhteet sekä käytettävä tiivistyskalusto. Menetelmä soveltuu käytettäväksi myös tiiviisti rakennetussa ympäristössä, kuten tyyppillisessä kerrostalokohteessa. Tällöin on otettava huomioon vaikutukset ympäristöön ja lähellä sijaitseviin rakenteisiin sekä rakennuksiin. Pudotustiivistyskohteissa laadunvalvontaa tulisi tehdä sekä kairauksin, että työn aikaisena tiivistettävien kerrosten kokoonpuristumisen seurantana.</p>		
Asiasanat		
pudotustiivistys, syvätiivistys, pohjanvahvistus		

Author (authors)	Degree	Time
Kasper Holopainen	Bachelor of Engineering	December 2018
Thesis title Dynamic compaction as a ground improvement method in a residential block As Oy Molskotti		49 pages 3 pages of appendices
Commissioned by Skanska Infra Oy		
Supervisor Juha Karvonen		
<p data-bbox="164 763 300 792">Abstract</p> <p data-bbox="164 835 1465 1088">The subject of the thesis was to investigate dynamic compaction as a ground improvement method in the residential block. The aim of the thesis was to acquire knowledge about the method and its use in a closely constructed environment. The purpose of the work is to act as a source of information for Skanska in the construction sites where dynamic compaction is considered as ground improvement method, for example, based on the properties of the soil. The work is also underpinned by the low use of dynamic compaction in residential construction projects.</p> <p data-bbox="164 1131 1465 1308">Literature was studied in the field of civil engineering and geotechnics. Information and experiments were collected from designers, contractors and other experts in the field. The thesis shows dynamic compaction as a method and the equipment used for it. The theoretical part of the thesis covers the suitability for different soil conditions, as well as the premises for planning and quality control.</p> <p data-bbox="164 1350 1465 1603">During the thesis project, dynamic compaction was carried out at the pre-construction phase of residential block As Oy Vantaa Molskotti. The whole set of objectives set for quality and other fields were achieved in the dynamic compaction work. The dynamic compaction of the work site was a good indicator of the importance of initial data, including groundwater data, for deep compaction of soil layers. During deep compaction, the water content of the soil layers and the increase in pore water pressure can take time and require flexibility in the work plans and in the rules of procedure.</p> <p data-bbox="164 1646 1465 2002">Dynamic compaction is a demanding work as a ground improvement method and cannot be used in all soil conditions. The method requires good soil investigation data, as well as plans made by experienced geo-designers. The implementation of dynamic compaction work has to be individually tailored to each construction site separately, taking into account the conditions and the compaction equipment used. The method is also suitable for use in a tightly constructed environment such as a typical residential block. However, it is necessary to take into account the impacts of compaction work on the environment and near structures and buildings. In projects where dynamic compaction is used, quality control should be performed both by drilling and as a follow-up to the compression of the layers to be compacted during work.</p>		
<p data-bbox="164 2022 320 2051">Keywords</p> <p data-bbox="164 2094 1038 2123">dynamic compaction, deep compaction, ground improvement</p>		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	SYVÄTIIVISTYS.....	7
2.1	Yleistä.....	7
2.2	Staattiset syvätiivistysmenetelmät.....	10
2.3	Dynaamiset syvätiivistysmenetelmät.....	12
3	PUDOTUSTIIVISTYS.....	13
3.1	Pudotustiivistyksen suunnittelu.....	14
3.2	Pudotustiivistyksen soveltuvuus.....	19
3.3	Pudotustiivistysmenetelmät.....	20
3.4	Pudotustiivistystyö.....	25
3.5	Pudotustiivistyksen laatuvaatimukset ja laadunvalvonta.....	27
3.6	Pudotustiivistyksen ympäristövaikutukset.....	29
4	ESIMERKKIKOHDE.....	30
4.1	Kohteen esittely.....	30
4.2	Pohjasuhteet.....	30
4.3	Vaihtoehtoinen perustamissuunnitelma.....	31
4.4	Pudotustiivistyksen toteutus.....	32
4.5	Pudotustiivistyskalusto.....	32
4.6	Pudotustiivistystyö.....	33
4.7	Laadunvarmistus.....	36
5	TULOKSET.....	39
6	POHDINTA.....	44
	LÄHTEET.....	48
	LIITTEET	

Liite 1. Pudotustiivistyspöytäkirja

Liite 2. Levykuormituskokeiden sijainnit

Liite 3. Kairauspisteiden sijainnit

1 JOHDANTO

Pudotustiivistys on syvätiivistysmenetelmä, jolla pyritään parantamaan yleensä löyhien luonnontilaisten kitkamaakerrosten kantavuusominaisuuksia. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on käsitellä pudotustiivistyksen käyttöä kerrostalotontin esirakentamisen pohjanvahvistuksen yhteydessä. Opinnäytetyön on tarkoitus toimia myös tietolähteenä mahdollisten tulevien kerrostalokohteiden pudotustiivistyksessä. Tarkoituksena on tutkia ja selvittää, miten pudotustiivistys sopii pohjanvahvistusmenetelmäksi kerrostalotontin esirakentamisvaiheessa. Pudotustiivistys on yleinen pohjanvahvistusmenetelmä infrarakentamisessa, mutta varsinkin Suomessa sen käyttö asuinrakentamisessa on harvinaista. Pudotustiivistys vaatii maaperältä tarkat ominaisuudet, jotta sen toteuttaminen on mahdollista.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa kerrotaan maaperän syvätiivistämisestä ja pudotustiivistyksen teoriasta, sekä tiivistysmenetelmistä. Teoriaosuus käsittelee myös pudotustiivistyksen soveltuvuutta eri maalajeille sekä pudotustiivistyksen suunnittelussa ja laadunvalvonnassa huomioitavia asioita. Teoriaosuuden pohjalta on tarkasteltu esimerkkikohteessa tehtyä pudotustiivistystyötä ja sen toteutumista. Pudotustiivistyksen käyttö pohjanvahvistuskeinona asuinrakentamisessa joudutaan suorittamaan yleensä tiheään rakennetulla alueella, joten työssä käsitellään myös pudotustiivistyksen vaikutuksia ympäristöön ja ympäröiviin rakennuksiin.

Työssä esitellään Skanska Talonrakennuksen rakentamaa kerrostalo As Oy Vantaan Molskottia, jossa tontin esirakentamisvaiheessa pudotustiivistystä käytettiin pohjanvahvistusmenetelmänä. Pudotustiivistyksen käyttö tiheään rakennetulla alueella ja ahtaalla tontilla vaatii hyvät pohjanvahvistussuunnitelmat, jotta tavoiteltu maaperän tiiveys saavutettaisiin. Tontin maaperä oli tarkoitus vahvistaa pudotustiivistyksellä niin tiiviiksi, että rakennus voitaisiin perustaa maanvaraisesti. Pudotustiivistys vaatii tontin vesitilanteen tarkkaa kartoitusta, ja tiivistystyön toteuttamisvaiheessa tontin vesiongelmia jouduttiin hoitamaan vielä tarkennetuilla suunnitelmilla.

Skanska on opinnäytetyön tilaaja, ja opinnäytetyön on tarkoitus toimia heille tietolähteenä sellaisissa tulevissa kohteissa, joissa pudotustiivistyksen käyttöä tontin pohjavahvistuksen yhteydessä voidaan harkita. Opinnäytetyötä varten saatiin lähtötietoina käyttöön Skanskalta kyseisen kohteen suunnitelmat ja laadunvalvontamateriaalit, kuten pohjatutkimuksia ja pudotustiivistyksen laadunvalvonta-aineistoa. Työssä on haastateltu pudotustiivistyksen toteuttaneen urakoitsijan M. Huhtakallio Oy:n toimitusjohtajaa ja pudotustiivistyksen suunnitteluun osallistunutta Skanska Infran johtavaa geoteknikkoa Tarmo Tarkiota, sekä Skanskan työnjohtajia kyseiseltä työmaalta.

2 SYVÄTIIVISTYS

2.1 Yleistä

Maan tiivistäminen tarkoittaa maa-aineksen huokoisuuden pienentämistä ja samalla irtotiheyden suurentamista mekaanisin keinoin /1, s.81/. Syvätiivistys voidaan jakaa kahteen alaluokkaan sen mukaan, onko käytettävä kuormitus staattinen vai dynaaminen. Syvätiivistyksellä tarkoitetaan löyhien kitkamaiden tiivistämistä, jonka tarkoitus on ulottua mahdollisimman syvälle maaperään. /2, s.191./ Staattisia menetelmiä ovat esikuormittaminen ja pystyjoitus. Syvätiivistäminen sopii hyvin löyhille kitkamaille ja louhetäytöille. Syvätiivistys on myös kustannustehokas vaihtoehto perustamismenetelmänä esimerkiksi paaluttamiseen verrattuna.

Maan tiiviys ja tiivistyminen

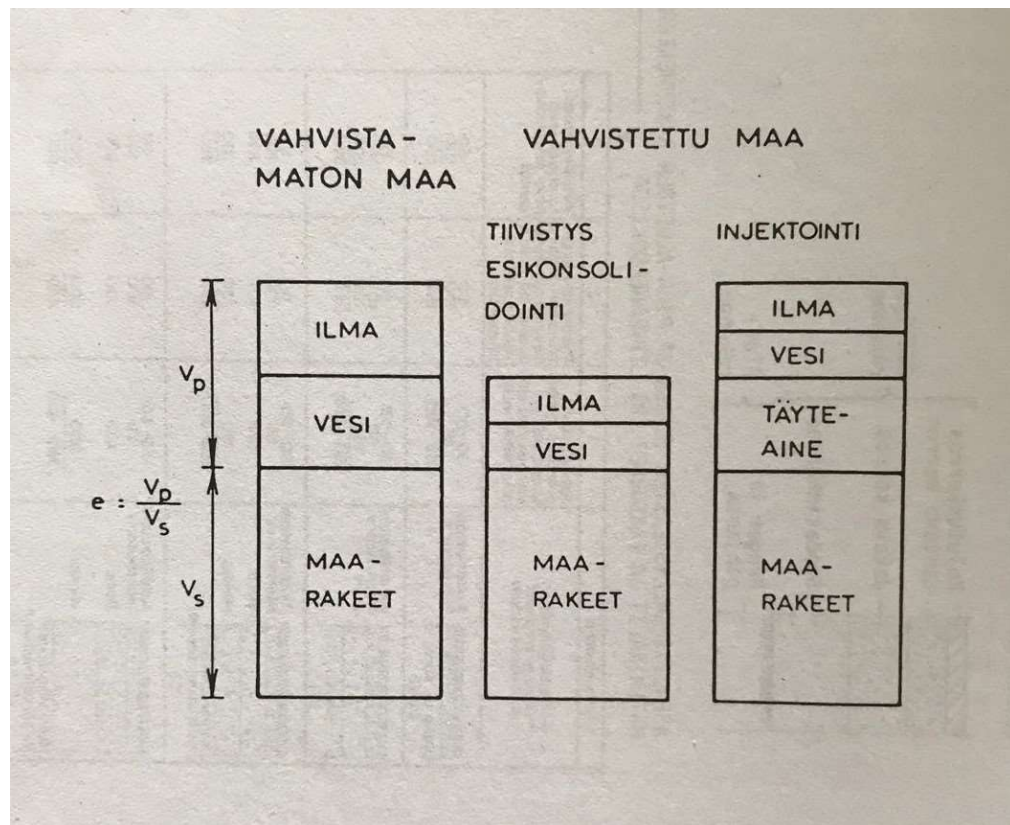
Maakerroksen tiiviyden avulla voidaan määritellä varsinkin karkearakeisten maakerrosten ja moreenimaakerrosten lujuus- ja kantavuusominaisuuksia. Maan kantavuus on ratkaiseva tekijä maaperän soveltuvuudesta perustamiseen. Tämän takia voidaan sanoa, että maan tiiviys on tärkeä käsite kaikessa maa- ja pohjarakentamisessa. Myös pohjatutkimuksissa saatavat kairausvastustulokset kertovat yleensä juuri maan tiiveydestä. Karkearakeisten ja moreenimaalajien tiiveydestä puhutaan yleensä käyttämällä ilmaisuja löyhä, keskitiivis ja tiivis. Nämä ilmaisut ovat kuitenkin vain suuruusluokkaa antavia. Tarkemmin maan tiiviyttä voidaan kuvata ja mitata monilla eri suureilla, kuten tilavuuspainolla, irtotiheydellä, huokosluvulla, huokoisuudella, suhteellisella tiiveydellä ja tiiveysasteella. /3, s. 82./

Maaperän tiivistymiseen vaikuttaa maalajin rakeisuus, vesipitoisuus sekä tiivistämisessä käytettävä kalusto ja tiivistämisen työmäärä. Maan vesipitoisuus on tiivistystyössä erittäin tärkeä asia. Maan paras tiiveysaste saavutetaan, kun maa-aineksen kosteus on lähellä sen optimivesipitoisuutta. /1, s. 81./

Huokoisuus ja huokosluku

Maapohjan vahvistaminen saattaa olla tarpeellista, kun maan huokostilavuuden osuus on liian suuri, eli maan huokosluku e on suhteellisen suuri /2/.

Maaperä koostuu maarakeista ja niiden välissä olevasta vedestä ja ilmasta, mikä on huokostilassa. Maapohjan vahvistamisessa maarakeet itsessään eivät tarvitse vahvistamista, vaan tarkoituksena on pienentää maan huokostilavuutta. Maan huokostilavuutta voi pienentää maata tiivistämällä, tai vaihtoehtoisesti maan rakennetta lujitetaan sopivalla huokostilan täyttöaineella (kuva 1). Maan tiivistämisessä maan sisäinen kitkakulma ja kokoonpuristuvuusmoduuli suurenevat, mikä johtaa maan kantavuuden parantumiseen sekä painumien pienentymiseen. /2, s. 190–191./



Kuva 1. Pohjanvahvistuksen vaikutus maan koostumukseen. /2, s. 190/

Maan huokosluvun voi laskea kuvan 1 kaavalla $e = \frac{V_p}{V_s}$. Huokosluku saadaan, kun jaetaan huokosilman ja -veden tilavuus maarakeiden tilavuudella. Huokosluku kuvaa siis näiden kahden maaperän tilavuuden suhdetta. Huokoisuuden n , voi laskea kaavalla $n = \frac{V_p}{V}$, missä huokoisen maan tilavuutta verrataan koko maanäytteen tilavuuteen. /4, s. 48–49./

Suhteellinen tiiviys ja tiiviysaste

Maa aines voi esiintyä luonnollisessa tilassa yhtä tiiviiksi pakkautuneena kuin se rakennustyössä voidaan tiivistää, tai myös niin löyhänä kuin se vain pysyy koossa. Käytännössä aina luonnontilaisen maan tiiviys on näiden rajatapaus-ten välissä. Mitä tiiviimpää maaperä on, sitä paremmat ovat sen lujuusominaisuudet, ja sitä pienempiä ovat myös tulevat painumat. Löyhän maaperän ominaisuudet ovat huonot ja rakentamisen seurauksena kuormituksen kasvaessa painumat ovat suuria. Ennen rakentamista pyritään selvittämään nämä maaperän tiiviydet pohjatutkimuksin. /4, s. 51./

Maan suhteellisen tiiveyden voi laskea kaavalla 1 /21, s. 52/.

$$D_r = \frac{e_{max} - e_L}{e_{max} - e_{min}} \quad (1)$$

jossa	D_r	maaperän suhteellinen tiiveys
	e_{max}	huokosluvun maksimiarvo (eli kun maa-aines on löyhimmillään)
	e_{min}	huokosluvun minimiarvo (kun maa on tiiveimmillään)
	e_L	huokosluvun arvo luonnossa

Maan tiivistäminen

Maaperän tiivistämisellä tarkoitetaan maa-aineksen huokoisuuden pienentämistä sekä irtotiheyden suurentamista mekaanisesti. Tiivistyminen tapahtuu, kun mekaanisella kuormituksella kumotaan maa-aineksessa olevien hiukkasten välisiä voimia (kitka tai koheesio) ja saadaan hiukkaset lähemmäksi toisi-aan. Samalla huokostilassa oleva vesi poistuu materiaalista pohjavedenpin- nan alla. /1, s. 81./

Maa-aineksen tiivistäminen parantaa maan leikkauslujuutta, vähentää painumia, parantaa maan kantavuutta, pienentää vedenläpäisevyyttä ja lisää maaperän säänkestävyyttä. Maan huono tiiveys merkitsee huonoa kantokykyä ja sitä kautta aiheuttaa muodonmuutoksia. Paras mahdollinen maan tiiviysaste saavutetaan, kun tiivistystyö suoritetaan sellaisissa olosuhteissa, että maan vesipitoisuus on lähellä optimivesipitoisuutta. /1, s. 81./

Tiivistäminen pyrkii parantamaan maaperän ominaisuuksia, eli vahvistamaan sitä, joten voidaan puhua myös maaperän vahvistamisesta. Rantamäki ja Tamminne (1979) summaavat: *Geotekniikassa pohjanvahvistuksella tarkoitetaan maakerrosten geoteknisten ominaisuuksien parantamistoimenpiteitä.* Pohjanvahvistuksella pyritään ehkäisemään ja pienentämään maan painumia, sekä lisäämään maaperän kantokykyä. /2, s. 190./

2.2 Staattiset syvätiivistysmenetelmät

Syvätiivistys on joko staattista tai dynaamista maan kuormittamista sen tiivistämiseksi. Staattinen syvätiivistys on pitkäaikaista ja dynaaminen taas nopeaa, iskujen, tärinän tai värähtelyn aiheuttamaa maan tiivistymistä. /5, s. 142./

Maan staattinen tiivistäminen on sitä, että maaperään luodaan pysyvä, muuttumaton tila, mikä saa aikaan maan tiivistymistä. Esikuormituspenker on hyvä esimerkki staattisesta syvätiivistyksestä. Staattisessa syvätiivistyksessä maan kuormitus pysyy samana, ja lisäkuorma ajan myötä tiivistää maata sekä vähentää rakentamisen aikaisia painumia. Staattisessa syvätiivistyksessä tiivistävä vaikutus perustuu jonkin tietyn kuorman aiheuttamaan pystysuoraan joustamattomaan puristukseen eli paineeseen. /1, s.85./

Esikuormitus tai esikondolisointi

Esikuormituksessa tehdään tiivistettävän maan päälle painopenger. Esikuormitusta käytetään etenkin koheesiomaiden tiivistämisessä ja painumien pienentämisessä. Penkereen massan tulisi olla suurempi kuin lopullisten rakenteiden massa. Esikuormituspenkereillä voidaan pienentää käyttövaiheen aikaisia painumia. Maata siis kuormitetaan isommalla kuormalla kuin mikä valmiin

rakenteen aiheuttama kuorma tulee olemaan. Esikuormituksen yhteydessä maan painumia ja tiivistymistä mitataan huokosvedenpainemittauksin sekä painumamittarein, jotta voidaan nähdä, kuinka maan painuminen on toteutunut verrattuna laskennalliseen painumaan. /6, s. 21./

Koheesiomailla, eli savi- siltti- ja liejupitoisilla maalajeilla huokostilassa oleva vesi ei pakene maa-aineksesta äkillisillä iskuilla, tärinällä tai värähtelyllä. Koheesiomaiden tiivistämiseksi tulee maa-ainekseen aiheuttaa pysyvä jännitystila. Tämän jännitystilan alaisena maassa oleva kiviaines antaa periksi, jonka seurauksena huokosvedenpaine nousee ja puristaa eli poistaa vettä maaperästä. Tiivistyminen loppuu, kun kiviainesrunko on tiivistynyt ja vettä on poistunut maa-aineksesta riittävästi, jolloin maakerros on saavuttanut uuden kuormituksen edellyttämän tasapainotilan eli konsolidaatiotilan. Tällöin maa pystyy kantamaan sen päällä olevan kuorman. Erittäin hienohiekkaisissa ja silttisissä eli hienorakeisissa maalajeissa tämä ilmiö voi tapahtua nopeasti, mutta savikoilla ilman muita toimenpiteitä on tiivistyminen huomattavasti hitaampaa. Suunnittelija joutuu yleensä arvioimaan, onko maan tarvittava kokoon puristuma saavutettavissa järkevän ajan puitteissa muuhun rakennusprojektin aikatauluun nähden. /7, s. 207–208./

Pystyöjitus

Pystyöjituksen tarkoituksena on pehmeiden maakerrosten tulevan kuormitusta vastaavan kondolisaatiotilan nopeuttaminen. Pystyöjitusta käytetään usein esikuormituspenkkojen kanssa, sillä se tehostaa maan painumista. Pystyöjituksen toiminta perustuu siihen, että huokosvesi pääsee virtaamaan pystysalaojissa helpommin kuin luonnontilaisessa maapohjassa. Pystyöjia voidaan käyttää myös huokosvedenpaineen hallitsemiseen maaperässä, ja vakaavuuden parantamiseen maaluiskissa ja penkereiden alla. /8, s. 9–10./

Pystyöjitusta käytetään yhdessä esikuormituksen kanssa varsinkin paksuilla savikoilla, joiden tarvittava esikuormitusaika ilman pystyöjia muodostuu kohtuuttoman pitkäksi. Ennen pystyöjat tehtiin hyvin vettä läpäisevästä maa-aineksesta kuten hiekasta, mutta nykyään on siirrytty nauhapystyöjituksen käyttöön. Siinä suodatinkankaisen kuoren sisälle asennetaan muotoiltu profiili, jossa vesi pääsee virtaamaan. /7, s.208./

2.3 Dynaamiset syvätiivistysmenetelmät

Dynaamisessa syvätiivistyksessä periaate on, että toistetaan samanlaista yhtä voimakasta liikettä useita kertoja suunnitelmassa määrätyille kohdille, suunnitelmien määrittämän tiivistysohjeen verran. Dynaamisessa syvätiivistyksessä maan kuormitus siis muuttuu jatkuvasti, mikä saa maassa aikaan tiivistymistä. Dynaamisessa tiivistyksessä luodaan maahan koneen oman painon lisäksi yleensä lähes pystysuora dynaaminen värinä, värähtely tai isku. Niistä syntyvä liike-energia aiheuttaa maarakeiden välisten normaalivoimien ja kitkan piene-
nemistä, jolloin rakeet asettuvat tiiviimpään tilaan. /1, s. 90–91./

Pudotustiivistys

Pudotustiivistys on mekaanisen iskuenergian käyttöön perustuva syvätiivistysmenetelmä. Pudotustiivistyksessä kone nostaa 8–30 tonnin järkäleen halutulle korkeudelle, mistä se tiputetaan maahan. Järkäle aiheuttaa maaperään isku-aaltoja, jotka saavat maapartikkelit järjestäytymään uudestaan tiiviimpään tilaan, ja poistaa samalla maaperän huokosvettä. Pudotustiivistyksen vaikutus voi ulottua jopa 30 metrin syvyyteen. /2, s. 193./

Vibrotiivistys tai täryhuuhtelu

Vibrotiivistys tai täryhuuhtelu on maaperän tiivistämistä sauvatäryttimellä, mikä upotetaan maahan sauvan oman painon, tärytyksen sekä veden- tai ilmanpaineen avulla. Tiivistyslaite on 2–4 metrin pituinen teräsputki, jonka halkaisija on noin 30–40 cm. Putken sisällä on sähkö- tai hydraulimoottori, mikä pyörittää epäkeskosylinteriä aiheuttaen värinän. /2, s. 191–192./

Menetelmä sopii parhaiten paksujen hiekka- ja sorakerrosten tiivistämiseen. Vibrotiivistyksen syvyysvaikutus on merkittävä, sillä sen vaikutus ulottuu jopa yli 30 metrin syvyyteen, ja nykytekniikalla menetelmän tiivistysvaikutus voi ulottua jopa 50 metrin syvyyteen. Suomessa sen käyttö ei ole kuitenkaan yleistä. Menetelmää kutsutaan myös täryhuuhteluksi, sillä tiivistämistyö tapahtuu voimakkaalla täryttävällä sauvalla. Kitkamaalajeissa tiivistämisen yhteydessä käytetään yleensä myös vesihuuhtelua. /5, s. 149–150./

Kitkamaalajien täryhuuhtelua kutsutaan tärytiivistykseksi ja koheesiomaalajeissa tärytäksi. Tärytys ja huuhtelu erottelevat maarakeita niin, että karkea maa-aines vajoaa alaspäin, tiivistyksen huuhtelu- ja tärytysreiän sekä sitä ympäröivän maan väliin täytteeksi. Hienojakoinen maa-aines taas kohoaa huuhteluveden mukana maanpinnalle. /2, s. 192./

Tärytässä tehdään kivi- tai sorapilareita maahan, ja kivipilarimenetelmä on yksi täryhuuhtelun tunnettu menetelmä. Menetelmässä on ideana syrjäyttää maata samankaltaisella tärytyslaualla kuin vibrotiivistyksessä, mutta vettä ei käytetä apuna. Kun haluttu tiivistysvyvyys on saavutettu, lähdetään tärytintä nostamaan hitaasti takaisin ylöspäin, ja samalla maahan tärytettyä tyhjiötä täytetään karkealla kiviaineksella paineilman avulla. Kiviaines pakkautuu paineilman ansiosta ja muodostaa tiiviin kivipilarin maahan. /5, s. 150./

Tiivistyspaalutus

Tiivistyspaalutuksessa maahan lyödään kartionmuotoisia paaluja, jotka syrjäyttävät niiden ympärillä olevaa maata aiheuttaen maa-aineksen tiivistymisen. Päinvastoin kuin normaalissa paalutuksessa, tässä menetelmässä paalu kuitenkin nostetaan ylös paalutuksen jälkeen, ja maahan jäänyt kuoppa täytetään murskeella tai muulla karkeajakoisella maa-aineksella ja tiivistetään. Tiivistyspaalut voivat olla jopa 6 metrin pituisia. Laadunvarmistus tiivistyspaalutuksessa hoidetaan yleensä työtä ennen ja sen jälkeen suoritettavilla kairauksilla. Tiivistyspaalutus sopii parhaiten paksujen ja löyhien kitkamaiden tiivistämiseen, ja se on myös melko yleinen menetelmä Suomessa. /2, s. 194–195./

3 PUDOTUSTIIVISTYS

Pudotustiivistys on mekaaniseen iskuenergiaan perustuva pohjanvahvistustapa, jota yleensä käytetään paksujen maakerrosten tiivistämiseen. Pudotustiivistyksessä käytetään järkälettä, mikä tiputetaan halutulta korkeudelta maahan, jolloin järkäle aiheuttaa maassa etenevän puristusaallon ja leikkausaallon, jotka ovat maan tiivistymisen kannalta merkittäviä. Puristusaalto saa aikaan maa-aineksen huokosvedenpaineen nousun sekä liikuttaa maapartikkeleita heikentäen hetkellisesti maan leikkauslujuutta. Leikkausaalto saa aikaan

hetkellisesti heikentynyttä maan leikkauslujuutta suuremman leikkausjännityksen maaraakeiden välille, ja tämä johtaa rakeiden uudelleen järjestäytymiseen, jolloin rakeet pyrkivät pienempään tilaan mahdollisimman lähelle toisiaan eli maa tiivistyy. Pudotustiivistysmenetelmä on kehitetty Ranskassa 1960-luvulla. Suomessa sitä on käytetty 1980-luvulta lähtien. /5, s. 142./

Pudotustiivistyksellä pyritään parantamaan olemassa olevan maan geoteknisiä ominaisuuksia, ja näin parantamaan maan kantokykyä, sekä leikkauslujuutta. Pudotustiivistys kasvattaa maan leikkauslujuutta sekä pienentää maan huokostilavuutta, vedenläpäisevyyttä ja kokoonpuristuvuutta. /5, s. 142./ Pudotustiivistyksen voidaan katsoa olevan yksi syvätiivistyksen alalaji.

3.1 Pudotustiivistyksen suunnittelu

Suunnittelun lähtökohtia ovat mm. minkälaista maaperää tiivistetään ja miten paksuja kerroksia. Myös maaperän halutut vaatimukset, eli millainen maaperän pitää lopputuloksena olla esim. kantokyky, pohjapaine, leikkauslujuus yms. Maan ominaisuudet tulee selvittää, jotta tiedetään, onko pudotustiivistys soveltuva pohjanvahvistustapa kyseisille maakerroksille. Jos pudotustiivistystä harkitaan, on syytä ottaa mahdollisesti lisää pohjatutkimuksia, jotta tiivistämisen suunnittelu olisi kohdistetumpaa ja tarkempaa. Pudotustiivistyksen toteutus ja suunnittelun lähtökohdat riippuvat paljon siitä, onko kyseessä kitka- vai koheesiomaa. /9, s. 16–18./

Pudotustiivistystä varten pitää tehdä aina kohdekohtainen tiivistyssuunnitelma. Ensimmäisellä lyöntikierroksella lyöntejä tehdään samaan pisteeseen 2–5 kpl. Pudotuskierroksia tehdään yleensä 2–4 kpl. Työkierrosten välillä pidetään tarvittaessa pudotustiivistyssuunnitelman mukaisia taukoja, joiden pituus vaihtelee tiivistettävän maalajin mukaan muutamasta tunnista viikkoon. Taukoja pidetään, jotta maaperän huokosvedenpaine pääsee vapautumaan ennen seuraavaa lyöntikierrosta. Taukojen pituus pitää huomioida tiivistystyön ja muun työmaan aikataulussa. /2, s. 193./

Pudotustiivistystä suunniteltaessa on otettava huomioon monia asioita. Tavoiteltava työmäärä eli tiivistysenergian tarve, tiivistettävien maakerrosten laatu ja kerrospaksuudet, jotka vaikuttavat pudotusruudukon kokoon ja siihen onko

tiivistys 1 vai 2 vaiheinen. Suunnittelun yksi lähtökohdista on tiivistyksen syvyysvaikutus, johon voidaan vaikuttaa käytettävällä kalustolla, järkäleen painolla ja järkäleen pudotuskorkeudella. Pohjatutkimuksien perusteella on myös hyvä selvittää, onko tiivistettävällä tontilla sellaisia hienoaineksesta koostuvia maakerroksia, jotka vaativat suuremman odotusajan pudotuskierrosten välillä huokosvedenpaineen vapautumiseksi kuin karkearakeiset maalajit. /5, s. 148./

Suunnitteluvaiheessa tulee myös huomioida pudotustiivistettävän alueen ympäristöä riippuen siitä, työskennelläänkö rakennetulla vai rakentamattomalla alueella. Rakennetulla alueella työskentely vaatii ympäröivien rakenteiden huomioon ottamista ja tarpeeksi suuria etäisyyksiä rakennuksiin, katurakenteisiin, kunnallistekniikkaan ym. Ympäristöön leviävää tärinää pyritään ehkäisemään riittäväillä varoetäisyyksillä ja sitä seurataan jatkuvilla tärinämittauksilla. /5, s. 148./

Pudotustiivistyksen suunnittelija määrittelee pudotustiivistyssuunnitelmaan pudotustiivistyksen työtavan, järkäleen massan sekä pudotuskorkeuden, josta voidaan laskea myös tiivistysenergian määrä. Syvyysvaikutus tulee tarkastella ja määrittää pohjatutkimusten perusteella. Suunnitelmaan määritellään myös pudotusruudukon koko, pudotuskierrokset ja pudotuskierrosten määrä. Laadunvalvontana kairaukset on hyvä suorittaa etu- ja jälkikäteen, jotta nähdään pudotustiivistyksen vaikutukset kattavasti. Myös levykuormituskokeita suositellaan ottamaan ennen tiivistystä sekä sen jälkeen. /9, s. 22–23./

Suunnittelijan tulee määritellä myös työssä käytettävä tiivistystyöalusta, sekä sen materiaali ja paksuus. Oikeanlainen tiivistysalusta edesauttaa tiivistettävän maaperän tiivistymistä, sillä tällöin tiivistysvaikutus suuntautuu alaspäin. Työturvallisuuden näkökulmasta työalustan tulee olla myös sellainen, että se kantaa raskaat työkoneet ongelmitta. Työalustaa voidaan käyttää myös rakennekerroksena pudotustiivistyksen päätyttyä, joten hyvä työalustan tekeminen ei tuo välttämättä pohjarakentamiseen lisää kustannuksia, sillä kantavat rakennekerrokset tulisi kuitenkin tehdä ennen varsinaisten rakennustöiden aloittamista. Suunnittelussa tulee ottaa myös huomioon, mitä maanpinnalle tehdään pudotustiivistyksen jälkeen, mm. kuoppien täyttö, tasaus ja tiivistys. /9, s. 22–23./

Isoissa kohteissa tulee harkita mahdollisen koetiivistyksen tarpeellisuutta, jos on epäselvää, sopiiko menetelmä tiettyyn paikkaan tai tietylle maalajille. Koetiivistys vaatii myös oman koetiivistyssuunnitelman. /5, s. 148./

Tiivistymisestä aiheutuvat massamenekit tulee ottaa myös huomioon. Jos tiivistettävä kenttä on esimerkiksi hehtaarin kokoinen, vaatii 0,2 metrin tiivistymisen 2000 m³ lisämassojen tarpeen. /5, s. 148./

Pudotustiivistystyön aikataulua suunniteltaessa tulee arvioida kaluston päivittäinen työsaavutus ja siitä saatava kokonaisaika työmaan aikataulua ja urakalaskentaa varten, huomioiden pudotuskierrosten välillä mahdollisesti tarvittavat tauot. /5, s. 148./

Viljanen ja Korhonen (2002) ovat tulleet siihen päätelmään Roesselin ja Kauselin (1994) tutkimuksen perusteella, että pudotustiivistystä suunniteltaessa tiivistysenergian kannalta olisi tärkeämpää kasvattaa pudotusjärkäleen massaa kuin pudotuskorkeutta. Tämä johtuu siitä, että pudotuskorkeus vaikuttaa iskuaallon nopeuteen sekä amplitudiin, kun taas järkäleen massalla voidaan vaikuttaa iskuaallon vaimennukseen sekä järkäleen kosketusaikaan. /10, s. 46./ Pudotusjärkäleen massan lisääminen ei hidasta työn suoritusta niin paljon kuin pudotuskorkeuden lisääminen. Myös työturvallisuuden ja osuman tarkkuuden kannalta järkäleen massan lisääminen on parempi vaihtoehto kuin pudotuskorkeuden lisääminen.

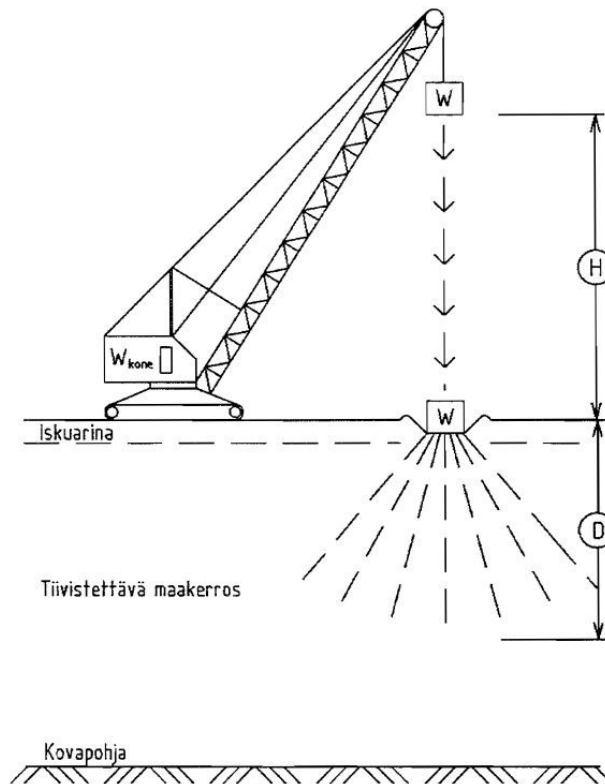
Syvyysvaikutus

Pudotustiivistyksen syvyysvaikutus ulottuu 10–30m syvyyteen, ja se on lasketavissa Lukasin kaavalla (kuva 2) /2, s. 193–194/.

Pudotustiivistyksen syvyysvaikutus saadaan Lukasin kaavalla (kaava 2).

$$D_{max} = k\sqrt{WH} \quad (2)$$

jossa	D_{max}	syvyysvaikutus	[m]
	W	pudotusjärkeleen paino	[m]
	H	pudotuskorkeus	[m]
	k	0,35–1,0 (maalajista riippuva kerroin)	[m]



Kuva 2. Pudotustiivistyksen syvyysvaikutus. /10/

Kertoimen k arvo on sitä suurempi, mitä karkeampaa eli pudotustiivistykseen sopivampaa maalaji on. Kertoimen arvoon vaikuttavat myös järkäleen kosketuspaine, eli voima / pinta-ala, sekä nostokoneen pudotusmekanismin hyötysuhde, mikä on vaijerilaitteella noin 80 %. Myös työalustana toimivan maakerroksen ominaisuudet vaikuttavat k -arvoon. /5, s. 143./

Vuola (1996) on esittänyt lisensiaattityössään vaihtoehdoisen laskukaavan pudotustiivistyksen syvyysvaikutukselle, jossa alkuperäisen kaavan k -kerroin korvataan tarkemmilla parametreilla, jotka perustuvat tiivistettävän maaperän,

tiivistysalustan ja pohjamaan tai -kallion ominaisuuksiin. Kaava on muuten samanlainen kuin Lukasin kaava, mutta siinä k-kerroin on korvattu f_C -, f_M - ja f_B -kertoimilla. Täällä kaavalla syvyysvaikutus on laskettavissa tarkemmin, mikäli esimerkiksi tiivistettävän maakerroksen alla on kalliota, tai tiivistettävien maakerrosten ominaisuudet poikkeavat paljon toisistaan. /11, s. 48–49./

Vaadittava kokonaisenergiamäärä

Pudotustiivistykseen vaadittava kokonaisenergian määrä riippuu tiivistettävän maakerroksen paksuudesta ja maalajien ominaisuuksista. Vaadittava kokonaisenergiamäärä ilmoitetaan aina yhden pudotusruudukon ruudun pinta-alaa kohden. Kaavasta saadaan siis yhteen pudotusruudukkoon tehtävien pudotusten yhteenlaskettu energiamäärä, mikä jaetaan ruudukon pinta-alalla. Tiivistysenergian tarpeen voi laskea kaavalla 3. /10, s.46./

$$E_{VK} = \frac{NWH}{A} \quad (3)$$

jossa	E_{VK}	vaadittu kokonaisenergiamäärä neliötä kohden	[kJ/m ²]
	N	pudotusten määrä per piste	
	H	pudotuskorkeus	[m]
	W	järkäleen massa	[kN]
	A	pudotusruudukon pinta-ala	[m ²]

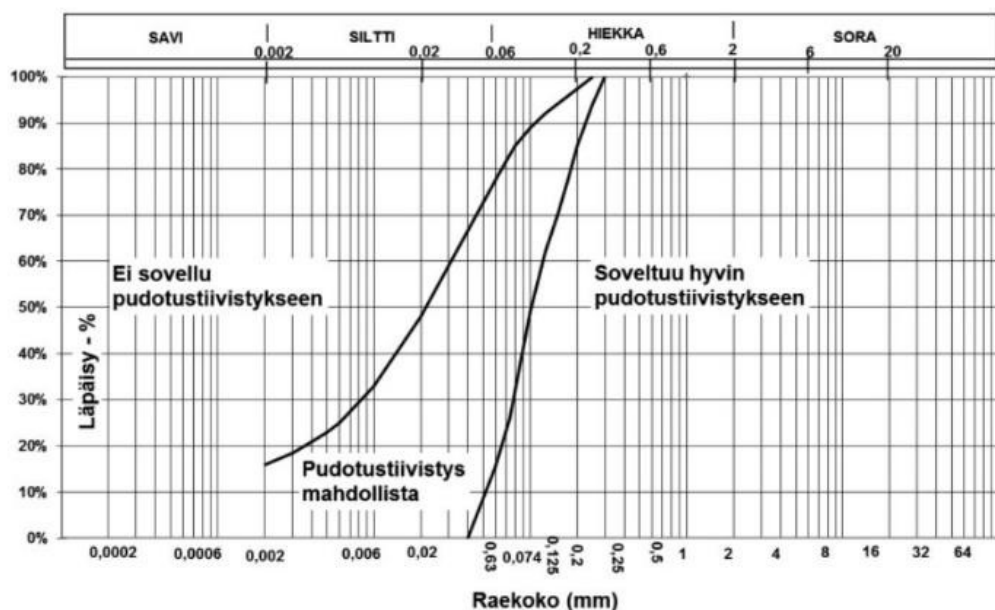
Pudotusjärkäleen pohjapaine

Pudotusjärkäleen suositeltava pohjan kosketuspaine on 50–75 kN/m². Jos kosketuspaine on liian suuri, järkäle voi upota liian syväälle maaperään, jolloin myös tiivistysteho laskee. Lieriömäisen järkäleen halkaisija on yleensä 1,5–2,5m. Järkäleen massa voi vaihdella 10 tonnista aina 25 tonniin asti. Pudotuskorkeudet ovat normaalisti 10–20 metriä. Tiivistysenergia saadaan kaavasta $E = mgh$, ja yleensä tavallisimmat energiamäärät tiivistystyössä ovat 1–5 MJ. /5, s. 143./

3.2 Pudotustiivistyksen soveltuvuus

Pudotustiivistys sopii hyvin löyhille kitkamaille, erityisesti karkeille maalajeille, kuten louhe, sora, ja muut rakeisuudeltaan vastaavat sekalaiset kiviainesperäiset maalajit, joiden vedenläpäisevyys on riittävän suuri vapauttamaan tiivistysimpulssin synnyttämän huokosveden ylipaineen ennen seuraavaa pudotusta. Pudotustiivistyksen sopivuuteen vaikuttaa maan rakeisuus, vesipitoisuus, vedenläpäisevyys sekä pohjavesiolosuhteet. /2, s. 191./

Menetelmää voidaan soveltaa myös hienorakeisissa maalajeissa, jos maakerroksissa huokosveden vapautumismatka karkeisiin maalajikerroksiin on lyhyt, eli jos hienorakeinen maalajikerros ei ole paksu, tai toisaalta pudotusten välissä on aikaa käytettävissä niin paljon, että huokosvedenpaine ehtii tasaantua. Tätä tiivistystapaa kutsutaan dynaamiseksi konsolidoinniksi, eli kitkamalajeissa puhutaan iskutiivistyksestä ja hienorakeisten maalajien pudotustiivistystä kutsutaan dynaamiseksi konsolidoinniksi. Tiivistyminen on dynaamista konsolidaatiota silloin, kun dynaamisen kuormitusvaikutuksen lakattua maan huokosvedenpaine on veden hydrostaattisen paineen arvoa suurempi. Kitka- ja maalajien iskutiivistyksessä dynaamisen vaikutuksen lakattua huokosvedenpaine on likimain veden hydrostaattisen paineen suuruinen. /2, s. 191–194./ Hienorakenteisissa maalajeissa tiivistymistä voidaan myös tehostaa pystysuuntaisilla alaojituksilla, jotta ylimääräinen huokosvesi pääsee pois tiivistettävistä maakerroksista /5, s.142–143/.



Kuva 3. Pudotustiivistyksen soveltuvuus maan raekoon mukaan. /5, s. 143/

Pohjanvahvistusmenetelmänä pudotustiivistystä käytetään alueellisessa esirakentamisessa (esim. Jätkäsaari) ja myös yksittäisissä kohteissa, joita ovat esimerkiksi rakennukset, sillat, tukimuurit, laiturirakenteet, rautatiet, kadut, putki- johdot, kentät yms. /5, s. 142–143/.

Pudotustiivistyksen käyttö ei sovellu kohteeseen, jossa maaperä on koostumukseltaan epäkurantti, sisältäen suuria kiviä, betoninpaloja, tiiliä, metallia tai muuta jätettä mikä estää maamassojen riittävän tiivistymisen. Jos tontilla on vanhoja perustuksia, tulee ne purkaa kokonaan tai hajottaa sopivan pieniksi paloiksi. Myös turvekerrokset voivat estää pudotustiivistyksen käytön, tai ne pitää ainakin poistaa ennen pudotustiivistystyötä. Jos tiivistettävä alue on vanhaa täytemaata, mikä sisältää paljon orgaanista ainetta, kuten vanhoilla kaato- paikoilla, voi pudotustiivistys olla huono vaihtoehto, sillä pudotustiivistys voi aiheuttaa kaasujen syntymistä. /9, s. 16–17./

3.3 Pudotustiivistysmenetelmät

Pudotustiivistyksen voi toteuttaa kolmella eri menetelmällä. Vapaasti pudotettavan järkäleen toteutuksen voi jakaa vielä kahteen eri alaluokkaa. Suomessa näistä menetelmistä käytetään perinteisesti vain vapaasti pudotettavaa järkälettä, sekä Huhtakallion kehrittelemää putkitornia, jonka sisällä järkäle pudote- taan. RIC-menetelmän käyttö ei ole tuttua vielä Suomessa, mutta sen käyttöä pudotustiivistysmenetelmäksi Suomessa olisi syytä tutkia.

Vapaasti pudotettava järkäle

Vapaasti pudotettava järkäle on perinteisen pudotustiivistyksen toteutusmenetelmä. Menetelmässä nostetaan painava järkäle tai paino ilmaan sovitulle korkeudelle, josta se tiputetaan vapaapudotuksena maan pintaan. Tässä työmenetelmässä käytetään yleensä raskaita tela-alustaisia ristikkopuominostureita, jotka pudottavat yleensä jopa yli 15 tonnin painoa 20 metrin korkeudelta. Mitä enemmän halutaan käyttää tiivistysenergiaa, sitä enemmän se vaatii työko- neilta, sillä pudotuskorkeudet ja järkäleen painot nousevat aina suhteessa käytettävään tiivistysenergiaan. Tämän takia pudotustyön suunnittelijan on

syytä määritellä optimoitu tiivistysenergian tarve, jotta energiaa ei käytetä liikaa. Useimmissa kohteissa käytetään kuitenkin 8–10 tonnin pudotuspainoa noin 10–15 metrin korkeudelta, joten tarvittava nosturi on myös pienempi, mikä on luonnollisesti kustannuksiltaan edullisempaa. /9, s. 19./

Vapaasti pudotettavassa järkäleessä, järkäleet eli pudotuspainot ovat yleensä karkaistua terästä tai teräslevyjä, jotka ovat pultattu tiukasti toisiinsa kiinni (kuva 3). Pudotuspainot ovat yleensä pyöreitä sylinterin muotoisia kappaleita, mutta muitakin muotoja ja materiaaleja voidaan käyttää. Karkaistua terästä on kuitenkin käyttöiltään ja kestävyydeltään yleensä paras ja kustannustehokain vaihtoehto. /9, s. 19./



Kuva 4. Pudotustiivistystä Jätkäsaaren liikuntapuiston esirakentamisvaiheessa. /12/

Menetelmän käyttö vaatii tarkat turvallisuustoimenpiteet. Nostureiden, köysien, ketjujen ja nostolenkkien kunto on todennettava tarkastuksilla, ja niiden tulee olla sertifioituja. Työkoneiden kuljettajien tulee olla työtehtävään koulutettuja ja kokeneita. Suunnittelussa pitää ottaa huomioon pudotustiivistyksen aiheuttamat vaaratekijät, ja toimenpiteet niiden ehkäisemiseksi. Turvallisuustoimenpiteistä tulee tiedottaa kaikkia, jotka työskentelevät pudotustiivistyskaluston lähetyksillä. /9, s. 19./

Pudotustiivistykseen on kehitelty myös koneita, joissa vapaa paino pudotetaan halutulta korkeudelta kahden ”ohjaimen” välissä. Englanninkielellä menetelmä tunnetaan nimellä: *Guided free fall dynamic compaction*. Myös pudotuspainot

poikkeavat normaalista pudotustiivistyksestä niin, että ne ovat muodoltaan suippokärkisiä kartioita, ikään kuin tiivistyspaalutuksessa käytettävät paalut, joissa terävämpi osa osuu maahan ensin. Syvemmälle ulottuvassa tiivistyksessä käytettävä pudotuspaino on vain yksi teräväpäinen kartio, mutta pinta- maakerroksia tiivistäessä käytetään yleensä pinta-alaltaan suurempaa painoa, jossa on useita pienempiä kartioita (kuva 5). Menetelmän hyötynä on parempi pudotustarkkuus, sekä mahdollisesti parempi hyötysuhde käytettävässä pudotusenergiassa. Tällä menetelmällä pudotussyvyudet ovat yleensä 1–10 metriä ja käytettävät pudotuspainot ovat 4–10 tonnin välillä. /9, s. 20./



Kuva 5. Pudotuspaino mikä koostuu useasta pienestä kartiosta. /13/

RIC (Rapid Impact Compaction)

Pudotustiivistyksen voi toteuttaa myös niin sanotulla *Rapid Impact Compaction* –menetelmällä. Menetelmää on käytetty ulkomailla, ja sen suosio on kasvamassa yhä enemmän niin talonrakennus- kuin maanrakennuskohteissa- kin. Sen on kehittänyt BSP International Foundations Ltd 1990-luvulla Iso-Britanniassa pommitettujen kiitoratojen kunnostamiseen ja nykyään menetelmää kehittää hollantilainen Cofra Ltd /5, s. 148/. RIC-menetelmä sopii hyvin ohuille maakerroksille, jotka ovat pääsääntöisesti rakeisia kitkamaita. Perusperiaate

tiivistämässä on sama kuin perinteisessä vapaasti pudotettavassa järkäleessä, mutta siinä käytetään kuitenkin pohjimmiltaan erilaista työtapaa, missä muokattua paalutusjärkälettä pudotetaan hydraulisesti kiihdytettynä useita kertoja teräksisen tiivistysjalan päälle. Menetelmässä on tiettyjä eroja normaaliin pudotustiivistykseen verrattuna, jotka tulee ottaa huomioon maan syvätiivistystä suunniteltaessa. Jokaisen pudotuksen tuottama energia on paljon pienempi, mutta työskentelynopeus on huomattavasti suurempi. Tiivistysenergian pientä määrää kompensoidaan siis useilla pudotuskerroilla. Huomioitavaa on myös, että RIC-menetelmässä teräksinen lyöntijalka, jota järkäle iskee, on jatkuvasti kiinni tiivistettävässä maanpinnassa. /9, s. 21./ Koska tiivistysjalka on jatkuvassa kontaktissa tiivistettävään maahan, on energian siirtyminen maaperään normaalia pudotustiivistystä tehokkaampaa /5, s.148/.

RIC-menetelmä on syvätiivistyksen ja pintatiivistyksen välimuoto, sen syvyysvaikutuksen takia, mikä on enintään 8 metriä /5, s. 148/. Järkäleen paino on yleensä noin 7–16 tonnia, ja se tiputetaan 1,2 metrin korkeudelta useita kertoja peräkkäin tiivistysjalan päälle. Työsaavutus on noin 40 pudotusta minuutissa. Koneet ottavat talteen jatkuvasti pudotustyöstä saatavaa tietoa, jota käytetään myös laadunvarmistuksessa. Seurattavia tietoja ovat: lyöntimäärä / lyöntipiste, energiamäärä / lyönti, maan painuma / lyönti sekä kokonaispainuma yhtä lyöntipistettä kohden. Koneet ovat myös automatisoitu niin, että koneohjaukselle annetaan vaatimukset tiivistyspisteille, ja kun ne on saavutettu, kone lopettaa tiivistämistyön ja siirtyy seuraavan pisteen luokse. /9, s. 21./

Kyseisellä pudotustiivistystekniikalla on paljon hyötyjä verrattuna menetelmään, jossa järkäle pudotetaan vapaasti. Tiivistämistyöhön käytettävät koneet ovat kohtuullisen pieniä perinteisen pudotustiivistyksen nostokalustoon verrattuna, joten kaluston mobilisaatio on helpompaa ja nopeampaa. Järkäleen nostamiseen käytettävä aika on olematon verrattuna perinteiseen menetelmään. Myös koneen käyttökustannukset ovat pienemmät kuin isoissa nosturilaitteissa. Menetelmä on siis mahdollisesti myös kustannusmielessä parempi vaihtoehto. Mahdollisesti tärkeimpänä eroavaisuutena vapaan järkäleen pudottamiseen on se, että RIC-tiivistys ei aiheuta ympäristölle haitallisia tärinöitä tai värähtelyjä samoissa määrin kuin korkealta pudotettava vapaa järkäle, joten työ voidaan toteuttaa, vaikka tiivistettävän alueen lähellä olisi herkästi vaurioituvia rakenteita. Pienemmän tiivistysenergiansa ansiosta RIC-menetelmä

on siis ympäristöllensä ystävällisempi, mutta ei kuitenkaan häviä perinteisen tiivistyskaluston kokonaisenergiamäärille lopputulosta ajatellen sen pienen iskuenergiamäärän takia, sillä lyöntikertojen määrä perinteiseen menetelmään verrattuna on moninkertainen. Myös muiden koneiden työskentely tiivistettävän maan läheisyydessä on mahdollista, sillä pudotuslevyn ansiosta ympäristöön ei pääse lentämään kiviä tai maa-ainesta. /9, s. 21–22./



Kuva 6. Cofran RIC-tiivistyskalustoa. /14/

Kaivinkoneeseen asennettava syvätiivistyslaite

M. Huhtakallion rakennuttama kaivinkoneeseen asennettava lisälaitte mahdollistaa täyttö- ja rakennepenkereiden pudotustiivistyksen 1000 kJ:n energialla. Menetelmässä kaivinkoneen puomin päähän asennetaan 12 metriä korkea putkitorni, jonka sisällä nostetaan hydraulisesti 10 tonnia painavaa teräslieriötä. Järkäleen maksimi pudotuskorkeus on 10 metriä. Huhtakallion kehittämällä mekanismilla järkäleen pudotus on täysin vapaa ilman vaijerin aiheuttamaa kitkaa ja tehohäviötä. /15./ Kuvassa 7 pudotustiivistyskone ja putkitorni ovat Molskotin työmaalla Vantaan Kivistössä. Putkitornin saa käännettyä kuljetusta varten maata vasten, mikä nopeuttaa ja helpottaa mobilisaatiota.



Kuva 7. Huhtakallion pudotustiivistyskone putkitorni kuljetusasennossa. /16/

Laite soveltuu kaikkiin tiivistystä vaativiin kohteisiin ja parhaimmillaan tiivistyksen syvyysvaikutus ulottuu louheessa 10 metriin saakka. Taulukossa 1 on esitetty keskimääräisiä tiivistystehoja eri maalajeille. Tiivistysteho riippuu maan kyllästymisasteesta sekä hienorakenteisen maan plastisuusluvusta. /15./

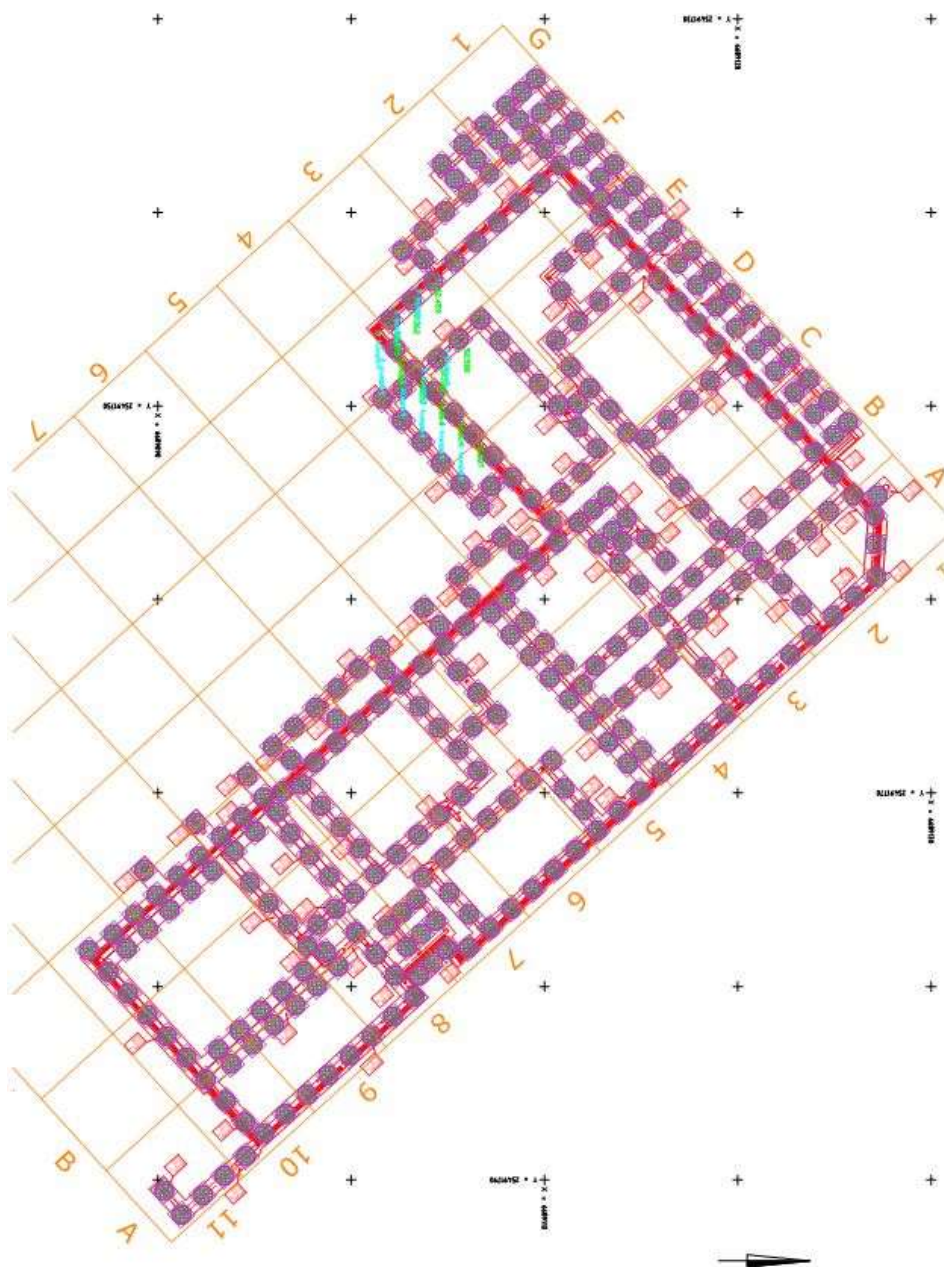
Taulukko 1. Keskimääräisiä tiivistystehoja eri maalajeille Huhtakallion kalustolla. /15/

Pudotuskorkeus (m)	Tiivistysenergia (kJ)	Siltti (m)	Hiekka / Sora (m)	Louhe (m)
5	500	2,5	3–3,5	4–5
7	700	3,5	4,2–5	5,6–7
10	1000	5	6–7	8–10

3.4 Pudotustiivistystyö

Pudotustiivistys tehdään suunniteltuun neliöruudukkoon (kuva 8), joiden sivun pituus (d) on yleensä 2,5–5 m. Pudotukset suoritetaan 2–6 kierroksena niin, että parittomat pudotuskierrokset tehdään ruudun keskelle ja parilliset pudotuskierrokset ruudun nurkkiin. Järkälettä pudotetaan yhden kierroksen aikana

yleensä noin 2–3 kertaa samaan kohtaan. Pudotukset kannattaa tehdä ensin joka toiseen pisteeseen, jonka jälkeen seuraavan kierroksen pudotukset tehdään näiden pisteiden väliin. Tämä tehdään sen vuoksi, että järkäle ei kallistuisi liikaa maahan osuessaan. Jokaisen pudotuskierroksen jälkeen syntyneet kraatterit täytetään tiivistysalustan materiaalilla ja tiivistetään. Pudotustiivistystyön voi lopettaa, kun viimeisen suunnitellun pudotuskierroksen kahden viimeisen pudotuksen yhteispainuma alittaa kohteelle asetetun vaatimuksen. /5, s. 145./



Kuva 8. As Oy Molskotin ensimmäisen pudotuskierroksen pudotusruudukko.

Kuvassa 8 on As Oy Molskotin ensimmäisen pudotuskierroksen pudotusruudukko ja pudotuspisteet. Tässä ruudukossa ruutujen sivujen pituudet ovat 5 metriä.

Suurissa tiivistyskohteissa on suositeltavaa suorittaa koetiivistys, jonka yhteydessä suoritettavista mittauksista saadaan selville käytettävällä kalustolla saavutettava tiivistyssyvyys ja optimienergia. Syvyysvaikutus saadaan selville ensisijaisesti koekairauksilla tai vaihtoehtoisesti mittaamalla tiivistettävän koekentän ulkoreunoille asennettavien sivusiirtymämittausputkien avulla maan muodonmuutoksia. Näin nähdään tarkasti, mille syvyydelle tiivistävä vaikutus ulottuu. /5, s. 145./

3.5 Pudotustiivistyksen laatuvaatimukset ja laadunvalvonta

Jotta tiivistysenergia välittyy oikealla tavalla alaspäin maaperään, tarvitaan tasaiseksi tiivistetty pudotusalusta. Tiivistysalustan rakentamiseen tulee käyttää 0/63 mursketta, mikä rakennetaan tiivistettävän maakerroksen päälle. Tiivistysalustan paksuus tulee olla vähinään 0,3 metriä /17/.

Tiivistymisen edistymistä seurataan mittaamalla järkäleen aiheuttamien pudotuskraattereiden syvyyttä. Tiivistystyön voi lopettaa viimeisellä pudotuskierroksella, kun kahden viimeisen pudotuksen yhteispainuma alittaa kohteelle annetun vaatimuksen. Nämä painumavaatimukset ovat yleensä kohteesta riippuen esimerkiksi < 5 cm, < 10 cm, < 15 cm tai < 20 cm. /5, s. 145./

Pudotusjärkäleen pintapaineen tulee olla vähintään 50 kN/m². Järkäleen tulee olla yhtenäinen ja ehjä kappale, mikä säilyttää alkuperäisen muotonsa ja painonsa koko tiivistämistyön ajan. Järkäleen muotoa ja painon säilymistä tulee seurata koko tiivistämistyön ajan. /17./

Pudotuslaitteiston tulee olla sellainen, että järkäle voidaan pudottaa halutulta korkeudelta ja korkeus on mitattavissa 0,5 metrin tarkkuudella. Järkäleen vapautusmekanismin tulee olla sellainen, että paino pääsee tippumaan vapaasti ja suorassa, jotta osuma maanpintaan on tasainen ja keskitetty. /17./

Pudotuspisteet tulee merkitä tiivistyskentän pintaan $\pm 100\text{mm}$:n tarkkuudella. Tiivistettävä alue jaetaan ruudukkoon, ja ruudukoiden solmupisteet ovat pudotuspisteitä. Pudotuspisteiden etäisyys saa olla enintään kaksi kertaa järkäleen pohjan halkaisijan kokoinen. /17./

Pudotustiivistysalueen maanpinta vaaitaan ennen tiivistämistyötä ja tiivistämisen jälkeen. Mittaustulosten korkeuseroista saadaan selville tiivistetyn kerroksen tilavuudenmuutos. Tämä tilavuudenmuutos on pääosin maamassojen pystysuoraa kokoonpuristumista eli tiivistyspainumaa. /5, s. 146./

Pudotustiivistystyön aikainen laadunvalvonta suoritetaan yleensä mittaamalla viimeisten pudotusten aiheuttamia painumia. Viimeisen pudotuskierroksen kahden viimeisen pudotuksen mitattu yhteispainuma ei saa ylittää suunnitelmassa määritettyä arvoa. Työnaikaisen laadunvalvonnan lisäksi on hyvä tehdä myös puristinheijarikairauksia, joiden kärkivastuksen perusteella voidaan selvittää tiivistetyn maaperän tiiviyttä sekä tiivistyksen syvyysvaikutusta. Kairausdiagrammien perusteella voidaan tarkistaa, että pudotustiivistetyn alueen kairausvastus on suurempi kuin ennen pudotustiivistystä tehdyissä pohjatutkimuskairauksissa. Lähtökohtaisesti laadunvalvontatulokset tarkistaa suunnittelija. /5, s. 146./

Tiivistystyön laadunvalvonnassa on kiinnitettävä huomiota siihen, että tiivistämisessä käytettävä energia on pudotustiivistys suunnitelman mukainen. Myös pudotuskertojen määrä ja niiden jakaantuminen tiivistettävälle maanpinnalle tulee olla suunnitelman mukainen. /17./

Järkäleen muodon ja painon on säilyttävä samana koko pudotustiivistystyön ajan, ja sitä tulee seurata silmämääräisesti. Pudotuspisteisiin syntyvien kuoppien syvyyttä seurataan ympäröivään maanpintaan verrattuna. Pudotuspisteiden kokonaispainumaa tulee seurata, sekä kuoppien täyttämiseen käytetyn murskeen määrää mitata. /17./

Pudotustiivistyksen vaatimusten toteutumista seurataan suunnitelmien mukaisilla kairausmenetelmillä. Pudotustiivistyksen vaikutuksen näkee hyvin, kun kairauksia tehdään sekä ennen pudotustiivistystä, että sen jälkeen.

Pudotustiivistystyöstä pidetään myös työn aikaista pudotuspöytäkirjaa (liite 1), johon tulee merkitä:

- työkohde
- päivämäärä, sää ja lämpötila
- pudotuskalusto ja pudotuskorkeus
- pudotuskierros
- pudotuskohta
- pudotuserän pudotusten kappalemäärä
- kraattereiden tasaukset ja tiivistykset
- kraattereiden syvyysmittausten tulokset

Pudotustiivistyksestä toimitetaan työn tilaajalle kelpoisuusasiakirjat, jotka sisältävät:

- toteumapiirustus
- tiivistuspöytäkirjat
- tiivistystyön aikaiset mittaustulokset (hidastuvuusmittaus)
- tiivistyksen aikana kraattereihin lisätyn maa-aineksen tilavuus
- tiivistystyön jälkeiset kairaustulokset

/17./

3.6 Pudotustiivistyksen ympäristövaikutukset

Pudotustiivistystä harkittaessa on otettava huomioon siitä aiheutuvat vaikutukset ympäristöön. Jopa mahdollisia siirtymiä tai muodonmuutoksia saattaa ilmentyä. Työn suoritusta tulee mitata erilaisin parametrein, kuten ääni, värinä, turvallisuus yms. Tämä voi tarkoittaa jossain tapauksessa jopa sitä, että pudotustiivistys on tiivistysvaihtoehtona suljettava pois, jos tiivistettävän tontin läheisyydessä on paljon rakenteita, jotka ovat alttiita vaurioitumiselle pudotustiivistyksestä syntyvästä värinästä. /9, s. 16–17./

Pudotustiivistyksen aikaiset ympäristön rakenteiden valvontamittaukset toteutetaan suunnitelmien mukaisesti. Pudotuksen aikana tarkkaillaan ympäröivien rakenteiden värinän lisäksi tarvittaessa myös niiden siirtymiä ja muodonmuutoksia. Ympäröivissä rakenteissa suoritetaan katselmuksia ennen pudotustyön aloitusta, jonka yhteydessä asennetaan tarvittavat anturit ja mittarit mittauksia

varten. Katselmukset suoritetaan myös tiivistystyön loputtua. Ympäröivien rakenteiden valvontamittausten tarpeellisuus todetaan suunnitteluvaiheen riskianalyysin perusteella. /17./

Käytettävän pudotusenergian määrä vaikuttaa ympäristöön siirtyvään tärinään, sillä osa pudotukseen käytettävästä energiasta siirtyy ympäristöön tärinää. Mitä tiiviimpää maapohja on, sitä suurempia tärinät lähtökohtaisesti ovat. Varsinkin pudotustiivistystyön lopussa tärinää saattaa ilmetä enemmän kuin aloitettaessa, kun maa on oletettavasti jo tiiviimpää kuin aloitustilanteessa. Tärinän suuruus siis kasvaa työn edetessä, kun tiivistettävä maapohja tiivistyy. Työn aikana ympäristövaikutuksia voidaan pienentää esimerkiksi pienentämällä järkäleen pudotuskorkeutta. Pudotustiivistystyön lähialue käsittää noin 15 metrin säteellä olevan alueen tiivistystyön ympäristössä. Järkäleen osuma maahan aiheuttaa tärinää, mikä on taajuudeltaan lähellä maan ominaistaajuutta, mikä on pehmeiköillä tyypillisesti 4–10 Hz ja kitkamailta korkeampi noin 8–20 Hz. /18, s. 45./

4 ESIMERKKIKOHDE

4.1 Kohteen esittely

Esimerkkikohteena on Skanska Talonrakennuksen rakentama As Oy Vantaan Molskotti, mikä sijaitsee Vantaan Kivistössä. Rakennus tulee olemaan viisikerroksinen asuinkerrostalo.

4.2 Pohjasuhteet

Lähtötietojen perusteella maanpinta tontilla vaihtelee välillä +52,20...+55,35 eli korkeuseroa tontilla on noin 3,2 metriä. Suunnitelmissa rakennuksen lattia-taso on korossa +55,50. Tontin koillisosassa on 0,8–2,2 metriä paksu täytemaakerros, jonka laadusta ei ole tietoa. Muuten tontin pintakerrokset koostuvat löyhistä pintamaaista, jotka sisältävät hiekkaa ja silttiä paksuudeltaan noin 0,5–1,2 metriä. Löyhän pintamaakerroksen alla on hiekkakerros, jonka paksuus vaihtelee 1–3 metriä. Hiekkakerroksen alla on pohjamoreenia, mikä sisältää kiviä ja lohkareita. Kallion pinta sijaitsee korkeustasolla +43,7...+49,3. Pohjavedenpinta on korkeimmillaan vain 0,12 metriä olemassa olevan maanpinnan alapuolella.

4.3 Vaihtoehtoinen perustamissuunnitelma

Pohjatutkimuslausunnossa perustamissuositus on perustaminen täyttökerroksen / kiinteän moreenin / massanvaihdon varaan. Löyhät pintakerrokset tulisi siis poistaa tiiviiseen moreeniin saakka ja korvata ne rakenteellisella täyttökerroksella, mikä tiivistetään kerroksittain. Kaivantojen luiskaus RIL 132 -2000 kohdan 2 mukaisesti. Yli 2 metriä syvät kaivannot tulee tarkastella erikseen. Massanvaihto olisi vaatinut käytännössä yli 2 metriä syvän kaivannon koko tontin osuudelle.

Koska massanvaihto olisi huono vaihtoehto tontille sen ahtauden takia, haluttiin Skanskalla pohtia muita mahdollisia vaihtoehtoja. Jos rakentaminen olisi toteutettu massavaihdolla, olisi jouduttu purkamaan tontin viereisiä teitä ja kunnallistekniikkaa kaivantojen luiskaamiseksi. Massanvaihto on myös ympäristöä paljon rasittava vaihtoehto, sillä ensin vaihdettava maamassa pitää ajaa pois tontilta maankaatopaikalle ja tilalle tuoda vielä uudet kantavat maa-ainekset. Skanskan arvoihin ja toimintamalliin sisältyy ympäristöystävällinen rakentaminen, joten oli selvää, että jotain muuta oli keksittävä. Myös aikataulullisesti tämä olisi ollut epäkelpo ratkaisu.

Ongelmana tontilla on siis sen ahtaus. Massanvaihto vaatisi suuren kaivannon tekemistä ja kaivannon syvyyden takia luiskien tulisi olla loivat, mikä vaatii kaivannolta paljon ylimääräistä pinta-alaa. Luiskien tieltä olisi pitänyt purkaa kunnallistekniikkaa sekä tierakenteita. Skanskan eettisten ohjeiden mukaan myös ympäristöystävällisyys on tärkeä osa rakentamista ja kestävä kehitys ja isot massanvaihdot kuormittavat huomattavasti ympäristöä, sillä ensin löyhät pintamaat tulisi ajaa pois ja tilalle ajaa kantaviin rakennekerrokseen mursketta, jonka valmistus kuormittaa myös ympäristöä. Paras ja ympäristöystävällisin vaihtoehto on siis parantaa olemassa olevan maaperän ominaisuuksia. Myös ajallisesti pudotustiivistyksen toteutus on huomattavasti nopeampaa kuin massavaihto. Pudotustiivistyksen toteuttaminen käsittää tässä kohteessa vain 2–3 työpäivää. Massanvaihdossa menisi huomattavasti pidempään, ja se vaatisi myös paljon enemmän kalustoa ja työntekijäresursseja. Kaivanto olisi sen syvyyden ja vieressä olevien rakenteiden vuoksi luokitukseltaan vaativa ja sen suunnitteluun olisi vaadittu paljon resursseja.

4.4 Pudotustiivistyksen toteutus

Pudotustiivistyksen toteutti M. Huhtakallio Oy. Yrityksen päätoimialoja ovat maanrakennus- ja purkutyöurakointi.

4.5 Pudotustiivistyskalusto

Pudotustiivistyksen toteutuksessa ei käytetty yleisesti käytettävää ristikkopuominosturia, jossa vaijerilla pudotetaan järkäle halutulta korkeudelta maanpintaan. Pudotustiivistykseen käytettiin M. Huhtakallion rakennuttamaa putkitornia, mikä on ainutlaatuinen pudotustiivistyslaite Suomessa. Putkitorni kiinnitetään 65-tonnisen kaivinkoneen puomiin. Putkitornissa oleva järkäleen hydraulinen nostolaitteisto on kytketty kaivinkoneen hydraulikkajärjestelmään. Kone muistuttaa ulkonäöltään melko paljon ulkomailla käytettävää RIC (Rapid Impact Compaction) -konetta (kuva 6) vrt. (kuva 9), mutta toimintaperiaate on eri. Menetelmä poikkeaa normaalista pudotustiivistyksestä siten, että pudotettava järkäle on putkitornin sisässä, jonka sisällä järkäle pudotetaan maan pinnalle. Sylinterin ansiosta pudotustiivistyksen osumatarkkuus pudotuspisteeseen on tarkempaa ja työskentely on nopeampaa kuin perinteisellä kalustolla. Myös järkäleen maahan aiheuttama iskuenergia suuntautuu paremmin alaspäin, eikä leviä ympäröivään maaperään sivuille kuten vapaata järkäletta pudotettaessa. Myös työturvallisuuden kannalta putkitornin käyttö pudotustiivistyksessä on turvallisempaa, sillä järkäleen osuessa maahan ei ympäristöön pääse lentämään kiviä tai mursketta. Hienojakoista hiekkaa ei kannata työalustassa käyttää, sillä järkäleen pudotessa putkitornin sisällä aiheuttaa se putkeen paineen mikä purkautuu putken alapäästä ennen järkäleen osumaa ja saattaa puhaltaa vettä tai hienojakoista maa-ainesta putken ympäristöön. /19./



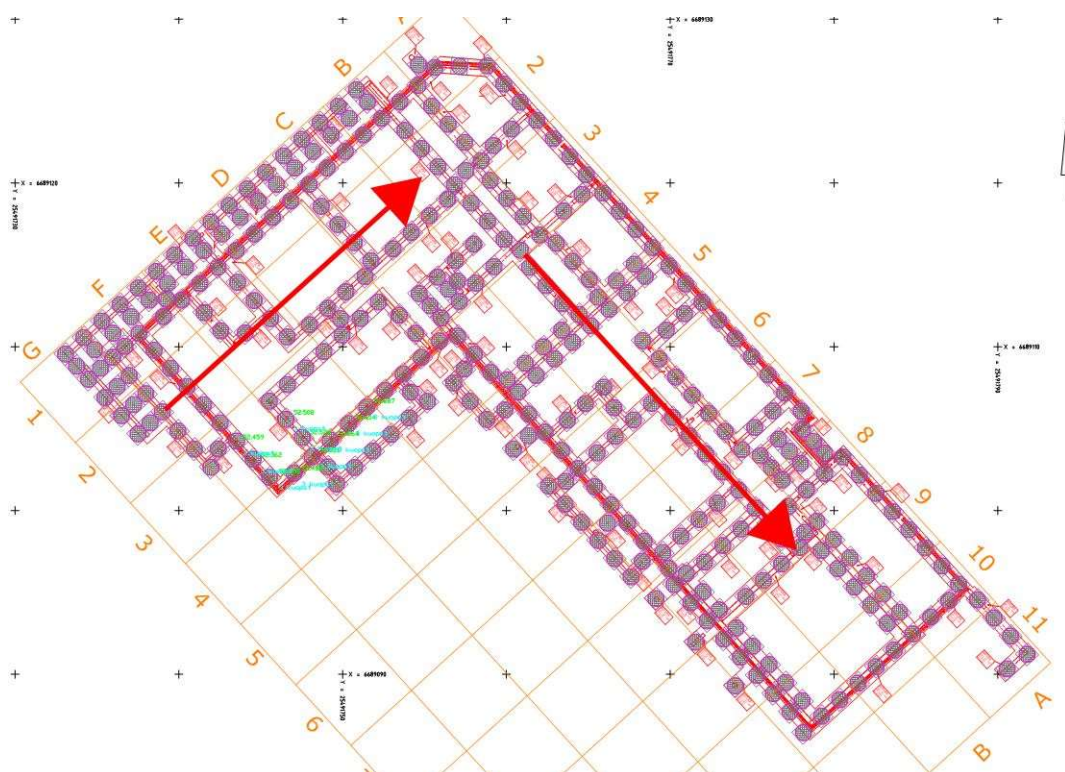
Kuva 9. Huhtakallion tiivistyskalusto Molskotin työmaalla. /16/

4.6 Pudotustiivistystyö

Pudotustiivistystä ennen tontilla tehtiin maankaivuutöitä pudotustiivistystä varten tehdyn kaivuusuunnitelman mukaisesti. Pohjatutkimuksissa todettu pohjavedenpinnan taso oli vain 0,12 metriä olemassa olevan maanpinnan alapuolella, joten pudotustiivistyksen toteuttamista varten tontille oli tehtävä kuivatus-toimenpiteitä. Vesien ohjaamista varten kaivettiin avo-ojat, jotka purkivat tontin luoteis- ja länsiosien reunoille. Tontille kaivettiin vielä pumppauskuoppa tontin länsiosaan, jonne vedet pääsivät virtaamaan hyvin kohti alaspäin viettävää maanpintaa. Luonnontilainen maanpinta laski kohti tontin länsi- ja luoteisosaa, jonne tontin vesiä pyrittiin ohjaamaan.

Ennen ensimmäistä pudotuskierrosta tehtiin pudotustiivistyskonetta varten pudotusalusta 0/90 murskeesta. Pudotusalustan paksuus piti olla vähintään 0,3m ja se tiivistettiin raskaalla valssijyrällä. Pudotustiivistysalustan tiivistämisen jälkeen se kaivettiin auki kolmesta kohtaa perusmaan yläpintaan saakka, jotta voitiin ottaa levykuormituskokeita perusmaan pinnalta. Näin haluttiin toimia, jotta pudotustiivistyksen jälkeisille levykuormituskokeille olisi vertailutuloksia sekä pudotustiivistysalustan päältä otetuista levykuormituskokeista, että

perusmaan yläpinnasta otetuista levykuormituskokeista. Levykuormituskoekuoppien täytön ja tiivistämisen jälkeen merkittiin pudotusalueelle ensimmäisen pudotuskierroksen pudotuskohdat ja päästiin aloittamaan varsinainen pudotustiivistystyö. Ensimmäisellä kierroksella pudotustiivistys aloitettiin tontin länsiosasta, josta siirryttiin tontin itä- ja eteläosaa kohti kuvan 10 mukaisesti. /20./



Kuva 10. Pudotustiivistyksen etenemisjärjestys.

Ensimmäisellä pudotuskierroksella jokaiseen pisteeseen tehtiin kaksi pudotusta suunnitelman mukaisesti.

Tiivistyksen syvyysvaikutus

Järkäleen massa on 10 tn (kuva 7) ja sen maksimi pudotuskorkeus on 10 metriä. Näin maksimi pudotusenergiaksi saadaan 1000 kJ kaavalla $E = mgh$. As Oy Vantaan Molskotin pudotustiivistyksessä käytettiin pudotuskorkeutena 7 metriä, jolla saavutettiin tiivistysenergia 700 kJ. Alueen pohjatutkimuksissa oli havaittu enimmillään noin 2,5 metrin paksuisia hiekkakerroksia joita haluttiin tiivistää. Alimpana kerroksena oli savista moreenia, jota ei haluttu työssä häiritä tarpeettomasti. Tämän takia kaikkea saatavilla olevaa tiivistysenergiaa ei

tarvinnut tai haluttu käyttää. Teoreettisen syvyysvaikutuksen voi laskea Lukasin kaavalla (kaava 2).

$$D_{max} = k\sqrt{WH} \quad (2)$$

jossa	D_{max}	syvyysvaikutus	[m]
	W	pudotusjärkäleen paino	[m]
	H	pudotuskorkeus	[m]
	k	0,35–1,0 (maalajista riippuva kerroin)	[m]

Näin ollen $D_{max} = 4,52$ metriä.

Järkäleen pintapaine

Järkäleen halkaisija on 1 metri ja säde 0,5m. Se on pohjaltaan pyöreä, eli sen pinta-ala saadaan kaavasta 4 ja pintapaine kaavasta 5.

$$A = \pi * r^2 \quad (4)$$

$$p = \frac{m * g}{A} \quad (5)$$

jossa	A	järkäleen pinta-ala	[m ²]
	r	järkäleen säde	[m]
	p	järkäleen pintapaine	[kN/m ²]
	m	järkäleen massa	[kg]
	g	putoamiskiihtyvyyys (9,81)	[m/s ²]

Järkäleen pinta-ala on siis 0,79 m² ja pintapaine 124 kN/m².

Pudotusruudukko

Pudotustiivistysuunnitelmassa määriteltujen pudotusruudukkojen koot olivat 5*5 m eli 25 m². Tarvittavan pudotustiivistysenergian määrän voi laskea jo aikaisemmin esitellystä kaavasta 3:

$$E_{VK} = \frac{NWH}{A} \quad (3)$$

jossa	E_{VK}	vaadittu kokonaisenergiamäärä neliötä kohden	[kJ/m ²]
	N	pudotusten määrä per piste	
	H	pudotuskorkeus	[m]
	W	järkäleen massa	[kN]
	A	pudotusruudukon pinta-ala	[m ²]

Vaadittu kokonaisenergia on $E_{VK} = 84 \text{ kJ/m}^2$. Yhteen pudotusruutuun käytettävä energia on siis $84 \text{ kJ/m}^2 \cdot 25 \text{ m}^2$ eli 2100 kJ.

4.7 Laadunvarmistus

Pudotustiivistyksen laadunvalvonta suoritettiin levykuormituskokein ja puristinheijarikairauksin. Levykuormituskokeita tehtiin 8 kappaletta (liite 2) ja kairauksia 4 kappaletta (liite 3) pudotustiivistetyltä alueelta. Pudotustiivistysalue käsitti tulevan kerrostalon anturalinjan.

Työnaikaista laadunvarmistusta tehtiin vaaitsemalla pudotustiivistyskenttä ennen pudotustiivistyksen aloittamista, sekä jokaisen pudotuskierroksen jälkeen. Näin saatiin laskettua jokaisen pudotuskierroksen aiheuttamat painumat koko tiivistyskentälle.

Pudotustiivistystyön aikana seurattiin maahan syntyneiden kraattereiden syvyyttä, sekä koko pudotustiivistyskentän painumaa takymetrillä. Pudotuspisteiden korot otettiin talteen ennen pudotusta sekä pudotuksen jälkeen. Myös koko kentän painumaa seurattiin takymetrimittauksin ensimmäisen pudotuskierroksen jälkeen, jotta voitaisiin nähdä, onko kenttä painunut epätasaisesti.

Ennen toisen pudotuskierroksen aloittamista ensimmäisen kierroksen jälkeen syntyneet kraatterit tasattiin ja tiivistettiin jyrällä. Jyrätessä työalustaa maaperästä nousi vettä maan pinnalle, mikä kerääntyi isoiksi lätäköiksi tiivistysalustan päälle. Syntyneet lätäköet olisivat haitanneet pudotustiivistystä, sillä järkä-

leen osuessa veteen lentäisi vettä hallitsemattomasti ympäristöön ja työalustan päällä oleva vesi toisaalta jarruttaisi myös järkäleen iskua maahan, mikä aiheuttaisi tiivistysenergian pienenemistä. Lätäkköalueille levitettiin ylimääräinen murskekerros, mikä tiivistettiin jyrällä. Sen jälkeen merkattiin toisen pudotuskierroksen pisteet kenttään ja otettiin pisteiden korot talteen. Toisella pudotuskierroksella järkäle pudotettiin vain yhden kerran jokaiseen pisteeseen.



Kuva 11. Työalustan tasoitus ja tiivistys pudotuskierrosten välillä.

Levykuormituskokeet

Levykuormituskokeessa maata kuormitetaan 10 kN:n korotuksin portaittain aina 60 kN:n maksimikuormaan asti. Kokeessa maan pinnalle asetetaan yleensä halkaisijaltaan 300 mm oleva pyöreä jäykkä levy. Levykuormituskokeessa tarvittava kuormitus maalle toteutetaan yleensä hydraulisella tunkilla, jonka vastapainona on esimerkiksi pyöräkuormaaja tai kaivinkone. Levyn painumaa seurataan mittakellosta ja sekä painuma, että kuormittava voima dokumentoidaan. Ensimmäisestä kuormituskokeesta saadaan maan moduliluku E_1 ja sen jälkeen tehdään toinen kuormituskoe, josta saadaan vastaavasti E_2 -luku. Maan tiiviyssuhde saadaan jakamalla E_2/E_1 (MPa). Tiivistyysuhteen

arvo saa olla enintään 2,2. Kun suhde E_2/E_1 on pieni, maa ei tiivisty enää merkittävästi. Tiiviysuhde kuvaa siis maan jäljellä olevaa tiivistymispotentiaalia.

/21./

Levykuormituskokeita suoritettiin kuvan 12 mukaisesti jo ennen pudotustiivistyksen aloittamista. Kokeita otettiin 3 kappaletta työalustan päältä, sekä toiset 3 kappaletta perusmaasta työalustan alareunasta. Yhdessä perusmaasta otetusta koepisteestä maan kantavuus ja tiiviysvaatimukset täyttyivät jo ennen pudotustiivistyksen aloittamista. /20./ Levykuormituskokeet suoritettiin käyttäen kaivinkonetta vastapainona (kuva 12). Levykuormituskokeet eivät yksinään riitä laadunvalvontatoimenpiteiksi syvätiivistyksessä, sillä levykuormituskokeen tulos tulee vain ohuen pintakerroksen perusteella.



Kuva 12. Levykuormituskokeen ottaminen kaivinkonetta vastapainona käyttäen. /16/

Puristinheijarikairaukset

Kun tiivistettävät maakerrokset ovat kitkamaata, saadaan selville tiivistyksen tehokkuus tekemällä kairauksia ennen pudotustiivistystä, sekä työn loputtua. Kairausvastusdiagrammeja vertailemalla voidaan osoittaa pudotustiivistyksen syvyysvaikutus ja tehokkuus. Tiivistämättömän löyhän hiekan läpäisemiseen

riittää yleensä puristusmenetelmä, kun taas pudotustiivistyksen jälkeen joudutaan yleensä käyttämään heijarikairausta, jotta tiivistetty maakerros voidaan läpäistä. /5, s. 145./

Levykuormituskokeiden lisäksi pudotustiivistyksen jälkeen tehtiin vielä neljä puristinheijarikairausta. Niissä ei havaittu enää löyhiä kerroksia, joissa kairaus olisi edennyt pelkästään puristamalla. Yhdessä pisteessä hiekkakerros jouduttiin läpäisemään poraamalla. Muissa pisteissä hiekkakerros läpäistiin lyömällä. Laadun varmistamiseksi heikoimman levykuormituskoe pisteen kohta päätettiin tutkia vielä puristinheijarikairauksella. Jokaisessa pudotustiivistyksen jälkeisessä laadunvalvontakairauksessa päästiin tavoitteisiin. Kairausten tulokset olivat muodossa lyöntiä / per 0,2m.

5 TULOKSET

Pudotustiivistyksen toisen kierroksen jälkeen havaittiin, että runsaiden vesisateiden jäljiltä tontille kerääntynyt vesi jäi tiivistettyyn pintakerrokseen ja maata jyrätessä vesi nousi maapintaan huokosvedenpaineiden noustessa. Tontilla oleva vesi aiheutti ongelmia tiivistämisessä, sillä tiivistäminen onnistuu vasta huokosvedenpaineiden pienennyttyä.

Levykuormituskokeilla määritetty kantavuusarvo oli toisen pudotuskierroksen jälkeen $E_1 = 60$ MPa. Levykuormituskokeista saadut tulokset vaihtelivat välillä 31–68 MPa. Vaadittu kantavuusarvo ei siis toteutunut kaikissa mittauspisteissä, mikä johtui maaperän liian korkeasta vesipitoisuudesta. Tontille piti tehdä kuivatustoimenpiteitä, jotta liika vesi maaperästä saatiin poistettua. Työmaakokouksessa sovittiin kuivatustoimenpiteistä ja päätettiin tehdä työnaikaiset salaojat niin, että tontille virtaava vesi menee suoraan pumppausmonttuun, mikä oli tehty jo aikaisemmin kuivatustoimenpiteitä varten. Tontille tehtiin myös ylimääräinen mursketäyttö, mikä tiivistettiin jyrällä.

Pintakerroksen kuivatus- ja tiivistystoimenpiteiden jälkeen otettiin uudet levykuormituskokeet mursketäytön päältä. Tuloksista näki selvästi, että alueella suoritettavat kuivaustoimenpiteet olivat auttaneet ja vaikuttivat merkittävästi mitattuihin tuloksiin. Nyt levykuormituskokeiden tulokset vaihtelivat välillä $E_1 =$

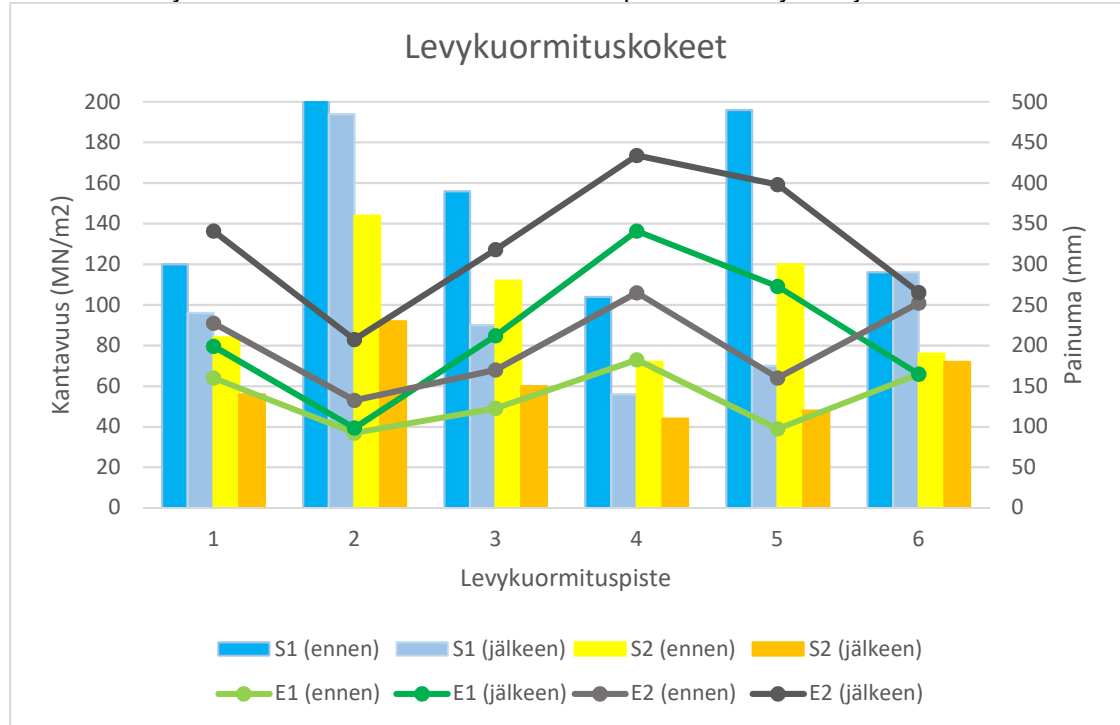
39,4–136,4 MPa. Tiivistyssuhteiden arvot vaihtelivat välillä $E_2 = 1,3\text{--}2,2$. Sal-
littu E_2 yläraja oli 2,2. Nyt kuivatuksen jälkeen mitattujen levykuormituskokei-
den keskiarvo oli 85,2 MPa ja mediaani 82,2 MPa.

Taulukko 2. Levykuormituskokeiden tulokset.

Piste	S1 mm	S2 mm	E_1 MN/m ²	E_2 MN/m ²	E_2/E_1
1	240	140	79,6	136,4	1,7
2	485	230	39,4	83,0	2,1
3	225	150	84,9	127,3	1,5
4	140	110	136,4	173,6	1,3
5	175	120	109,1	159,2	1,5
6	290	180	65,9	106,1	1,6
7	375	168	50,9	113,7	2,2
8	165	130	115,7	146,9	1,3

Levykuormituskokeita otettiin ennen pudotustiivistystä kuudesta eri kohtaa tu-
levalta anturalinjalta. Pudotustiivistyksen jälkeen otettiin vielä kahdeksan uutta
levykuormituskoeetta, joista kuusi otettiin samoista pisteistä kuin ennen pudotus-
työtä otetut kokeet, jotta voitaisiin vertailla pudotustiivistyksen vaikutuksia
levykuormituskokeiden antamista tuloksista. S1-arvon keskimääräinen painu-
maero pieneni 116 mm pisteissä 1–6 ja S2-painuma-arvo pieneni 98 mm pu-
dotustiivistyksen vaikutuksesta. Maan kantokyky parani E_1 -kantavuusarvon
mukaan keskimäärin 31 MN/m² ja E_2 -arvolla 50 MN/m². Kaaviossa 1 on ha-
vainnollistettu levykuormituskokeiden tuloksia ennen pudotustiivistystä ja pu-
dotustiivistyksen jälkeen otetuista levykuormituskokeista.

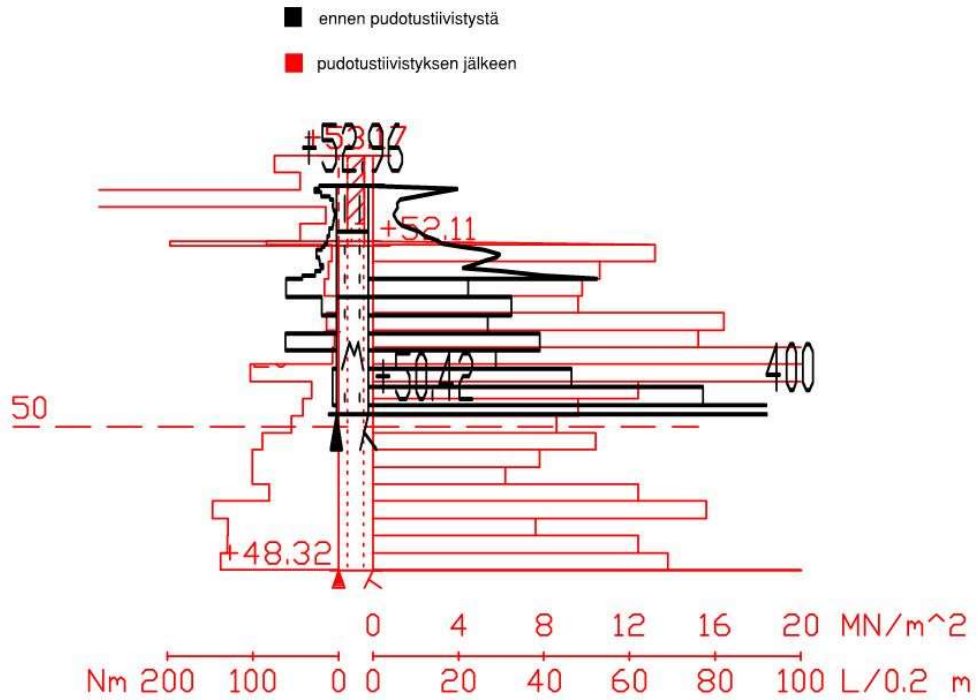
Kaavio 1. Levykuormituskokeiden tulosten vertailua pudotustiivistyksen jälkeen.



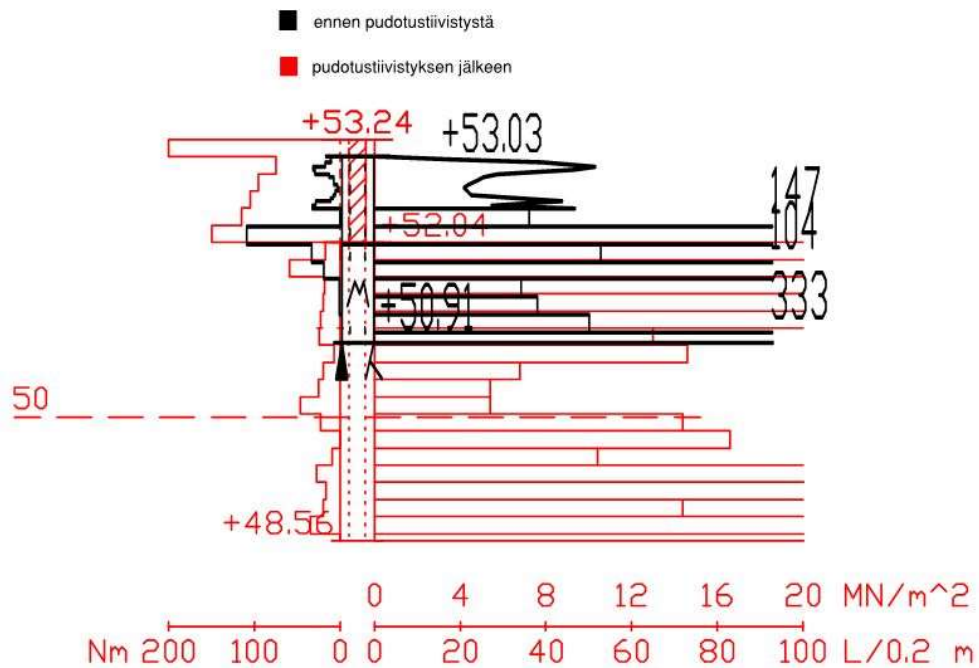
Kaaviosta 1 on nähtävissä, että jokaisessa mitatussa kuudessa pisteessä levykuormituskokeen aiheuttama maan kokoonpuristuminen on pienentynyt ja maan kantokyky on kasvanut huomattavasti. Kaaviossa sinertävät pystypalkit kuvastavat mitattuja S1-painuma-arvoja ja kellertävät palkit taas S2-painuma-arvoja. Viivoilla kuvatut arvot ovat maan kantokykyä havainnollistavia. Vihertävät viivat ovat E₁-kantavuusarvoja ja tummat viivat ovat E₂-mittaustuloksia.

Levykuormituskokeiden lisäksi tehtiin vielä neljä puristinheijarikairausa. Niissä ei havaittu lainkaan kerroksia, joissa kairaus olisi edennyt pelkästään puristamalla. Yhdessä pisteessä hiekkakerros jouduttiin läpäisemään poraamalla, mutta muissa pisteissä hiekkakerros läpäistiin lyömällä. Kohteen pohjarakennesuunnittelija kuvaili pudotustiivistyksen toteutumista laadunvalvontakairaus-ten perusteella: *Kun kairausvastus hiekkakerroksessa on suurempi kuin 25 lyöntiä / 0,2m, voidaan maata pitää tiiviinä.* Vertailuksi kahden kairauspisteen lyöntiarvoista pisteessä phk5 tarvittiin yli 40 lyöntiä 0,2 metrin matkalla ja pisteessä phk7 yli 50 lyöntiä 0,2 metrin hiekkakerroksen läpäisemiseen. Edellisten tulosten avulla arvioitu kimmomoduuli hiekalle vaihtelee arvojen 60 MPa–

75 MPa välillä. Vaadittu maan kantokyky levykuormituskokeella määritettynä oli 60 MPa, joten myös kairauksien perusteella voi arvioida, että rakennuspohjan tiiveydessä on saavutettu riittävä taso.



Kuva 13. Kairausdiagrammien vertailu.



Kuva 14. Kairausdiagrammien vertailu.

Kuvassa 13 ja 14 kairausdiagrammin oikealla puolella on esitetty kairan kärkivastus (MN/m²) sekä lyöntiluku jokaista 0,2 metriä kohden. Vasemmalla puolella on vääntömomentti (Nm), eli voima jolla tankoja pyöritetään.

Puristinheijarikairauksen diagrammeissa vaakaviivoitettu alue kuvaa heijarikairausvastusta ja vaihteleva epäsäännöllinen murtoviiva kuvaa puristinkairausvastusta. Heijarikairattu kerros on yleensä karkeampaa ja tiiviimpää maakerrosta kuin puristamalla läpäisty maakerros. /5, s. 146./

Molemmissa kairausdiagrammien vertailussa on nähtävissä, että mustalla väritetyt tontin pohjatutkimusten yhteydessä tehtyjen kairausdiagrammien mukaan maaperä oli luonnontilassa melko löyhää. Molemmissa alkuperäisissä pohjatutkimuskairauksissa pintamaakerros on läpäisty pelkästään purista-

malla, ja kairan kärkivastukset ovat pieniä. Pudotustiivistyksen jälkeen tehyissä laadunvalvontakairauksissa kairan kärkivastukset ovat kasvaneet huomattavasti, mikä kertoo maakerrosten tiivistymisestä.

6 POHDINTA

Pudotustiivistys As Oy Molskotin kohteessa onnistui hyvin ja tavoiteltuun laadutasoon päästiin, mutta tietyillä toimenpiteillä työtä olisi voitu nopeuttaa entisestään. Samalla olisi voitu parantaa maan kantokykyä enemmän. Tärkein näistä toimenpiteistä olisi ollut tontin maakerrosten kuivatus etukäteen. Nyt pudotustiivistys suoritettiin maaperään, jossa pohjavedenpinta oli lähellä olemassa olevaa maanpintaa. Pudotustiivistyksen ajankohta ja olosuhteet olivat huonoimmat mahdolliset, sillä vettä satoi loppusyksyllä jatkuvasti ja pinta- ja maaperän vesiä virtasi tontille sekä Keimolantien tierakenteista, että viereisen kosteikkotontin penkereen läpi. Tontille tehtiin avo-ojia, sekä pumppauskaianto ennen tiivistystyön aloittamista, mutta työn edetessä ei aluksi otettu tarpeeksi huomioon pudotustiivistyksen aiheuttamaa huokosveden nousua maaperästä. Tiivistyessään maakerroksista poistuu vettä, mikä olisi pitänyt johtaa myös pois tontilta mahdollisimman tehokkaasti.

Pudotustiivistys olisi kannattanut aloittaa tontin kaakkoisosasta Keimolantien vierestä. Toteutunut työjärjestys oli päinvastainen, mikä vaikeutti tontin vesien johtamista pois tontilta. Pohja- sekä pintavedet johdettiin tontin länsiosaan, sillä oli huomattu tontin pintamuotojen laskevan tontin länsiosaan päin. Työjärjestyksen olisi pitänyt olla erilainen ja mukailla tontin luonnollisen maanpinnan muotoja niin, että vettä "puristetaan" maasta pois, ja aloitetaan kauimmaisesta nurkasta, josta edetään siihen suuntaan päin mihin vesi virtaa. Nyt toteutunut työjärjestys esti johdettujen vesien virtaamisen luonnolliseen suuntaan, sillä pudotustiivistyksen aloituskohdassa luotiin vedelle ikään kuin pato maaperään. Tästä vesi ei päässyt kunnolla virtaamaan läpi, sillä vesi virtaa tiivistetyssä maaperässä huomattavasti huonommin kuin luonnontilaisessa maaperässä. Näin ollen ylimääräinen vesi jäi seisomaan tontin maakerrokseen ja sitä tavallaan yritettiin jatkuvasti puristaa vedelle luonnottomaan suuntaan eli ylämäkeen.

Tulevissa pudotustiivistyskohteissa ennen tiivistysalustan rakentamista voisi tiivistystä edeltävinä toimenpiteinä maanpintaa leikata tontilla sen muotoiseksi, että se johtaa pintavesiä haluttuun suuntaan. Näin voitaisiin saada tehtyä tiivistystyö kuivemmissä olosuhteissa, kunhan tiivistystyö aloitetaan tontin ylimmästä kohdasta ja edetään alaspäin maanpinnan muotoja mukaillen. Tontille voi tarvittaessa tehdä hyvissä ajoin ennen pudotustiivistystyön aloittamista salaojia, jotka johtavat pois maaperän vesiä. Myös pumppaamon tekemistä tontille etukäteen voidaan harkita, ja näin saadaan laskettua pohjavedenpintaa.

Pudotustiivistyksen toteutusta kerrostalon pohjanvahvistusmenetelmänä kannattaa tapauskohtaisesti harkita myös tulevaisuudessa. Tämä edellyttää pohjatutkimusten tulosten tarkkaa tulkintaa ja rakeisuuden raja-arvojen täytyessä voidaan harkita pudotustiivistyksen käyttöä. Tällöin pohjatutkimuksesta saatavat tulokset, esimerkiksi pudotustiivistykseen hyvin soveltuva maalaji ja perusmaan huono tiiviys antavat tietoa pudotustiivistyksen käyttömahdollisuudesta tontin pohjanvahvistukseen.

Kun pudotustiivistystä harkitaan pohjanvahvistusmenetelmänä, on ehdottoman tärkeää toteuttaa kohteessa vielä tarkentavia pohjatutkimuksia, jotta pudotustiivistyksen suunnittelu olisi täsmällisempää. Myös tontin pohjavesitasot tulee kartoittaa hyvin. Ennen suunnitelmien tekoa olisi syytä selvittää pohjavedenpinnan tasot tontin eri osissa, sekä niiden virtaussuunnat tontilla. Näiden tutkimusten avulla saadaan tehtyä oikeat toimenpiteet tontin mahdollisen kuivattamisen hyväksi jo ennen varsinaisen pudotustiivistystyön aloittamista, mikä osaltaan edesauttaa hyvän lopputuloksen syntymistä ja tavoitellun laatu-tason saavuttamista.

Pudotustiivistys on edullinen ja nopea pohjanvahvistusmenetelmä ja sen käyttöä kannattaa harkita, jos vain maaperän ominaisuudet ja rakennuspaikan ympäristö antavat siihen mahdollisuuden. Aikataulullisesti ja rahallisesti pudotustiivistys on parempi vaihtoehto kuin paalutus tai massanvaihto. Ongelmana pudotustiivistyksen käytössä on se, että se vaatii juuri oikeanlaiset parametrit tiivistettävältä maaperältä, joten se sopii harvoissa kohteissa pohjanvahvistusmenetelmäksi.

Kairauksien käyttö laadunvalvontaan voi olla ongelmallista kivisessä maaperässä ja louhetäytöillä. Louhepenkereiden pudotustiivistyksen laadunvalvonnassa voidaan käyttää PDA-mittausta, jossa pudotusjärkäleeseen kiinnitetty kiihtyvyyssanturi mittaa järkäleen hidastuvuutta eli käänteistä kiihtyvyyttä järkäleen osuessa maan pintaan. Tästä saadaan tuloksena järkäleen maksimihidastuvuus, keskihidastuvuus, maksiminopeus, keskinopeus ja törmäyksen kesto. Näiden suureiden avulla voidaan laskea maakerroksessa vaikuttava dynaaminen maksimijännitys. Sen ja kokoon puristuman perusteella voidaan laskea maakerroksen keskimääräinen dynaaminen kokoonpuristuvuusmoduuli /5, s. 146/. Hidastuvuusmittausten käyttöä pudotustiivistyksen laadunvarmistuksessa voitaisiin tutkia tarkemmin myös muissa käyttökohteissa kuin louhepenkereissä. Jos järkäleessä olisi kiinteät kiihtyvyyssanturit, voisi koneen kuljettaja nähdä suoraan, milloin tietty piste on saavuttanut tavoiteltavan laatutason, ja sen täytyessä siirtyä seuraavaan pudotuspisteeseen. Myös painumien seuranta yksittäisessä pudotuspisteessä voisi olla osittain automatisoitua niin, että järkäleeseen asetettaisiin GPS-anturi, mikä mittaa z-koordinaattia eli järkäleen sijaintia vertikaalisuunnassa. Ennen pudotusta järkäleen ollessa maassa, järkäleen pohja asetettaisiin pudotuspisteen pinnalle, josta korko tallennettaisiin ja seuraava korkomittaus olisi pudotuksen jälkeen, jolloin saataisiin pisteen painuma ylös koneautomaation avulla.

Edellä mainittuja tietoja voisi yhdistellä myös automaattiseen koneohjaukseen, missä tietokone tekee saaduista anturitiedoista pudotuspöytäkirjaa (liite 1), jonka voi toimittaa työn tilaajalle laadunvalvontadokumenttina työn päätyttyä. Myös GPS-ohjauksen mahdollisuutta tulisi tarkastella, jolloin mittamiehen ei tarvitse erikseen merkitä pudotuspisteitä jokaisen pudotuskierroksen välillä, vaan pudotustiivistyslaitteistossa olisi GPS-ohjauksen avulla toimiva järjestelmä, mikä työkuvien avulla näyttää koneen kuljettajalle tietyn pudotuskierroksen pudotuspisteiden sijainnit. Näistä sijainneista saadaan myös tehtyä työn päätyttyä sähköiset toteumakartat, jotka on mahdollista toimittaa tilaajalle laadunvalvontadokumenttina.

Pudotustiivistys ei sovellu menetelmänä kaikkiin maaperäolosuhteisiin, vaan rajoittuu lähinnä löyhien kitkamaakerrosten ja louhetäyttöjen tiivistämiseen. Vesirakentamisessa vedenpinnan alla menetelmällä on myös käyttöä. Syvätiivistyksen suunnittelu edellyttää tarkkoja tietoja rakennuskohteen maaperästä

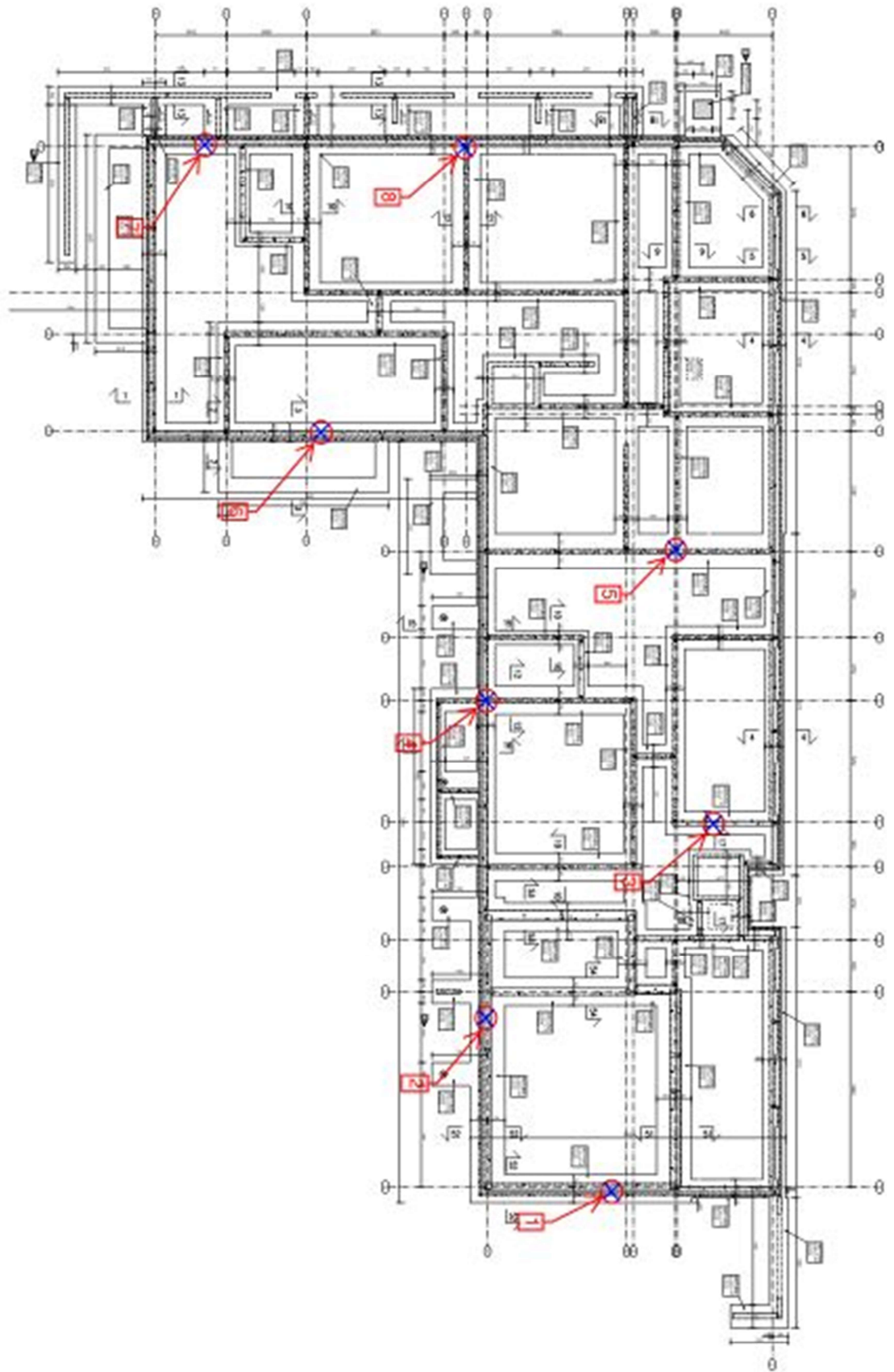
ja pohjavedestä. Geosuunnittelijan tulisi olla mukana myös työssä mukana toteutuksen aikana, ja esimerkiksi tarkistaa laadunvalvonnassa saadut tulokset. Pudotustiivistystyö räätälöidään jokaiseen kohteeseen erikseen, huomioiden olosuhteet ja työssä käytettävä tiivistyskalusto. Menetelmässä on edelleen paljon kehitettävää, esimerkiksi sen käyttöä voidaan lisätä jo rakennetuilla alueilla. Hankkimalla tietoa menetelmän vaikutuksista ympäristöön kokonaisvaltaisesti, voidaan menetelmälle saada lisää käyttömahdollisuuksia.

LÄHTEET

1. Hartikainen, O. Maanrakennustekniikka. 11. painos. Helsinki: Hakapaino Oy. 2007.
2. Rantamäki, M. & Tammirinne, M. Pohjarakennus. 13. muuttumaton painos. Helsinki: Otatieto. 1979.
3. Jääskeläinen, R., Rantamäki, M. & Tammirinne, M. Geotekniikka. 21. muuttumaton painos. Helsinki: Otatieto. 1979.
4. Jääskeläinen, R. Geotekniikan perusteet. Tammertekniikka / Amk-kustannus Oy. 2009.
5. Havukainen, J. Rakentajain kalenteri. Syvätiivistys. Rakennustieto Oy. Hämeenlinna: Kariston Kirjapaino Oy. 2013.
6. Liikennevirasto. Tien perustamisen valinta. 2014. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lop_2014-02_tien_perustamistavan_web.pdf [viitattu 17.8.2018].
7. Jääskeläinen R. Pohjarakennuksen perusteet. 2. painos. Tammertekniikka / Amk-Kustannus Oy. 2009.
8. Tielaitos. Geotekniikan informaatiojulkaisuja. Nauhapystyöjitus. 1994. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/thohje/pdf2/nauhapystyoyjitus_3200251.pdf [viitattu 21.8.2018].
9. Specifying dynamic compaction. BRE Bookshop. Building Research Establishment Ltd. 2003.
10. Viljanen, J. & Korhonen, O. Pudotustiivistys Saukonpaaden täyttöalueella. Helsingin kaupungin geotekninen osasto. Julkaisu 85/2002. 2002. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.hel.fi/static/kv/Geo/Tiedotteet/Tiedote+85.pdf> [viitattu 29.8.2018].
11. Vuola, P. Dynamic compaction of saturated sand. Lisensiaatintutkimus. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan osasto. Geotekniikan laitos. 1996.
12. Kuva 4. Viding, J. Työnjohtaja. Graniittikallio Oy. 2018.
13. Kuva 5. Roger Bullivant Ltd. Brecon Beacons. Ground Improvement. s.a. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.roger-bullivant.co.uk/portfolio_page/brecon-beacons/ [viitattu 25.8.2018].

14. Kuva 6. Cofra B.V. Rapid impact compaction. CDC compaction. s.a. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://cofra.com/activities/rapid-impact-compaction/> [viitattu 22.8.2018].
15. M. Huhtakallio. Kaivinkoneeseen asennettava syvätiivistyslaite. s.a. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www.huhtakallio.fi/elems/Pudotustii-vistyslaite.pdf> [viitattu 25.8.2018].
16. Keränen, K. Vanhempi työnjohtaja. Haastattelu 21.8.2018. Skanska Talonrakennus Oy. 2018.
17. Infra RYL 2018. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset 2018. Maa-, pohja- ja kalliorakenteet. Rakennustietosäätiö RTS sr. Rakennustieto Oy. Helsinki. 2018.
18. RIL 253-2010. Rakentamisen aiheuttamat tärinät. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 2010.
19. Huhtakallio, M. Toimitusjohtaja. Haastattelu 17.8.2018. M. Huhtakallio Oy. 2018.
20. Oksanen, M. Työmaainsinööri. Haastattelu 21.8.2018. Skanska Talonrakennus Oy. 2018.
21. Rakennuskone. Laadunvarmistuksen menettelyt. s.a. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.rakennuskone.fi/laadunvarmistuksen-menettelyt/> [viitattu 20.8.2018].

Liite 2



Liite 3

