



LOUHEPENKEREEN SYVÄTIIVISTYS

Opinnäytetyö

Mikko Heikura

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Yhdyskuntatuotantotekniikka

Hyväksytty __. __. ____ _____

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU TEKNIikka KUOPIO

Koulutusohjelma

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Tekijä

Mikko Heikura

Työn nimi

Louhepenkereen syvätiivistys

Työn laji

Päiväys

Sivumäärä

Insinöörityö

23.4.2010

40+5

Työn valvoja

Yrityksen yhdyshenkilö

Lehtori Raimo Lehtiniemi

Projektipäällikkö Heimo Tervola

Yritys

Niska & Nyysönen Oy

Tiivistelmä

Tämän insinöörityön aiheena oli tutkia pudotustiivistystä louhepenkereen syvätiivistysmenetelmänä. Työn tavoitteena oli laatia työohje, joka helpottaisi pudotustiivistyksen suunnittelua, suoritusta ja laadunvalvontaa tulevaisuudessa. Laadunvalvontaan liittyen kartoitettiin uusia tutkimusmenetelmiä, joilla olisi mahdollista todentaa louhepenkereen laatu tiiveyden ja kantavuuden kautta.

Työn toteutuksessa tutkittiin maarakennusalan kirjallisuutta ja haastateltiin neljää alan asiantuntijaa sähköpostikyselyin. Lisäksi perehdyttiin pudotustiivistystä sisältäneisiin rakennushankkeisiin.

Tutkimuksen mukaan pudotustiivistys sopii erittäin hyvin louhepenkereiden syvätiivistysmenetelmäksi. Seismisillä ja sähkömagneettisilla menetelmillä on mahdollisuus louhepenkereiden tiiveyden valvonnassa, mutta ne vaativat lisää käytännön tutkimuksia, jotta saataisiin enemmän vertailupohjaa tuloksiin ja voitaisiin luotettavasti mitata tiiveyttä louhepenkereissä.

Avainsanat

Louhepenger, pudotustiivistys

Luottamuksellisuus

julkinen

SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree programme

Construction Engineering

Author

Mikko Heikura

Title of Project

Deep Compaction of Blasted Rock Embankments

Type of Project

Final Project

Date

23 April 2010

Pages

40+5

Academic Supervisor

Mr Raimo Lehtiniemi, Lecturer

Company Supervisor

Mr Heimo Tervola, Project Manager

Company

Niska & Nyysönen Ltd

Abstract

The aim of this final project was to research deep dynamic compaction of blasted rock embankments and draw up a manual that helps in the planning, executing and quality controlling of deep dynamic compaction. This final project also looked for new methods to prove the compactness and bearing capacity of blasted rock embankments.

Literature on earthworks was studied and specialists were interviewed to accomplish this final project. Taking a closer look at construction projects that included deep dynamic compaction also helped making this final project.

The results seem to indicate that deep dynamic compaction is a very good deep compaction method for blasted rock embankments. Research methods that are based on seismic and electromagnetic methods have an opportunity to become one of the methods to measure strength features of blasted rock embankments. However, seismic and electromagnetic methods need more practical research to become a reliable method for proving the strength of blasted rock embankments.

Keywords

Blasted rock embankment, dynamic deep compaction

Confidentiality

Public

ALKUSANAT

Tämä insinööri työ tehtiin Niska & Nyysönen Oy:n toimeksiantona. Haluan kiittää kaikkia, jotka edesauttoivat tiedoillansa työn valmistumista. Erityiskiitoksen ansaitsevat työn ohjauksesta lehtori Raimo Lehtiniemi sekä projektipäällikkö Heimo Tervola Niska & Nyysönen Oy:stä.

Kuopiossa 23.4.2010

Mikko Heikura

LYHENTEET JA KÄSITTEET

0/63	Kiviaines, jonka raekoko on loppupäästä rajattu. Kiviaineksen suurin raekoko on 63mm.
A	Pudotuspainon pohjan pinta-ala
D	Pudotuspainon halkaisija tai sivumitta jos poikkileikkaus ei ole pyöreä.
$D_{\max} (=S_z)$	Tiivistysvaikutuksen maksimisyvyys. (englanninkielisessä kirjallisuudessa tiivistysvaikutuksen maksimisyvyys on S_z)
f_C	Pudotusalustan ominaisuuksista riippuva kerroin
f_B	Kovan pohjan etäisyydestä riippuva kerroin
f_M / k	Tiivistettävästä materiaalista riippuva kerroin
g	Painovoiman kiihtyvyys
H	Pudotuspainon pudotuskorkeus metreinä
In-situ –mittaus	Työmaalla suoritettava mittausmenetelmä.
m	Pudotuspainon massa tonneina
Permittiivisyys	Suure, joka kuvaa miten väliaine vaikuttaa siihen kohdistuvaan sähkökenttään. (tunnus ε).
Pohjaantäyttö	Massanvaihtotekniikka, jossa massanvaihto tapahtuu syrjäyttämällä.
r_H	Pudotuspainon säde
S_g	Pudotuskohtien välinen etäisyys
t_i	Pudotuspainon alkuimpulssin kesto
W_H	Pudotuspainon massa kilonewtoneina
Δv_i	Pudotuspainon nopeuden putoaminen alkuimpulssin aikana
V_{\max}	Pudotuspainon maksiminopeus

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	8
2. LOUHEPENKEREEN SYVÄTIIVISTYS	10
2.1. Pudotustiivistys	10
2.1.1. <i>Pudotustiivistystyksen vaatimukset</i>	13
2.1.2. <i>Pudotustiivistystyksen suunnittelu</i>	15
2.1.3. <i>Laadunvalvonta pudotustiivistyksessä</i>	20
2.1.4. <i>Ympäristövaikutukset</i>	22
2.1.5. <i>Veden vaikutus pudotustiivistyksessä</i>	23
2.2. Työmaaliikenteen vaikutus louhepenkereen tiivistymiseen.....	23
2.3. Pohjamaan tiivistyminen	24
3. LOUHEPENKEREEN LAATU	25
3.1. Tiiviys	25
3.2. Kantavuus.....	26
3.3. Ympäristö.....	26
3.4. Geofysikaaliset erikoistutkimukset	27
3.4.1. <i>Seismiset menetelmät</i>	27
3.4.2. <i>Sähkömagneettiset menetelmät</i>	30
4. TEHTYJÄ HANKKEITA	32
4.1. Saukonpaaden täyttöalue.....	32
4.1.1. <i>Pohjaolosuhteet</i>	32
4.1.2. <i>Pudotustiivistyskalusto</i>	32
4.1.3. <i>Pudotustiivistystyksen suoritus</i>	32
4.1.4. <i>Laadunvalvonta</i>	34
4.2. Muita hankkeita.....	34
5. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	36
5.1. Pudotustiivistystyksen suunnittelu ja toteutus	36

	7
5.2. Louhepenkereiden laadunvalvonta.....	37
LÄHTEET	38
LIITTEET	41

LIITE 1: Pudotustiivistyksen pudotuspöytäkirja

LIITE 2: Maksimitiivistymissyvyyden laskentaesimerkki

LIITE 3: Laskelma vaadittavasta pudotusmäärästä

LIITE 4: Pudotustiivistyskartta Saukonpaaden täyttöalueesta

1. JOHDANTO

Louhepenkereitä rakennetaan Suomessa mm. perustuksiksi satama-alueille, tien pohjiksi sekä merialueille rakennettavien asuinalueiden perustuksiksi. Usein louhepenkereet on pengerretty veteen ja tällöin pengerkorkeudet nousevat niin korkeiksi ettei perinteisen jyräyksen tehokkuus riitä koko pengerkorkeuden tiivistämiseksi. Syvätiivistysmenetelmistä pudotustiivistys sopii erittäin hyvin karkearakeisille kitkamaalajeille ja tiivistyksen syvyysvaikutus ulottuu jopa yli 30 m:n syvyyteen.

Pudotustiivistyksen kehitti 1970-luvun alussa ranskalainen maarakennusalan yritys Menard Soltraitementin perustaja Louis Menard. Tätä dynaamista syvätiivistysmenetelmää on käytetty paljon useissa kohteissa ympäri maailman mm. Yhdysvalloissa, Ranskassa sekä Itä- ja Kaakkois-Aasiassa. Suomessa pudotustiivistystä on käytetty ensimmäisen kerran 1970-luvun loppupuolella, mutta on edelleen kuitenkin suhteellisen harvinainen rakennustoimenpide Suomessa. Harvinaisuuden vuoksi ohjeistus pudotustiivistyksestä on hajanaista ja hieman suppeaakin.

Tämä insinööriytyö liittyy vt5:n parantamiseen Päiväranta–Vuorela välillä, jossa tielinjan muutoksen myötä Kallaveteen rakennetaan louhepenger pohjaantäyttämällä. Tielinjan muutoksen myötä myös junarata siirtyy kulkemaan uuden louhepenkereen päältä ja radan osuus louhepenkereestä tullaan tiivistämään pudotustiivistyksenä. Tämän insinööriytyön tilaaja Niska & Nyssönen Oy on yhtenä osakkaana työyhteisöliittymä TYL Kalliumissa, joka toimii Kallansiltojen rakennushankkeen pääurakoitsijana.

Insinööriytyön tavoitteena on laatia työohje, johon kootaan tietoa pudotustiivistyksen suunnittelusta, toteutuksesta ja laadun varmistamisesta. Työohjeen tarkoitus on helpottaa pudotustiivistyksen läpivientiä suunnittelusta laadunvarmistukseen. Lisäksi tämän insinööriytyön tavoitteena on kartoittaa uusia mittausmenetelmiä, joilla voitaisiin todentaa louhepenkereen laatu tiiviiden ja kantavuuden osalta.

Pudotustiivistyksestä käydään läpi kaikki vaiheet sen suunnittelusta työn suoritukseen sekä laadun toteutukseen. Tiivistystyön lopputulokseen liittyvät laatuvaatimukset sekä laadunvarmistustoimenpiteet käsitellään louhepenkereiden osalta. Mittausmenetelmien osalta tarkastellaan seismisiä ja sähkömagneettisia geofysikaalisia erikoistutkimuksia.

Lopussa esitellään muutama rakennushanke, joissa louhepenkereen pudotustiivistys on ollut merkittävänä osana urakkaa. Työhön ei tehdä käytännön tutkimuksia vaan sitä tehdessä tutkitaan maarakennusalan kirjallisuutta, aiheeseen liittyviä toteutuneita hankkeita ja niihin liittyviä tutkimuksia sekä haastatellaan neljää alan asiantuntijaa sähköpostikyselyin.

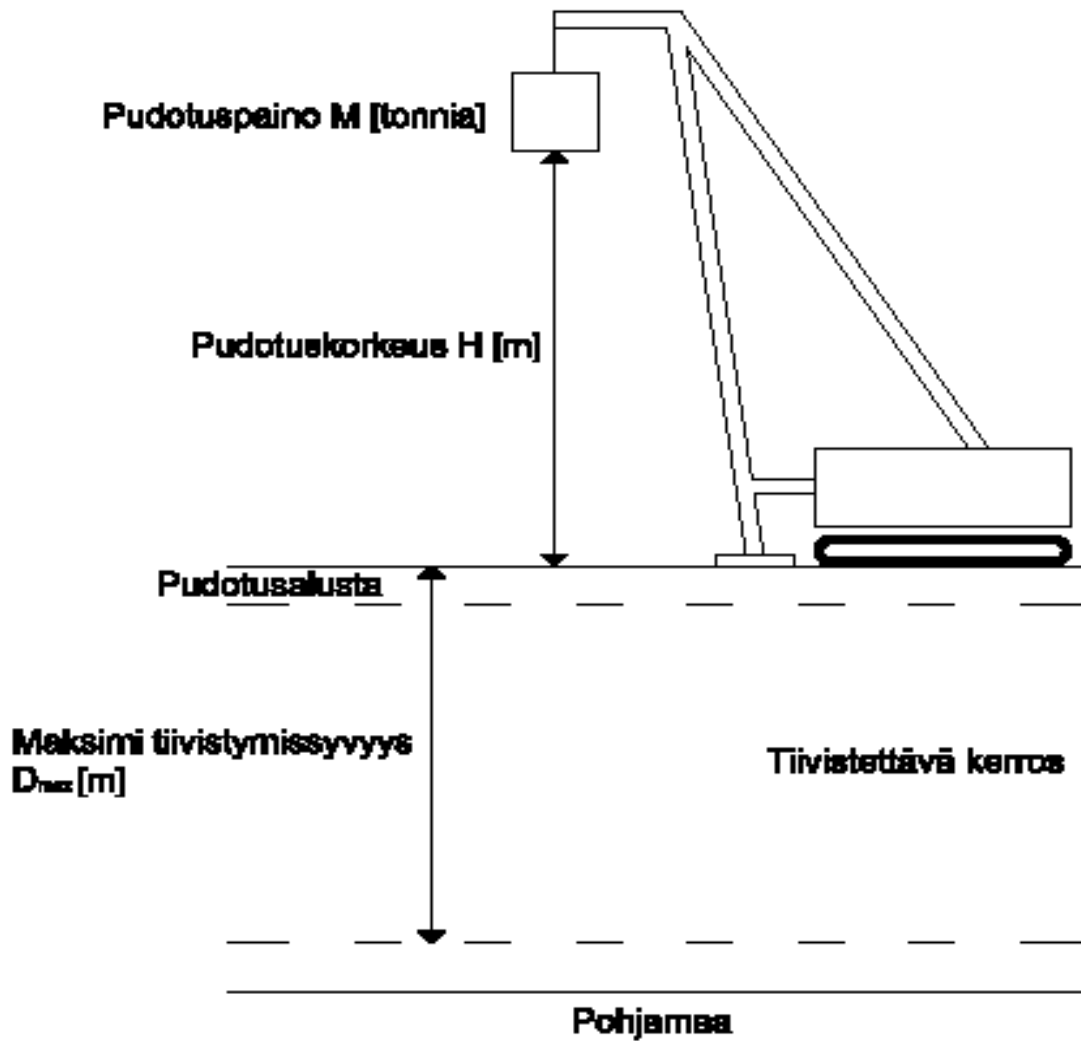
2. LOUHEPENKEREEN SYVÄTIIVISTYS

Maan tiivistäminen tarkoittaa maa-aineksen huokoisuuden pienentämistä ja samalla irtotiheyden suurentamista mekaanisin keinoin. Tiivistyminen saadaan aikaan kumoamalla maahiukkasten välistä sisäistä kitkaa ja koheesiota. /1./ Tiivistystyöt jaetaan staattisiin ja dynaamisiin menetelmiin. Staattisessa menetelmässä maan tiivistyminen tapahtuu tiivistyskoneen oman painon ansiosta. Dynaamisessa menetelmässä tiivistyskoneesta välittyy tiivistettävään rakenteeseen yleensä lähes kohtisuora värinä tai isku. Louhetta tiivistettäessä kyseeseen tulee dynaaminen tiivistysmenetelmä, jonka värinän tai iskun tarkoituksena on kumota kivien välistä kitkaa ja särkeä lohkareiden teräviä kärkiä, jotta louhikon huokoisuus pienenee ja kitkakulma suurenee.

Syvätiivistyksellä tarkoitetaan lähinnä kitkamaakerrosten mahdollisimman syvälle ulottuvaa tiivistämistä, joka tapahtuu dynaamisin menetelmin eli täryttämällä, juntaamalla tai räjäyttämällä. Syvätiivistämisen eri työmenetelmiä ovat täryhuuhtelu, tiivistyspaaluutus ja pudotustiivistys. /2./ Tässä työssä käsitellään näistä menetelmistä pudotustiivistystä, koska vain sillä voidaan tiivistää louhetta.

2.1. Pudotustiivistys

Pudotustiivistys on syvätiivistysmenetelmä, jossa pudotuslaite (kuva 2) pudottaa vapaasti yleensä 5–40 tonnin painoisen pudotuspainon 10–40 metrin korkeudesta. Pudotuspainojen massat voivat poikkeustapauksissa olla huomattavasti suurempiakin. Maaan iskeydyttyään pudotuspaino muuttaa kineettisen energiansa maaperässä kulkeviksi iskuaalloiksi, jotka aiheuttavat maan tiivistymisen. /3./ Parhaiten tämä tiivistysmenetelmä soveltuu karkeille ja hyvin vettä läpäiseville maa-aineksille, kuten louheelle. Kuvassa 1 on esitetty pudotustiivistyksen periaate.



Kuva 1. Pudotustiivistyksen periaate

Kalusto

Suomessa tähän asti tehdyissä pudotustiivistyksissä on käytetty pudotuspainoja 25 tonniin asti. Pudotuskorkeudet ovat olleet korkeimmillaan hieman yli 30 metriä. Pudotuskoneet ovat automatisoituja, mikä tarkoittaa sitä, että koneelle syötetään pudotuskorkeus, paino ja pudotusmäärä, jonka jälkeen kone hoitaa automaattisesti pudotustiivistyksen. Kone myös rekisteröi kaiken tarpeellisen tiedon. /4./



Kuva 2. Pudotustiivistyskalusto /5/

Yleensä pudotuskoneet ovat tela-alustaisia ristikkopuominostureita, mutta olemassa on myös pudotuslaitteita kevyimmille pudotuspainoille, jotka voidaan liittää hydrauliseen kaivinkoneeseen. Taulukossa 1 on esitetty erään nostokyvyltään 130 tonnin tela-alustaisen ristikkopuominosturin nostokapasiteetit puomin pituuden suhteen. Taulukon 1 säde kertoo pudotustiivistyskoneen keskilinjan ja puomin pään välisen vaakasuoran etäisyyden metreissä.

Taulukko 1. Pudotustiivistyskoneen (Liebherr HS 885 HD) nostokapasiteetit tonneissa puomin pituuksien suhteen /6/

	Puomin pituudet				
Säde	21m	24m	27m	30m	33m
[m]	t	t	t	t	t
8.0	30	30	25	25	25
9.0	20	20	20	20	20

2.1.1. Pudotustiivistyksen vaatimukset

Pudotusalustan vaatimukset

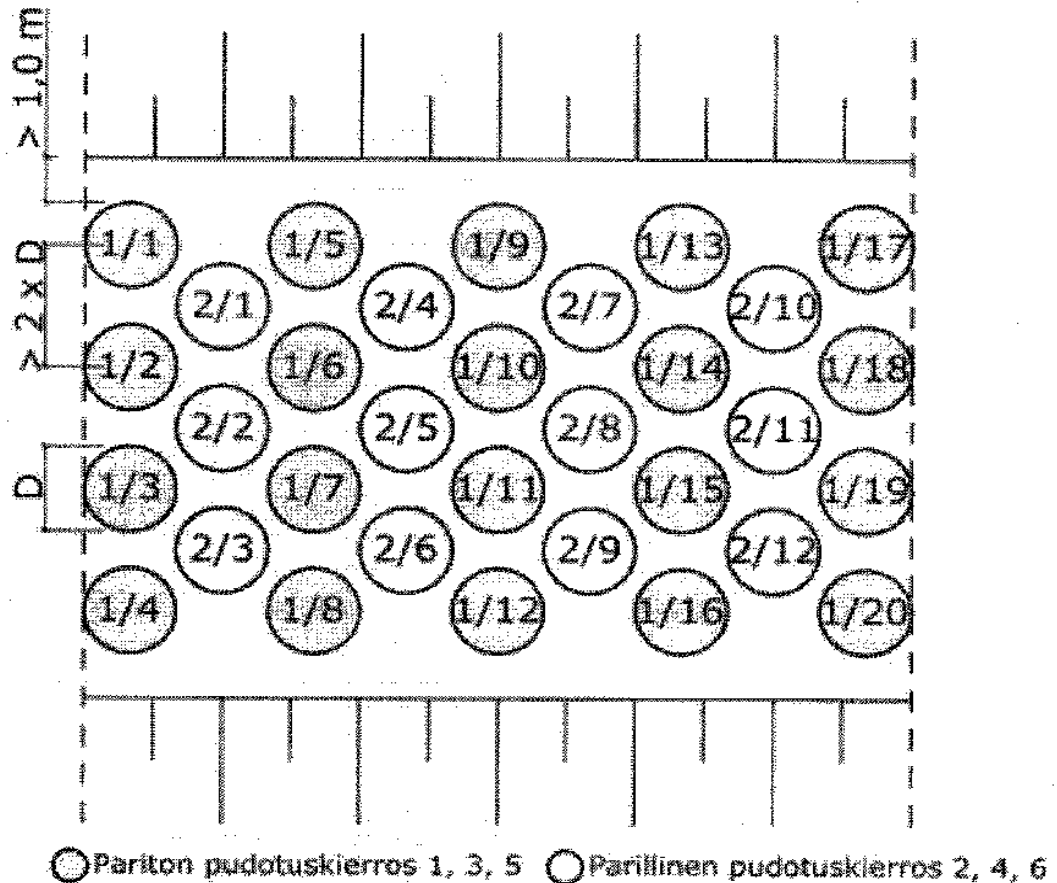
Ennen varsinaista tiivistystyötä rakennetaan tiivistettävän penkereen päälle pudotusalusta 0/63 murskeesta. Pudotusalustan paksuus riippuu tiivistettävän kerroksen materiaalista, mutta sen tulee olla vähintään 0,3 metriä paksu. Pudotusalustan tarkoitus on estää pudotettavan järkäleen uppoaminen tiivistettävään kerrokseen ja estää maan murtuminen. /7./ Huolellisesti tehdyllä ja hyvin tiivistetyllä sekä riittävän paksulla pudotusalustalla on huomattava vaikutus tiivistyksen tehokkuuteen.

Kaluston vaatimukset

Tiivistystyön onnistumisen kannalta on tärkeää, että käytetään työhön soveltuvia laitteita. Syvätiivistykseen käytetään teräksistä tai teräskuorellista betonista järkälettä. Pudotuspainon on oltava yhtenäinen ehjä kappale ja sen tulee säilyttää muotonsa ja painonsa koko tiivistystyön ajan. Eritoten käytettäessä teräskuorellista betonijärkälettä on kiinnitettävä huomiota järkäleen ehjyyteen. Pudotuspainon massan on oltava vähintään 50 kN / järkäleen pohjan m². Pudotuslaitteen on pystyttävä pudottamaan järkäle tietyltä korkeudelta siten, että pudotuskorkeus voidaan määrittää 0,5 metrin tarkkuudella. /8./ Yleensä pudotuslaitteena käytetään tela-alustaista ristikkopuominosturia.

Pudotuskohtien sijainti

Pudotuskohtien sijainti mitataan ja merkitään +/- 100 mm:n tarkkuudella maastoon. Tiivistettävä alue jaetaan ruudukkoon siten, että ruudukon solmupisteet ovat pudotuskohtia. Ruudukon solmupisteiden etäisyys saa olla enintään kaksi kertaa pudotuspainon pohjan halkaisija tai sivumitta. /8./ Kuvassa 3 on esitetty pudotustiivistyksen pudotuskartta.



Kuva 3. Pudotustiivistyksen pudotuskartta /8/

Työn suoritus

Pudotuksia tehdään yhdellä työkierroksella samaan kohtaan 2–5 kappaletta. Pudotuksia suoritetaan aina vähintään kaksi kierrosta ja kierrosten välillä pidetään taukoja, joiden pituus tiivistettävästä maalajista riippuen vaihtelee muutamasta tunnista muutama viikkoon. /2./ Jokaisen pudotuskierroksen jälkeen järkäleestä syntyneet kuopat tasataan 0/63 murskeella ja pudotusalusta tiivistetään vähintään 2 000 kg:n täryjyrällä ainakin 4 ylityskertaa. Pudotuskuopan pohjan kaltevuus saa olla enintään 1:10 ja syvyys ympäröivään maahan verrattuna enintään 0,3 metriä. Jokaisen pudotuskierroksen jälkeen mitataan 20 % pudotuskohdista siten, että ne kattavat koko tiivistettävän alueen. Pudotusjärjestyksen tulee olla jokaisella kierroksella sama. Jos pudotuskierroksia tarvitaan enemmän kuin kaksi, lisäkierroksia tehdään aina parillinen määrä. Tiivistystyö voidaan lopettaa kun, pudotuskuoppien keskimääräinen syvyys on pienempi kuin suunnitelma-

asiakirjoissa on määrätty. Jos pudotuskuoppien syvyyttä ei ole erikseen suunnitelmis-
sa määrätty, se on enintään 0,1 m. /8./

Tiivistettäessä erittäin korkeita penkereitä, kannattaa harkita kaksivaiheista tiivistystä. Ensimmäisessä vaiheessa tiivistetään syvemmällä oleva maa. Koska ensimmäinen vaihe löyhdyttää tiivistettävän kerroksen pintaosaa, suoritetaan toinen vaihe. Toisessa vaiheessa pudotuspaino on kevyempi, pudotuskorkeus matalampi ja solmupisteiden etäisyys pienempi kuin ensimmäisessä vaiheessa.

2.1.2. Pudotustiivistyksen suunnittelu

Tiivistyksen tehokkuus

Tiivistysvaikutuksen maksimisyvyys voidaan arvioida usealla eri menetelmällä. Yleisesti hyväksytyin menetelmä syvyysvaikutuksen arvioimiseen on energiaan perustuva yhtälö. Tiivistysvaikutuksen maksimisyvyys voidaan laskea Mènardin ja Broisen kehittämästä kaavasta 1 /3./

$$D_{\max} = k * \sqrt{(m * H)} \quad (\text{kaava 1.})$$

,missä D_{\max} on maksimitiivistymissyvyys [m]

k on tiivistettävästä materiaalista riippuva kerroin

m on pudotuspainon massa [tonnia]

H on vapaa pudotuskorkeus [m].

Tiivistettävästä materiaalista riippuvan kertoimen k arvona voidaan käyttää taulukon 2 mukaisia kertoimen f_M arvoja.

Taulukko 2. Tiivistettävästä materiaalista riippuvan kertoimen f_M arvot /7/

Materiaali	f_M
Hiekkainen siltti	0,50 - 0,60
Silttinen hiekka	0,55 - 0,65
Hieno hiekka	0,6 - 0,7
Keskihiekka -sora	0,65 - 0,8
Humukseton täyttö	0,5 - 0,8
Murske- tai louhetäyttö $F < 600$	0,7 - 1,0

f_M kertoimen arvot riippuvat materiaalin ominaisuuksista, mutta jonkun verran myös tulkitsijasta. Yleistäen arvo 0,5 kuvaa hiekkaisen siltin tiivistymiskerrointa ja arvo 1,0 louhetäyttöä. /7./ Suomessa on louhetäytön kertoimelle yleensä käytetty arvoja 0,5 ja 0,75 väliltä. Pienemmän kertoimen valinta pienentää laskettua tiivistyksen maksimisyvyyttä ja näin saadaan suunnitelmat varmemmalle puolelle.

Tiivistyksen maksimisyvyyteen vaikuttavat tiivistettävän materiaalin lisäksi myös pudotusalustan paksuus ja laatu sekä kovan pohjan etäisyys tiivistettävästä pinnasta. Nämä tekijät huomioon ottamalla saadaan tarkempi arvio tiivistysvaikutuksen syvyydestä. Tällöin tiivistyksen maksimisyvyys voidaan laskea kaavasta 2 /3./

$$D_{\max} = f_C * f_M * f_B * \sqrt{(m * H)} \quad (\text{kaava 2.})$$

,missä D_{\max} on maksimi tiivistymissyvyys

f_C on pudotusalustasta riippuva kerroin

f_M on tiivistettävästä materiaalista riippuva kerroin

f_B on kovan pohjan etäisyydestä riippuva kerroin

m on pudotuspainon massa [tonnia]

H on vapaa pudotuskorkeus [m].

Pudotusalustan ominaisuuksista riippuvalle kertoimelle f_C voidaan käyttää taulukon 3 mukaisia arvoja. Mitä parempi pudotusalusta, sen suurempi kerroin f_C on. Tiivistettävästä materiaalista riippuvan kertoimen f_M arvoina voidaan käyttää taulukon 2 arvoja. Kovan pohjan etäisyydestä riippuva kerroin f_B arvo määräytyy väliltä 0,8–1,7. Kerroin $f_B=1$ kuvaa tapausta, jossa kallio tai kova pohja on erittäin syvällä, eivätkä tiivistymissyvyyden alapuolisten maakerrosten ominaisuudet suuresti poikkeaa tiivistettävän materiaalin ominaisuuksista. Kerroin $f_B=1,7$ puolestaan kuvaa tapausta, jossa kallio on arvioidussa tiivistymissyvyydessä. Kerroin f_B voi saada arvoja myös alle yhden, mikäli maakerrokset tiivistymissyvyyden alapuolella ovat tiivistettävää materiaalia huomattavasti heikkommat. /7./

Taulukko 3. Pudotusalustan ominaisuuksista riippuva kerroin f_C /7/

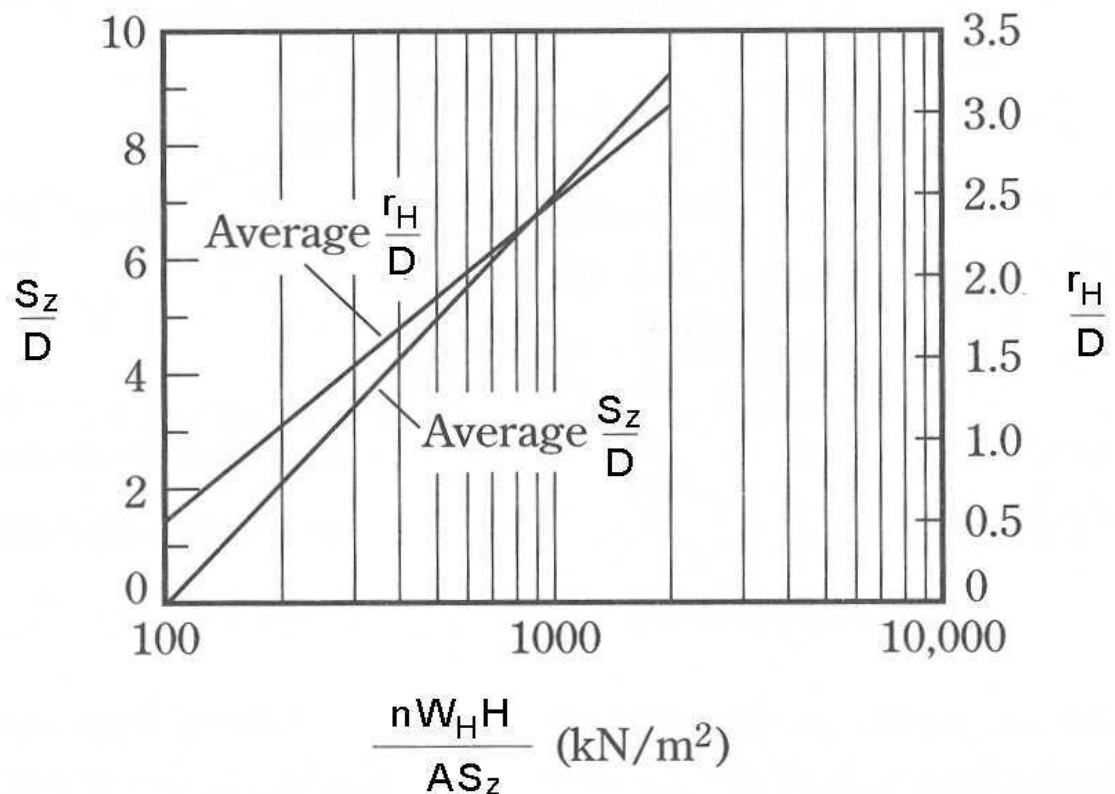
Materiaali	Tasauskerroksen paksuus [m]	f_C
Löyhä hiekka	0,5 – 1,0	0,5 – 0,8
Tiivis hiekka	0,5 – 1,0	0,8 – 0,9
Sora	0,5 – 1,0	0,85 – 1,0
Murske	0 – 0,5	0,7 – 1,0

Näillä kaavoilla voidaan arvioida maksimi tiivistymissyvyys käytettävissä olevilla kallustoilla ja vallitsevissa olosuhteissa. Maksimi tiivistymissyvyyden saavuttaminen riippuu kuitenkin optimaalisesta pudotuspainon massasta ja pudotuskorkeudesta riippuvasta kinemaattisesta energiasta. Käytännössä tämän energian optimointi onnistuu vain kokeilemalla ja tarkkailemalla maan tiiveyttä. /7./ Liitteessä 2 on laskettu esimerkki pudotustiivistyksen arvioidusta maksimi tiivistymissyvyydestä.

Pudotusten lukumäärä ja pudotuskohtien sijainti

Suomessa pudotusmäärät eivät ole pohjautuneet teoreettisiin laskelmiin vaan ne ovat määräytyneet kokemusperäisen tiedon pohjalta. Pudotuksia suositellaan suoritettavan 2–5 kappaletta kierrosta kohden ja vähintään kaksi kierrosta. Todellinen pudotusten lukumäärä määräytyy vasta pudotustiivistystä tehtäessä. Pudotuskraattereiden syvyysvaatimuksen täyttyessä tiivistäminen voidaan lopettaa.

Pudotuskertojen lukumäärä voidaan määrittää myös laskelmilla, kun pudotustiivistyksen maksimi tiivistymissyvyys on arvioitu. Kuvasta 4 voidaan määrittää pudotusten lukumäärä ja pudotuskohtien etäisyys toisiinsa verrattuna, kun tiedetään pudotuspainon massa, pudotuskorkeus, arvioitu maksimi tiivistymissyvyys sekä pudotuspainon poikkeileikkauksen mitat.



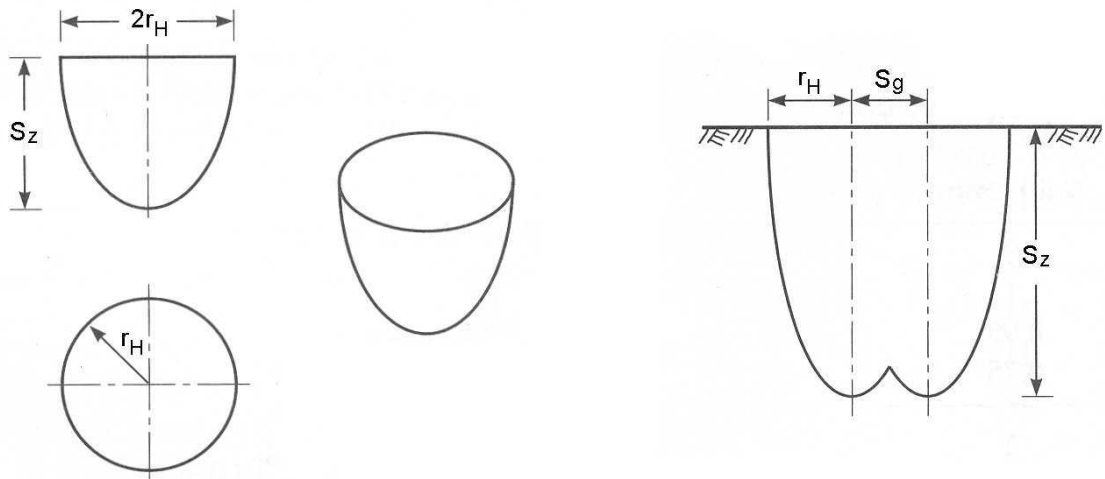
Kuva 4. Pudotustiivistyksen mitoitus /9/

Määrittämällä pudotusten lukumäärä yhtä solmupistettä kohtaan taataan tiivistyksen tehokkuus ja toisaalta taas estetään ylitivistyminen. Pudotuskohtien etäisyyden suunnittelulla varmistetaan, että pudotustiivistys vaikuttaa koko tiivistettävään kerrokseen eikä

pudotuskohtien väliin jää tiivistymättömiä vyöhykkeitä. Kuvassa 5 on havainnollistettu pudotustiivistyksen vaikutusalue.

Kuvien 4 ja 5 suureiden selitykset: /9/

- S_z on maksimitiivistymissyvyys ($=D_{\max}$), [m]
- D on pudotuspainon halkaisija tai sivumitta jos ei ympyrän muotoinen, [m]
- n on pudotuskertojen lukumäärä
- W_H on pudotuspainon massa, [kN]
- H on pudotuskorkeus, [m]
- A on pudotuspainon pohjan pinta-ala, [m²]
- r_H on pudotuspainon säde, [m]
- S_g on pudotuskohtien välinen etäisyys, [m]



Kuva 5. Tiivistyvän alueen muoto /9/

Liitteessä 3 on esitetty esimerkkilaskelma vaadittavasta pudotusten lukumäärästä.

2.1.3. *Laadunvalvonta pudotustiivistyksessä*

Tiivistyön valvonnassa kiinnitetään huomiota siihen, että suunnitelmissa määrättyä tiivistykseen käytettävää energiamäärää ei aliteta. Energiamäärä saadaan kertomalla järkäleen paino sen pudotuskorkeudella. Lisäksi on tarkkailtava seuraavia asioita /8/

- pudotusten lukumäärä
- pudotusten jakautuminen tiivistettävälle pinnalle
- järkäleen muoto ja paino
- pudotuskuoppien syvyys
- kuoppien tasaukseen käytettävän murskeen määrä.

Hidastuvuusmittaus

Hidastuvuusmittauksien on todettu olevan luotettavin tapa mitata pudotustiivistyksen tehokkuutta. Varsinkin, jos työn aikana havaitaan, että suunnitelmissa määrättävää lopeuksen raja-arvoa on vaikea saavuttaa tai pudotuksen tehokkuuteen liittyy epäselvyyttä, on tehtävä pudotuspainon hidastuvuusmittauksia tiivistyksen tehon arvioimiseksi. /7./ Hidastuvuusmittauksissa pudotuspainon yhdelle sivulle asennetaan anturi, joka kertoo, kuinka nopeasti pudotuspainon nopeus laskee maahan iskeytymisen jälkeen. Mittauksista saatavilla aika–nopeus-kuvaajilla voidaan arvioida tiivistyksen tehokkuus. /3./

Jotta pudotuspainon nopeuden hidastuvuus voidaan määrittää, täytyy ensin laskea sen maksiminopeus ennen maahan iskeytymistä. Pudotuspainon maksiminopeus voidaan laskea kaavasta 3 /3./

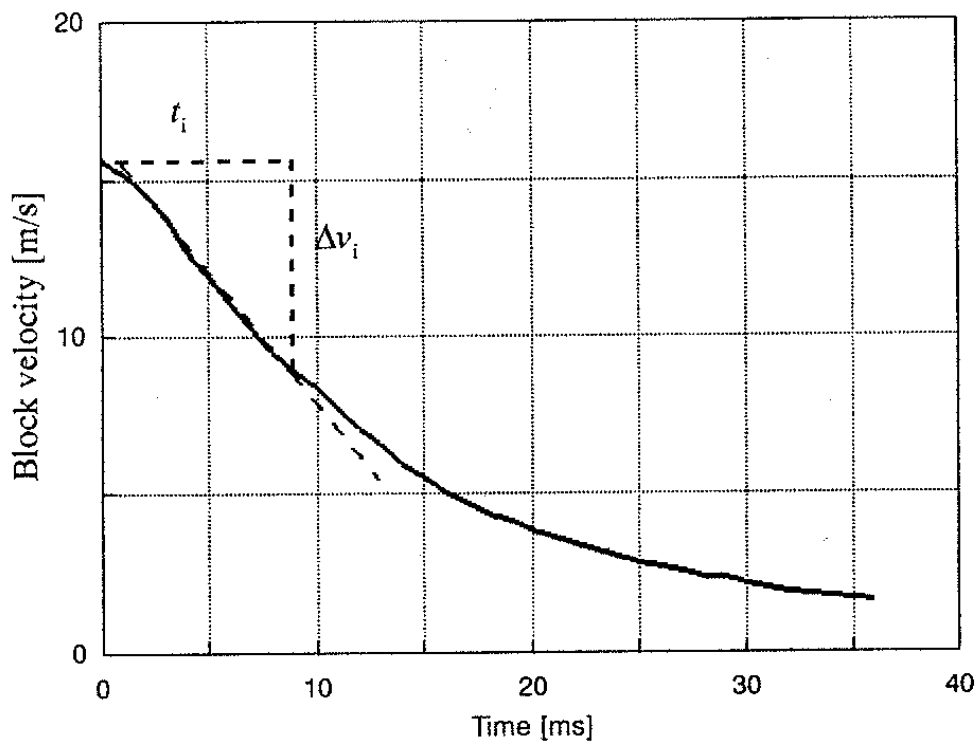
$$v_{\max} = \sqrt{2 * g * H} \quad (\text{Kaava 3.})$$

, missä v_{\max} on pudotuspainon maksiminopeus

g on painovoiman kiihtyvyys

H on pudotuspainon pudotuskorkeus.

Kuvassa 6 on esitetty esimerkki aika–nopeus-kuvaajasta. Tiivistyksen tehokkuus arvioidaan käyrän lineaarisen osan perusteella, joka on rajattu katkoviivoin. Käyrän lineaarisessa osassa pudotuspainon hidastuvuus on vakio ja maahan kohdistuva voima on suurimmillaan. Kuvaajassa t_i kuvaa pudotuspainon alkuimpulssin kestoa ja Δv_i pudotuspainon nopeuden putoamista alkuimpulssin aikana. Näiden määreiden perusteella voidaan arvioida tiivistyksen tehokkuus. Mitä suurempia näiden määreiden arvot ovat, sen tehokkaampaa on tiivistyminen. /3./



Kuva 6. Hidastuvuusmittauksien aika–nopeus-kuvaaja /3/

Pudotuspöytäkirja

Pudotustiivistyksestä pidetään työn aikana pöytäkirjaa, joka sisältää vähintään seuraavat asiat /8/

- työkohde
- päivämäärä, säätila ja lämpötila

- pudotuskalusto ja pudotuskorkeus
- pudotuskierrros
- pudotuskohta
- pudotuserän pudotusten määrä
- kraattereiden tasaukset ja tiivistykset
- kraattereiden syvyysmittausten tulokset.

Kelpoisuusasiakirja

Pudotustiivistyksen kelpoisuuden osoittamiseksi laaditaan kelpoisuusasiakirja johon liitetään /8/

- toteumapiirustus penkereestä
- tiivistyspöytäkirjat
- tiivistyksen aikaisten mittausten tulokset
- tiivistyksen aikana tiivistyskenttään lisätyn maa-aineksen tilavuus.

Kaikki tiivistyksen laadunvalvontaan liittyvät asiakirjat liitetään työmaalla ajan tasalla oleviin laatuasiakirjoihin. /8./ Liitteessä 1 on esitetty malli pudotuspöytäkirjasta.

2.1.4. Ympäristövaikutukset

Pudotustiivistys aiheuttaa tärinää ja liikettä syvätiivistyskentän vaikutusalueella oleviin rakenteisiin. Näistä rakenteista on tehtävä riskianalyysi, jonka perusteella tehdään valvontamittauksia suunnitelmien mukaan. /8./ Pudotustiivistyksen vaikutusalueen laajuuteen vaikuttavat mm. tiivistyksessä käytettävä energiamäärä ja pohjaolosuhteet. Tärinän voimakkuutta kuvataan yleensä heilahdusnopeuden (v_{\max}) arvona [mm/s]. Ihmiset kokevat tärinän tason häiritsevänä kun v_{\max} 0,4-0,8 mm/s. Tämän oletuksen perusteella ympäristöselvitys pudotustiivistyksen tärinöistä olisi tehtävä 150-300 metrin etäisyydelle. Tärinän voimakkuuteen ja etenemiseen vaikuttavat mm. maapohjan tiiveys, tasalaa-

tuisuus, kerroksellisuus ja pystysuuntaiset muodonmuutokset sekä kovan pohjan etäisyys maanpinnasta. Tärinän voimakkuuteen rakenteisiin siirtyessä vaikuttaa mm. rakennuksen perustustapa, pohjamaa, rakennuksen materiaalit ja rakennuksen massiivisuus. Monien muuttujien takia on vaikea ennustaa kuinka pudotustiivistyksen tärinä vaikuttaa vaikutusalueellaan oleviin rakenteisiin. Vaikutusalue ja rakenteista tehtävät riskianalyysit määritetään tarkemmin aina hankekohtaisesti kelpoisuusvaatimukset täyttävän tärinäasiantuntijan toimesta. /10./ Esimerkiksi vuonna 2002 Helsingin Ruoholahden Saukonpaaden täyttöalueella tehdyssä tutkimuksessa tiivistettiin louhepengertä pudottamalla 20 tonnin painoista järkäletä 20 metrin korkeudesta ja pudotustiivistyksen vaikutusalueeksi pinta-aaltoseismisellä mittauksella saatiin 182 m. /11./

2.1.5. Veden vaikutus pudotustiivistyksessä

Louhepenkereen oma paino on pienempi veden alla kuin veden päällä, koska vesi aiheuttaa nostetta rakenteeseen. Tämän vuoksi veteen tehtävien täyttöjen tiiveys on huomionpieni kuin maalle tehtävien. Myöskään teoreettiseen tiivistysvaikutuksen maksimisyvyyteen ei veteen tehtävissä täytöissä päästä. Vedellä ei ole kuitenkaan suurta merkitystä louhepenkereen tiivistettävyyteen, koska tiivistettäessä vesi pääsee poistumaan suhteellisen esteettä penkereestä louheen suuren huokoisuuden ansiosta. Vesi voi myös parantaa louhepenkereen tiivistettävyyttä, koska vesi pienentää rakeiden välistä kitkaa. Kitkan ollessa pienempi tiivistystyötä tarvitaan vähemmän. Vedellä on heikentävä vaikutus pudotustiivistyksen tehokkuuteen ainoastaan, jos tiivistettävän kerroksen pinta on veden alla. Tällöin järkäleen iskeytyessä veteen osa pudotusenergiasta menee hukkaan. /12;13;14./

2.2. Työmaaliikenteen vaikutus louhepenkereen tiivistymiseen

Työmaaliikenteen aiheuttamaa tiivistysvaikutusta ei ole tutkittu riittävästi, jotta voitaisiin varmuudella todeta onko se riittävän tehokas menetelmä louhepenkereiden syvätiivistykseen. Käytännön tutkimustulosten puuttuessa asia jakaa asiantuntijoiden mielipiteitä. Kitkamaita tiivistettäessä tiivistys on tehokkainta, kun täryliikkeen värähdystaajuus on vähintään tiivistettävän materiaalin ominaisfrekvenssin suuruinen. Tällöin rakeiden välinen kitka pienenee tehokkaimmin. /1./ Louhepengertä rakennettaessa penkereen päällä ajetaan raskailla maansiirtoautoilla. Näistä ei kuitenkaan yleensä ole riittä-

vää hyötyä penkereen syvätiivistämisessä, koska työmaaliikenteestä ei synny oikean frekvenssin omaavaa tärinää, joka olisi lähellä tiivistettävän kerroksen ominaistaajuutta. Vaikka louhepenkereen yläpinta onkin epätasainen, maansiirtoautot ovat jousitettuja eikä siten riittävää tärinää synny. /13./

Suotuisissa olosuhteissa voisi olla kuitenkin mahdollista, että louhepengeri voidaan tiivistää pelkästään raskaiden maansiirtoautojen aiheuttavalla tiivistysvaikutuksella, mutta tämä edellyttää seuraavia asioita: penkereen korkeus ei saa olla kovin suuri, maansiirtoautojen massojen on oltava erittäin suuria sekä kuormituskertoja täytyy olla riittävästi. Myös penkereen toimintatarkoitus vaikuttaa tiivistysmenetelmän tehokkuuden riittävyteen. Ratapenkereillä maansiirtoautojen tiivistysvaikutus tuskin riittää, koska junien suuren painon vuoksi ratapenkeret vaativat erittäin hyvin tiivistetyn alusrakenteen. Esimerkiksi teiden alusrakenteena maansiirtoautojen tiivistysvaikutus voi ollakin riittävä. Louhetäyttöön käytetyn kiven ollessa hyvin heikkoa, maansiirtoautojen aiheuttama lähes staattinen tiivistysvaikutus voi olla suotuisampikin ratkaisu kuin raskas dynaaminen louheen kuormitus, koska tällöin kivi ei hienone liikaa. Etenkin veteen tehtävissä täytöissä hienoksi jauhautunut kivi häviää ajan myötä veden mukana louhepenkereestä aiheuttaen painaumia.

Tiivistettäessä maansiirtoautoilla kuormituksen tehokkuutta voidaan arvioida rengaspainumien sekä penkereen yläpinnan tasoa seuraamalla.

2.3. Pohjamaan tiivistyminen

Yleensä louhepenkeret tukeutuvat kallioon, mutta on myös mahdollista, että penkereen ja kallion väliin jää pehmeämpi maakerros, esimerkiksi silttikerrostuma. Painumien arvioimiseksi voidaan tämän väliin jäävän maakerroksen tiiveys mitata kairaamalla. Tällöin louhepenkereen alapintaan asti porataan maaputki, josta jatketaan kevyellä kairauksella, esimerkiksi painokairauksella. /13./

Pehmeämmän maakerroksen jäädessä pudotustiivistettävän louhetäytön ja kallion väliin on kiinnitettävä erityistä huomiota siihen, ettei louhepengertä tiivistetä liikaa dynaamisesti. Ylitiivistys voi aiheuttaa huokospaineiden nousun pohjamaassa, mikä merkitsee pohjamaan löyhtymistä. /14./

3. LOUHEPENKEREEN LAATU

3.1. Tiiviys

Louhepenkereiden tiivydelle ei ole annettu yleisiä vaatimuksia vaan tiiviysvaatimukset esitetään aina tapauksen mukaisesti suunnitelma-asiakirjoissa. /8./ Louheen rakeisuudella on suuri merkitys penkereen tiiveyteen. Sekarakeisella louheella huokoisuus on pienempi kuin tasarakeisella ja näin päästään suurempiin tilavuuspainoihin ja parempaan tiiveyteen. Tasarakeisella louheella saavutettava kuivatilavuuspaino on pienempi ja siten myös tiiveys huonompi kuin sekarakeisella louheella. /14./

Louheen karkearakeisuuden vuoksi muille maalajeille soveltuvat laboratorio- ja in-situ -mittausmenetelmät eivät sovellu louhepenkereen ominaisuuksien määrittämiseen. Tiiviys varmistetaan joko mittauksin tai vähintään työtapatarkkailuun perustuvalla valvonnalla. Työtapatarkkailun yhteydessä käytettävien työmenetelmien soveltuvuudesta paikallisiin olosuhteisiin varmistetaan mittauksin sekä työtä aloitettaessa että silloin, kun rakentamisessa käytettävän materiaalin laatu, kosteustila tai rakentamisolosuhteet muuttuvat. /8./

Ainoa yleisesti hyväksytty louhepenkereeseen kohdistuvan tiivistystyön laadun varmistamiseen soveltuva mittausmenetelmä on pinnan painuman mittaus, kuten pudotustiivistyksen laadun varmistamisessa tehdään. /15./ Mittaamalla raskaiden maansiirtoautojen aiheuttamaa painumaa louhepenkereen pinnalla voidaan myös arvioida penkereen tiiveyttä /16/.

Pudotustiivistyksen onnistumista tarkkaillaan työtapatarkkailun lisäksi pudotuskraatteiden painumien perusteella. Jos suunnitelma-asiakirjoissa ei ole muuta määrätty, painumat saavat olla enintään 100 mm. /8./ Myös hidastuvuusmittauksia kannattaa suorittaa varsinkin jos painumien suuruuden määrittämisessä on epäselvyyksiä. Hidastuvuusmittauksien on todettu olevan luotettavin tapa selvittää pudotustiivistyksen tehokkuus. /14./

Ratarakenteissa ratojen kiilauskerroksen tiiveyttä valvotaan työmenetelmätarkkailun lisäksi levykuormituskokein kunkin raiteen kohdalla 150 m:n välein ja penkereen reunoilla 300 m:n välein vuorotellen molemmin puolin. /8./

3.2. Kantavuus

Tiivistystyön laatua voidaan arvostella myös penkereen kantavuuteen perustuvalla menetelmällä. Louhepenkereiden kantavuudelle ei ole annettu yleisiä vaatimuksia vaan kantavuusvaatimukset esitetään aina tapauskohtaisesti suunnitelma-asiakirjoissa. /8./ Louhepenkereen kantavuusmittauksien määrä osoitetaan suunnitelma-asiakirjoissa, joissa esitetään millä tarkkuudella, miten ja kuinka usein suunnitellun laadun saavuttaminen mitataan. /8./

Levykuormituslaitteistolla saadaan kantavuutta kuvaavia lukuja E_1 - ja E_2 -arvo. Mitä pienemmän muodonmuutoksen rakenteeseen kuormitus aiheuttaa, sitä suurempi kantavuus on ja sen tiiviimpi rakenne. /1./ Suhdeluku E_2/E_1 kuvaa rakenteellista tiiveyttä. Levykuormituslaitteisto mittaa vain rakenteen pintaosaa alle metrin syvyydellä, joten korkeissa penkereissä se ei anna luotettavaa tulosta koko penkereen kantavuudesta.

Louhepenkereen vakavuutta tarkasteltaessa voidaan käyttää ylipenkereitä. Ylipenger tarkoittaa penkereen päälle tehtävää ylimääräistä täyttöä, joka edistävää ja nopeuttaa penkereen painumista. Niitä voidaan käyttää myös koekuormina penkereelle. /1./ Tällöin penkereen poikkileikkauksiin asennetaan painumamittareita, jotka mittaavat jatkuvasti penkereen painumista. Ylipenger voidaan poistaa, kun mittaukset selvästi osoittavat painumanopeuden hidastuneen. Yleensä ylipenkereet pidetään vähintään kolme kuukautta. /1./

3.3. Ympäristö

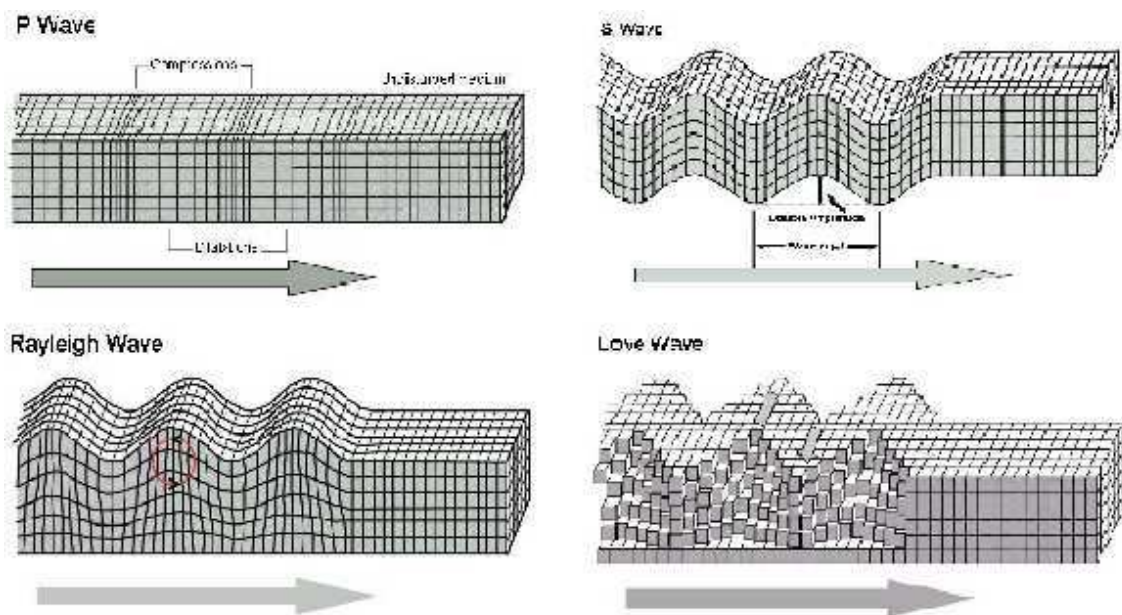
Erityisesti pudotustiivistys, mutta myös raskas työmaaliikenne aiheuttaa maahan ja sitä kautta lähellä oleviin rakenteisiin värähtelyä. Pudotustiivistyksestä aiheutuva tärinä yleensä pienenee siirtyessään rakenteisiin, mutta työmaaliikenteen aiheuttama tärinä voi jopa kaksinkertaistua siirtyessään maasta perustusten kautta ylärakenteiden värähtelyksi. /10./ Kaikkien maan värähtelyjä aiheuttavien koneiden vaikutus otetaan huomioon työ- ja laaduntarkkailusuunnitelmissa /8/.

3.4. Geofysikaaliset erikoistutkimukset

Syvätiivistettävien louhepenkereiden lujuutta on vaikea todistaa sen karkearakeisuuden vuoksi. Geofysikaalisista erikoismittauksista seismiikkaan ja sähkömagnetismiin perustuvilla mittauksilla on mahdollista tutkia maaperän rakennetta ainetta rikkomattomilla menetelmillä. Näillä mittauksilla ei varsinaisesti ole tutkittu louhepenkereiden lujuusominaisuuksia, mutta menetelmiä soveltamalla voisi olla mahdollista todentaa myös louheesta rakennetun penkereen laatu.

3.4.1. Seismiset menetelmät

Seismisissä mittausmenetelmissä aikaansaadaan maassa kulkevia kimmoaaltoja, joiden etenemisen nopeuden perusteella voidaan tutkia maaperän sisäistä rakennetta ja ominaisuuksia. Aallot saadaan aikaan joko räjäytyksin, jolloin puhutaan räjäytysseismiikasta tai vasaralla jolloin puhutaan vasaraseismiikasta. On myös olemassa pudotuspainolaitteita, joilla saadaan vasaraniskua enemmän energiaa maahan. /18./ P- ja S-aallot ovat ns. runkoaaltoja ja pinta-aaltoja ovat Rayleigh aalto (R-aalto) ja Love aalto (kuva 7).



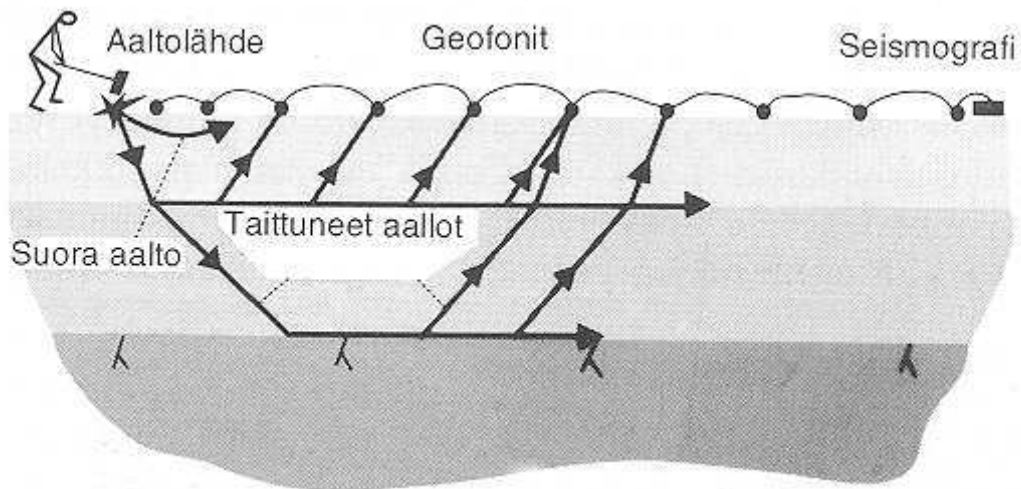
Kuva 7. Aaltotyyppien liikeradat /19/

Seismisten mittausten käyttökohteena on ollut mm. maapeitteen paksuus, kallioperän rakenne, pohjavesipinta, maalajit sekä kallion elastisten ominaisuuksien määrittäminen. Seismisiä mittauksia ei ole käytetty ainakaan Suomessa louhepenkereen tiiveyden mit-

taukseen, mutta asiantuntijoiden mukaan tämän tyypisillä mittauksilla olisi hyvät onnistumismahdollisuudet analysoida louheen tiiveys, koska aaltojen etenemisen nopeus on riippuvainen mitattavan materiaalin tiiveydestä. Mitä tiiviimpää materiaali on, sen nopeammin aalto etenee maassa. Etenemisnopeuteen vaikuttavat myös vesipitoisuus ja pohjaveden sijainti. Menetelmällä ei saada kuitenkaan suoraan tiiveyttä kuvaavia lukuja. /20./

Taantumis- eli refraktioluotaus

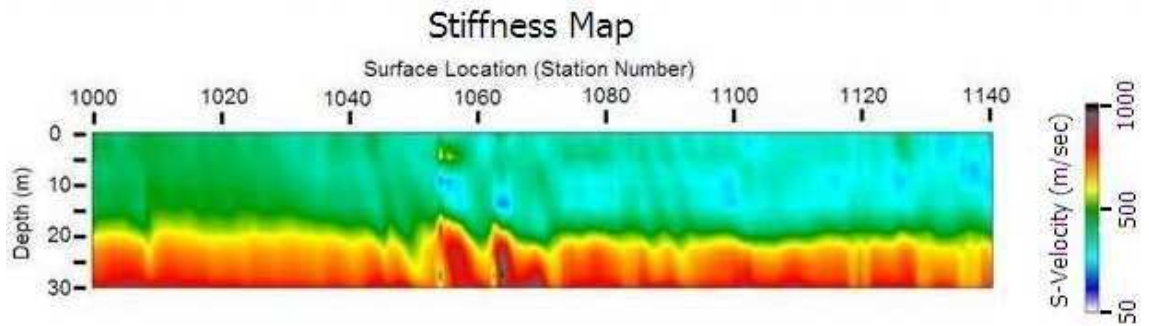
Seisminen refraktioluotaus perustuu elastisten aaltojen etenemiseen maaperässä. Maaperään synnytetään mekaanisesti joko räjäyttämällä tai iskemällä P- eli puristusaalto. Maanpinnalla rekisteröidään eri maakerroksista taittuneet aallot liike- tai paineherkillä vastaanottimilla eli geofoneilla. Nämä geofonit rekisteröivät aallon saapumisen ja seismografi tallioi ajan joka eri P-aaltorintamilta kuluu matkaan mekaanisesta aaltolähteestä takaisin maanpinnalle (Kuva 8). /21./



Kuva 8. Seisminen refraktioluotauksen periaate /21/

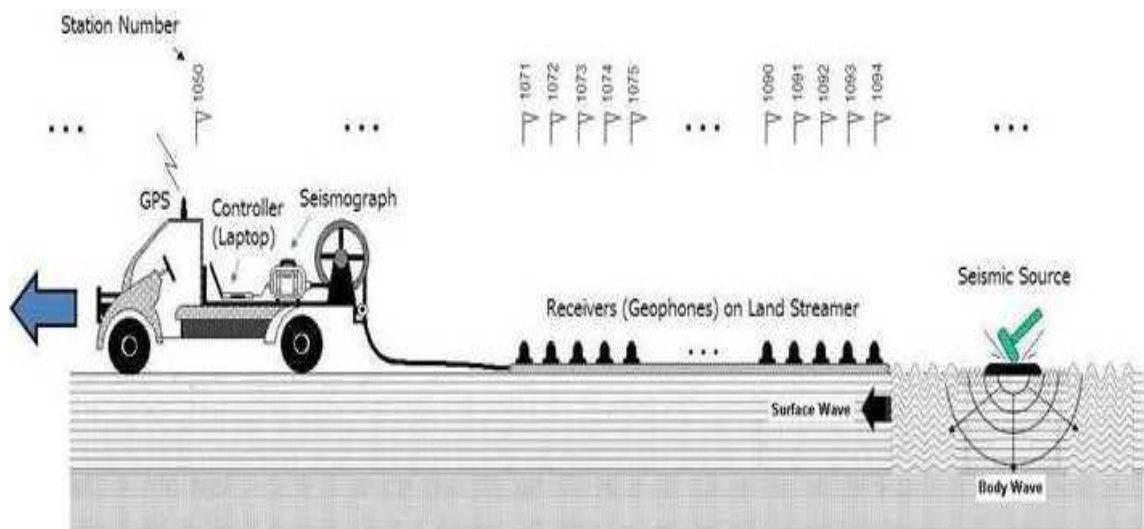
Pinta-aaltoseismiikka

MASW (the multichannel analysis of surface waves) on pinta-aaltoseismiikkaan perustuva mittausmenetelmä jossa mitataan seisminen lähteen maaperään aikaansaamien pinta-aaltojen ja sitä kautta S-aallon etenemisnopeutta (kuva 10). S-aallon nopeus on yhteydessä rakenteen kimmokertoimeen ja MASW:ia onkin käytetty mm. maaperän kantavuuden analysointiin.

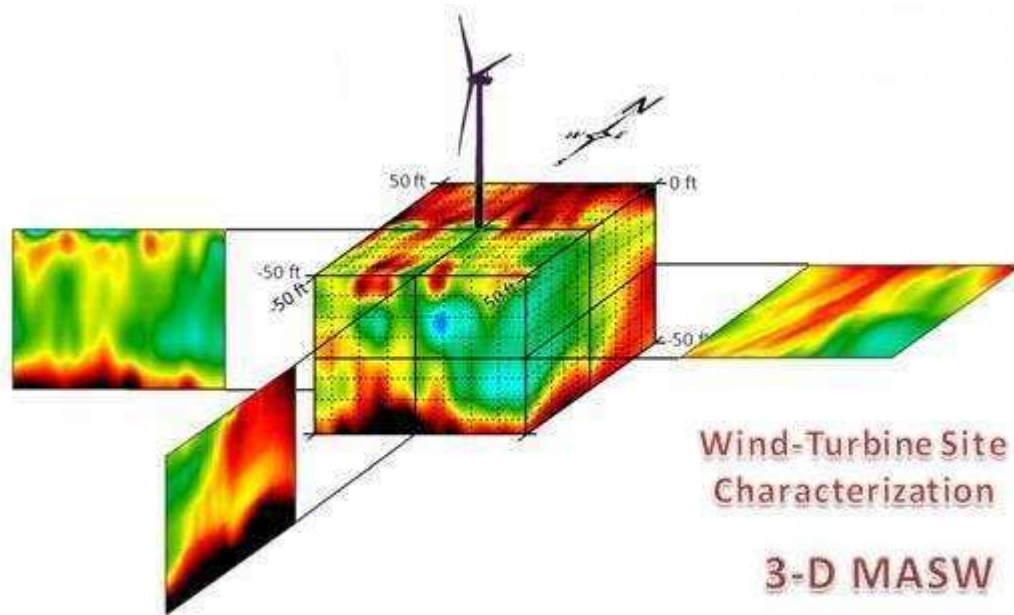


Kuva 9. 2D-kuva S-aallon nopeusrakenteesta /22/

Lopputuloksena saadaan 1D-, 2D- ja 3D-kuvaa S-aallon etenemisnopeudesta rakenteessa (kuvat 9 ja 11). /22./ Menetelmällä on mahdollista saada periaatteessa samankaltaista tietoa louhepenkereen laadusta kuin seismisellä refraktioluotauksella. S- ja P-aaltojen nopeuksien kautta on mahdollista laskea suoraan teknisiä parametrejä kuten kimmokerroin ja leikkausmoduuli, mutta tutkittavassa rakenteessa ja mitatussa datassa voi olla merkittäviä virheitä, joten pelkkiin laskelmiin ei kannata täysin luottaa. /20./



Kuva 10. MASW:n periaate /22/



Kuva 11. MASW:sta saatu 3D-kuva S-aallon nopeusrakenteesta tuulivoimalan perustuksissa /22/

Koska seismisiä menetelmiä ei ainakaan Suomessa ole käytetty louhepenkereen tiiveyden tai kantavuuden mittauksiin, paras tapa varmistua penkereen laadusta olisi vertailla seismiikan tuloksia jonkun valmiiksi pudotustiivistetyn louhepenkereen kanssa. /20./

3.4.2. Sähkömagneettiset menetelmät

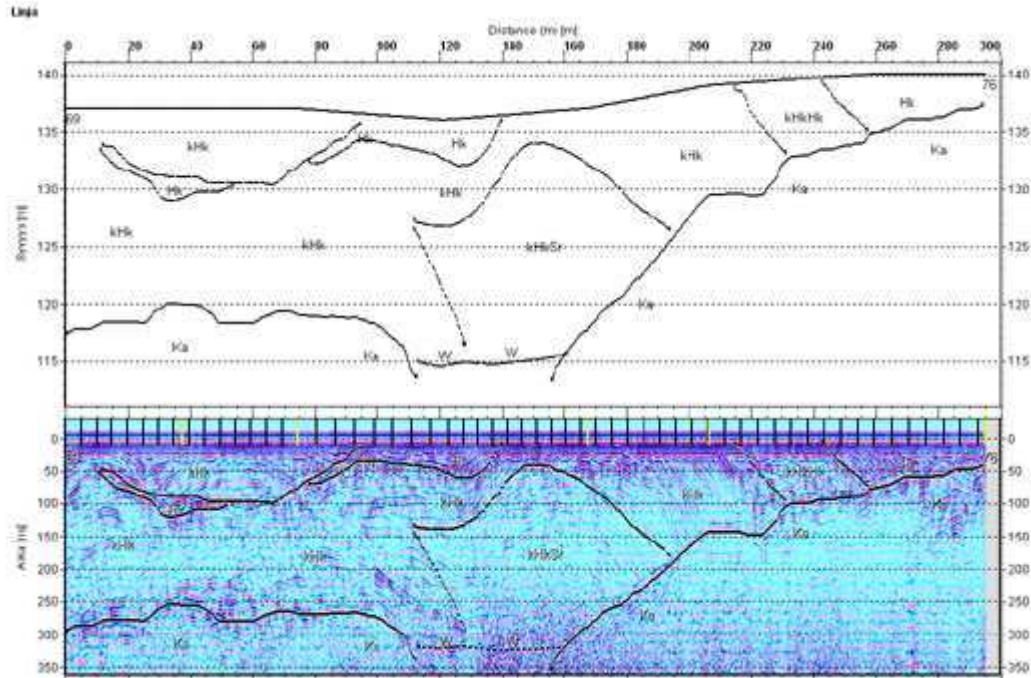
Sähkömagneettiset mittausmenetelmät perustuvat maaperän sähkönjohtavuuden mittaukseen ja näihin mittauksiin on kehitetty suuri joukko tekniseltä toteutustavaltaan hyvinkin erilaisia maastomittausmenetelmiä. Maatutkaluotaus on yksi tällainen.

Maatutkaluotaus

Maatutkaluotaus perustuu sähkömagneettisten aaltojen käyttöön. Maahan lähetetään antenniyksikön avulla sähkömagneettisia aaltoja lyhyinä pulsseina tai jatkuvina aaltoina ja vastaanottimella seurataan maasta saatavia heijastuksia. Aalto etenee maaperään heijastuen osittain takaisin sähköisesti muuttuvista rajapinnoista. Takaisin heijastuneen aaltoenergian voimakkuus eli amplitudi ja aallon edestakaiseen matkaan kulunut aika rekisteröidään tutkalaitteiston avulla. Aallon etenemiseen väliaineessa vaikuttaa sähkönjohtavuus, permittiivisyys ja aallon taajuus. /18./

Tutkaus voidaan tehdä kävellen tai melkein minkä tahansa moottoriajoneuvon avulla. Lopputuloksena saadaan pituusleikkaus maaperästä, josta näkyy maakerrokset ja niiden

paksuudet. Paksuudet korreloivat aaltojen edestakaiseen matkaan kuluneen ajan kanssa, joten tutkauksesta saadaan myös tulosteena aaltojen aikaprofiili tutkitussa maaperässä (kuva 12). /23./



Kuva 12. Maatutkaluotauksen lopputulos /23/

Tutkapulssin etenemisestä ja takaisinheijastumisesta voidaan tulkita maaperässä olevia maalajirajoja. Maatutkaluotausta on käytetty maaperätutkimuksissa mm. maakerrosten paksuuksien, kalliopintojen rakoilun, pohjaveden sekä saastuneiden alueiden tutkimuksiin. Luotausta on käytetty myös tienpohjien, rautateiden ja rakennusten perustusten rakenteen tutkimiseen. /18;23./

Louhepenkereen laadunvarmistusmenetelmäksi ei maatutkaluotaus itsekseen riitä, mutta yhdessä seismisen refraktioluotauksen kanssa sillä voitaisiin analysoida penkereen laatua; seismisellä luotauksella analysoidaan penkereen tiiveys ja maatutkaluotauksella varmistetaan penkereen tasalaatuisuus. /20./

4. TEHTYJÄ HANKKEITA

4.1. Saukonpaaden täyttöalue

Saukonpaaden täyttöalue sijaitsee Helsingin Ruoholahdessa. Urakka sisältää merialueelle tehtävää louhetäyttöä, joka tiivistetään pudotustiivistyksenä. Alueelle tullaan rakentamaan mm. kerrostaloja. Täyttöalue ulottuu noin 70 m merelle päin ja alueen pinta-ala on noin 2,8 ha. Rakennustyöt ovat tällä hetkellä käynnissä ja urakan on katsottu valmistuvan vuoden 2012 aikana. /11./

4.1.1. Pohjaolosuhteet

Uusi täyttöalue on louheella täytettyä merialuetta. Luonnontilainen savikerros on poistettu ruoppaamalla siltin yläpintaan saakka. Täytön alueella peruskallion päällä on silttiä, hiekkaa, soraa ja moreenia. Osa alueesta on vanhaa täyttöä, joka on rakennettu 1980-luvun lopussa. Vanha alue sisältää sekalaista kitkamaata. /11./

4.1.2. Pudotustiivistyskalusto

Pudotuslaitteena käytetään tela-alustaista ristikkopuominosturia. Pudotuspainoina käytetään 11, 17 ja 25 tonnin painoisia järkäleitä. Suunnittelijan mukaan järkäleen massan tulee olla vähintään 50 kN/järkäleen pohjan m², mutta ei kuitenkaan yli 75 kN/järkäleen pohjan m². Esimerkiksi 25 tonnin järkäleen halkaisijan suositeltaisiin olevan 2 060 mm:n ja 2 540 mm:n väliltä. /11./

4.1.3. Pudotustiivistyksen suoritus

Pudotustiivistys on suunniteltu siten, että maksimitiivistymissyvyys on louhetäytöissä 13...15 m. Maksimitiivistymissyvyyden laskemisessa on käytetty tiivistettävästä materiaalista riippuvan kertoimen k arvona 0,75. Tiivistykset suoritetaan louhetäyttöjen osalta kaksivaiheisena tiivistyksenä. /11./

Taulukko 4. Pudotustiivistys kentillä KA1-KA9 /11/

	Ensimmäinen vaihe	Toinen vaihe
Järkäleen massa	25 tn	17 tn
Pudotuskorkeus	18 m	10 m
Pudotusruudukko	5 m * 5 m	2,5 m * 2,5 m
Pudotuskierrokset	4 kpl	2kpl
Pudotukset/ kierros	1. kierroksella 3 kpl/piste ja muilla kierroksilla 6kpl/piste	3kpl/piste
Laatuvaatimus	Kahden viimeisen pudotuksen yhteispainuma < 20 cm	Kahden viimeisen pudotuksen painuma < 10 cm

Taulukko 5. Pudotustiivistys kentillä KB1-KB11 /11/

	Ensimmäinen vaihe	Toinen vaihe
Järkäleen massa	25 tn	11 tn
Pudotuskorkeus	18 m	10 m
Pudotusruudukko	5 m * 5 m	2,5 m * 2,5 m
Pudotuskierrokset	4 kpl	2kpl
Pudotukset/ kierros	3kpl/piste	3kpl/piste
Laatuvaatimus	Kahden viimeisen pudotuksen yhteispainuma < 20 cm	Kahden viimeisen pudotuksen painuma < 15 cm

Louhetäytöt on jaettu kenttiin KA ja KB. Taulukoissa 4 ja 5 esitetään kaksivaiheisen pudotustiivistyksen lähtökohdat Saukonpaaden täyttöalueella. /11./ Pudotustiivistyskartta alueelta löytyy liitteestä 4.

4.1.4. Laadunvalvonta

Järkäleestä aiheutuvien painumien tarkkailun lisäksi kenttien KA1-KA9 toisen vaiheen pudotuksia seurataan hidastuvuusmittauksin. Tärinöitä tarkkaillaan alueella tärinämittauslaitteilla, jotka on sijoitettu 150 m:n säteelle pudotusalueesta. Pudotuspöytäkirjat täytetään normaalisti. /11./

4.2. Muita hankkeita

Helsingin Vuosaassa sijaitsevan ulkomaankaupan pääsatama on yksi suurimmista satamahankkeista Suomessa. Sataman rakennustyöt tehtiin vuosina 2003–2008. Koko satama-alue on kooltaan 150 ha, joista 90 ha merestä täytettyä uutta aluetta. /17./

Täyttöalueiden pohjat ovat siis merenpohjaa ja täytteenä on käytetty louhosta, merihiekkaa, moreenia ja jopa voimalaitostuhkaa. Tiivistettävien kerroksien paksuudet ovat vaihdelleet muutamista metreistä aina lähelle 20 metriä. /12./

Pudotustiivistyksessä käytetyt koneet ovat 80–130 tonnin tela-alustaisia ristikkopuominostureita. Vuosaaren pudotustiivistyskentillä on pudotettu yhteensä lähes miljoona pudotusta 10–25,5 tonnin järkäleillä. Pudotuskorkeudet ovat olleet 9 metristä aina reiluun 20 metriin asti. /5;12./

Pudotustiivistyksellä on mahdollista tiivistää erittäin laajoja ja vaativiakin kohteita. Hyvä esimerkki on Nizzan lentokentän tiivistystyöt Ranskassa, jossa käytettiin nosturia, joka pystyy nostamaan 100 tn painoisen järkäleen 40 m:n korkeuteen (kuva 13). /24./



Kuva 13. Nizzan lentokentän tiivistys pudotustiivistyksenä /24/

Nosturi oli suunniteltu ja valmistettu yksinomaan tälle työmaalle. Nosturin kokoa voi verrata ihmiseen, joka kävelee kuvassa pudotuspainon vieressä. /24./

5. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

5.1. Pudotustiivistyksen suunnittelu ja toteutus

Insinööriyön tavoitteena oli tutkia pudotustiivistystä louhepenkereen syvätiivistysmenetelmänä ja laatia työohje, jota voidaan hyödyntää tulevaisuudessa pudotustiivistystä sisältävissä rakennushankkeissa. Pudotustiivistyksen on todettu sopivan erittäin hyvin karkearakeisten kitkamaalajien syvätiivistysmenetelmäksi. Taulukosta 2 voidaan todeta, että juuri louhetta tiivistettäessä pudotustiivistys on tehokkaimmillaan. Asiantuntijoidenkin kokemukset pudotustiivistyksestä ovat olleet positiivisia. Menetelmä sopii hyvin myös veteen tehtävien täyttöjen tiivistämiseen.

Suomessa pudotustiivistyksen suunnittelu on pohjautunut kokemusperäiseen tietoon. Liitteessä 3 esitetty laskelma pudotustiivistyksen pudotusten lukumäärästä per solmupiste näyttäisi antavan tuloksen, jota voi pitää alakanttiin laskettuna, jos vertaa sitä Suomessa toteutuneisiin pudotustiivistyshankkeiden pudotusmääriin. Esimerkiksi Saukonpaaden täyttöalueella kentillä KA1-KA9 suunnitelmien mukaan suoritetaan kahdessa vaiheessa yhteensä 27 pudotusta. Laskelmien kautta kyseisille kentille saadaan maksimissaankin vain 18 pudotusta.

Pudotustiivistyksen suunnittelussa kannattaa kiinnittää huomiota myös tiivistettävän louheen laatuun. Louheen ollessa erittäin heikkolaatuista, voidaan sen liialliseen murenemiseen vaikuttaa käytettävällä pudotusenergialla ja pudotusten lukumäärällä.

Pudotuspainon muoto ja pudotusalustan vaikuttavat olennaisesti tiivistyksen tehokkuuteen. Kallion etäisyys tiivistettävän kerroksen pinnasta on merkittävässä roolissa tiivistyksen tehokkuuden suhteen. Perinteisestä maksimi tiivistymissyvyyden laskukaavasta modifioitu kaava 2 ottaa tämän huomioon. Mitä lähempänä kallio on arvioitua maksimi tiivistymissyvyyttä, sen tehokkaampaa tiivistys on, koska maassa kulkevat pudotuspainon iskusta aiheutuvat iskuaallot heijastuvat takaisin kallion pinnasta. Perinteinen kaava (kaava 1.) on kuitenkin yleisimmin hyväksytty ja käytetty pudotustiivistyksen suunnittelussa.

Nykypäivänä rakentamisesta aiheutuneisiin melu- ja värinähaittoihin kiinnitetään entistä enemmän huomiota. Pudotustiivistyksen aiheuttamaa värinää on tutkittu Suomessa muu-

tamissa kohteissa, mutta tarkkaa ohjetta siitä miten tärinä siirtyy vaikutusalueella oleviin rakenteisiin ei ole. Tutkimuksissa rakennukset sijaitsivat lähimmillään yli 100 metrin etäisyydellä tiivistyskohteesta, eikä näissä rakennuksissa havaittu rakenteita vaurioittavaa tärinää. Pudotustiivistystä ei yleensä suoriteta rakennusten välittömässä läheisyydessä. Tutkimuksessa pudotustiivistyksen todettiin vaikuttavan ainoastaan vaikutusalueellaan oleviin tärinäherkkiin elektronisiin laitteisiin. Yleensä paras tapa arvioida tärinän siirtymistä maasta rakenteisiin on verrata tilannetta aikaisempiin vastaaviin tilanteisiin, koska tärinän käyttäytymistä on erittäin hankala ennustaa laskelmilla. Korkeataajuinen tärinä voi voimistua rakenteissa ja heijastua meluksi, mutta pudotustiivistyksen tärinän hallitseva taajuusalue on niin matala (5-25 Hz) ettei meluongelmaa siitä synny. /10./

5.2. Louhepenkereiden laadunvalvonta

Louhepenkereiden laadunvalvonta on vaikeaa. Perinteisiä laadun varmistusmenetelmiä ei voida louheen karkearakeisuuden vuoksi käyttää. Pääasiassa tiivistysmenetelmästä riippumatta tiiveys arvioidaan louhepenkereestä sen pinnan painumia mittaamalla, kuten myös pudotustiivistyksessä. Geofysikaalisista erikoistutkimuksista seismisillä ja sähkömagneettisilla tutkimuksilla on mahdollisuus tutkia louhepenkereen lujuusominaisuuksia, mutta niitä ei ole vielä käytetty tähän tarkoitukseen ja siksi ne vaativat lisää tutkimuksia, jotta niillä voitaisiin luotettavasti todentaa louhepenkereen laatua. Suomessa on kehittymätön geofysikaalisten erikoismittauksien kulttuuri, eikä mielellään tehdä ns. turhia mittauksia, koska ne maksavat ja vievät aikaa. Näitä kahta edellä mainittua mittausmenetelmää kannattaisi kuitenkin tutkia enemmän käytännössä, koska niistä voisi olla hyötyä louhepenkereiden laadun varmistamisessa.

LÄHTEET

- /1/ Hartikainen, Olli-Pekka. *Maanrakennustekniikka*. Otatieto Oy: Helsinki. 2005.
- /2/ Rantamäki, Martti – Tammirinne, Markku. *Pohjarakennus*. Otatieto Oy: Helsinki. 2006.
- /3/ Vuola, Pekka. *Dynamic compaction of saturated sand*. Lisensiaatintutkimus. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere: 1996.
- /4/ Pekkaniska Oy, *Syvätiivistys*. [verkkodokumentti]. 28.1.2010 Julkaisuaika tuntematon. Saatavissa: <http://www.pekkaniska.com/content/view/63/253/lang.fi/>
- /5/ *250 000 pudotusta*. Rakennuslehti. nro 31/2007. 4.10.2007.
- /6/ Pekkaniska Oy, *Syvätiivistyslaitteet*. [verkkodokumentti, PDF] 28.3.2006 [päivitetty 12.4.2006]. [viitattu 28.1.2010]. Saatavissa: http://www.pekkaniska.com/images/stories/pdf/pekkaniska_crawler_cranes_liebherr_hs885hd.pdf
- /7/ Kujala, Jukka. *Paalulaattarakenteiden suunnittelu*, Tiehallinto. Helsinki: 2005
- /8/ *Infra RYL 2006, Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset 2006, Osa 1: Väylät ja alueet*, Rakennustietosäätiö RTS, Otatieto Oy: Helsinki. 2006.
- /9/ Das, Braja M., *Principles of foundation engineering*. Brooks/Cole-Thomson Learning. The United States of America. 2004.
- /10/ Tampereen teknillinen yliopisto, *Rakentamisen aiheuttamat värinät -tutkimushanke, taustaselvitykset..* [verkkodokumentti, PDF]. 18.6.2009 [viitattu 1.4.2010]. Saatavissa: <http://www.sgy.fi/web/page.aspx?pageid=72843>
- /11/ Korhonen, Osmo – Viljanen, Jari. *Pudotustiivistys Saukonpaaden täyttöalueella*. Helsingin kaupungin geotekninen osasto. 2002.

- /12/ Olkkonen, Jaakko. Vastaava työnjohtaja, Niska & Nyyssönen Oy. [haastattelu]. 8.2.2010
- /13/ Gulin, Kai. Business Area Manager, Ground Engineering. WSP Finland Oy. [haastattelu]. 1.3.2010
- /14/ Lotvonen, Sakari, TkL. Pöyry Environment Oy. [haastattelu]. 8.3.2010
- /15/ Tiehallinto, *Tie- ja geotekniikan teemapäivät 2004, Tiivistyksen tarkkailu*. [verkkodokumentti, PDF] 5.4.2004 [viitattu 16.3.2010]. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/tiejageo/pdf/tkallionpaatiivistys.pdf>
- /16/ Pöyry Finland Oy, *Valtatie 5 parantaminen välillä Päiväranta – Vuorela, Lausunto ratapenkereen tiivistämisestä maansiirtoautoilla*. 15.2.2010
- /17/ Terramare Oy, *Terramare rakentamassa Vuosaaren satamakeskusta*. [verkkodokumentti,PDF] 26.2.2009 [viitattu 12.3.2010]. Saatavissa: http://www.terramare.fi/?Ty%F6kohteet_ja_referenssit
- /18/ Peltoniemi, Markku. *Maa- ja kallioperän geofysikaaliset tutkimusmenetelmät*. Ota-kustantamo. Espoo. 1988.
- /19/ Korkealaakso, Juhani – Törnqvist Jouko. *Geofysikaaliset mittaukset pohjaolojen tutkimuksessa*. [verkkodokumentti, PDF]. 25.1.2005. [viitattu 22.3.2010]. Saatavissa: [akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/./geofys240105 .pdf](http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/./geofys240105.pdf)
- /20/ Sipola, Ville. Geofyysikko. Suomen Malmi Oy. [haastattelu] 19.3.2010
- /21/ Suomen geoteknillinen yhdistys ry. *Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät*. Rakennustieto Oy. 1993.
- /22/ MASW. *The multichannel analysis of surface waves*. [verkkodokumentti]. 4.2.2009 [viitattu 22.3.2010]. Saatavissa: <http://www.masw.com/index.html>
- /23/ Geo-Work Oy. *Maatutka*. [verkkodokumentti]. Julkaisuaika tuntematon. [viitattu 23.3.2010]. Saatavissa: <http://www.geo-work.com/Maatutka.html>

/24/ DGI-Menard Inc., *Dynamic compaction, Nice Airport (France)*. [verkkodokumentti]. Julkaisuaika tuntematon. [viitattu 23.3.2010]. Saatavissa: <http://www.dgi-menard.com/niceairport.html>

Liite 2**ESIMERKKI MAKSIMITIIVISTYMISSYVYYDEN LASKEMISESTA**

8 metriä korkea louhepenger rakennetaan kallion varaan.

Pudotuspainon massa on 150 kN (n. 15,3 tonnia) ja pudotuskorkeus 11 metriä.

1. Arvioidaan maksimi tiivistymissyvyys kaavalla 1.

$$D_{\max} = k * \sqrt{(m * H)} \quad (\text{kaava 1.})$$

Louhetäyttöä vastaavan k-kertoimen arvona käytetään 0,65

$$k = 0,65$$

$$m = 15,3$$

$$H = 11$$

$$\text{eli, } D_{\max} = 0,65 * \sqrt{(15,3 * 11)} \approx 8,5 \text{ m}$$

Maksimi tiivistymissyvyys perinteisen laskukaavan mukaan on n. 8,5 metriä.

2. Kaavan 1 antamaa tulosta voidaan tarkentaa kaavalla 2. Tällöin otetaan huomioon myös pudotusalustan laatu sekä kallion etäisyys tiivistettävästä pinnasta.

$$D_{\max} = f_C * f_M * f_B * \sqrt{(m * H)} \quad (\text{Kaava 2.})$$

Oletetaan, että pudotusalusta tehdään hyvin huolellisesti, joten kerroin f_C on 1.

Kaavan 1 tuloksen perusteella kallio on maksimi tiivistymissyvyudessa, joten kertoime-
na f_B voidaan käyttää arvoa 1,7.

$$\text{eli, } D_{\max} = 1 * 0,65 * 1,7 * \sqrt{(15,3 * 11)} \approx 14 \text{ m}$$

Maksimi tiivistymissyvyys on 14 metriä.

Liite 3

ESIMERKKI PUDOTUSTEN LUKUMÄÄRÄN LASKEMISESTA

- Pudotuspainon massa tonneina (m) 15,3 tn / kilonewtoneina (W_H) 150 kN
- Pudotuskorkeus (H) 11 m
- Tiivistettävästä materiaalista riippuva kerroin k on 0,65 (louhe)
- pudotuspainon pohjan pinta-ala (A) 3,00 m² ja halkaisija (D) 1,96 m (pudotuspainon poikkileikkausmitat on määritetty siten, että 50kN/pohjan m² täyttyy)

1. Lasketaan ensin maksimi tiivistymissyvyys (D_{\max}/S_z)

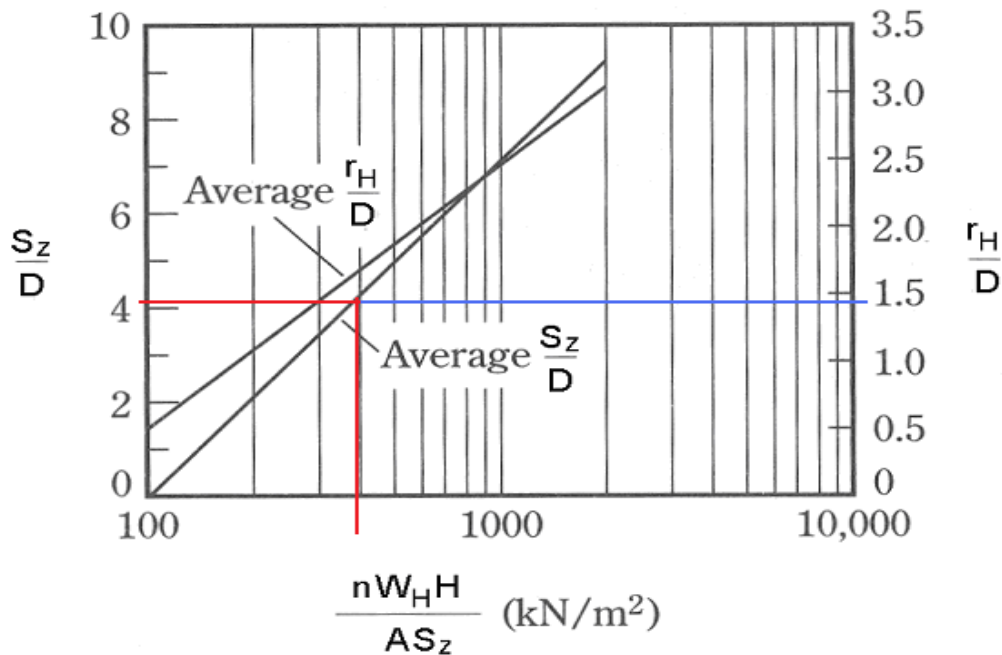
$$D_{\max} = k * \sqrt{(m * H)} \Rightarrow D_{\max} = 0,65 * \sqrt{(15,3 * 11)} \approx 8m$$

2. Lasketaan maksimi tiivistymissyvyyden suhde pudotuspainon halkaisijaan (s_z/D)

$$\frac{8}{1,96} \approx 4,1$$

3. Katsotaan (kN/m²) arvo kuvaajasta saadun suhteen perusteella.

$$4,1 \Rightarrow 400$$



4. Lasketaan pudotuskertojen lukumäärä n

$$n = \frac{A * S_z * x}{H * W_H}$$

, missä

A on pudotuspainon pohjan pinta-ala [m²]

S_z on maksimi tiivistymissyvyys [m]

x on kohdassa 3. kuvaajasta saatu arvo (400)

H on pudotuskorkeus [m]

W_H pudotuspainon massa [kN]

$$n = \frac{3,00 * 8,5 * 400}{11 * 150} \approx 6,2$$

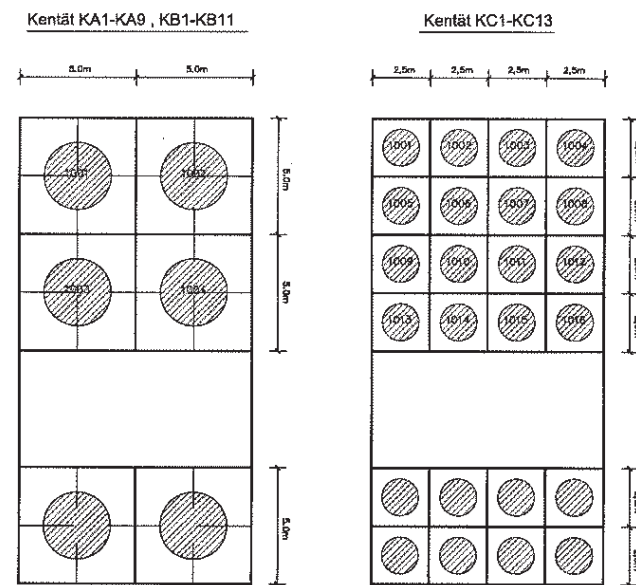
Saatu luku pyöristetään ylöspäin lähimpään kokonaislukuun ⇒ 7

Pudotusten määrä/pudotuskohta on 7 kpl

5. Lasketaan solmupisteiden etäisyys määrittämällä kuvaajasta r_H/D

$$r_H/D = 1,4 \Rightarrow r_H = 1,4 * D \Rightarrow r_H = 1,4 * 1,96 = 2,7$$

Pudotuskartan solmupisteiden etäisyys toisiinsa nähden on 2,7 m.



Pudotuskierron ja -kertojen määrät on esitetty työselityksessä

(+2.30) Pudotustiivistyksen iskulustan yläpinnan taso (louhetätön yläpinta +2.0, iskulustan paksuus 0,3 m)

B		A	
HELSINGIN KAUPUNKI RAKENNUSVIRASTO		Katu- ja puisto-osasto p. (09) 310 1001 f. (09) 310 38328 www.hsr.fi e-posti: rakennusvirasto@helsinki.fi	
KAUP. OSA- ALUE 20. Länsisatama SAUKONPAADEN ESIRAKENTAMINEN Täyttösuunnitelma			
Pudotustiivistyskartta			
MK 1:500	LIITTY KORVAA KORVATTU	NRO 29566/101	KHS K HYV. B.6.2009 TARK. B.6.2009 LAAT. B.6.2009
Osmo Tarvinen Juha Lahti		Ramboll	
Ramboll Finland Oy Laulukatu 6 00420 HELSINKI puh. 020 755 7400 fax 020 755 7401		GEOTÄNNÖN OSASTO HELSINGIN KAUPUNKI www.geotekniska.fi PVM. 8.6.2009 GEON PROJEKTINUMERO 11502 HYV. Osmo Korhonen	
RAMBOLL		Plir. O.Kattunen Tark. J.Havukainen Hyv.	