



# **TÄRYLEVYN KÄYTTÖ MAARA- KENTEIDEN TIIVISTYSTYÖN TARKKAILUSSA**

Mikko Asunen

Matti Mäkelä

Opinnäytetyö  
Maaliskuu 2013  
Rakennustekniikka  
Infrarakentaminen

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikka  
Infrarakentaminen

MIKKO ASUNEN & MATTI MÄKELÄ:

### TÄRYLEVYN KÄYTTÖ MAARAKENTEIDEN TIIVISTYSTYÖN TARKKAILUS- SA

Opinnäytetyö 70 sivua, joista liitteitä 4 sivua  
Maaliskuu 2013

---

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia voidaanko tärylevyn y-akselin suuntaista kiihtyvyyttä mittaamalla, saada selville tietoa tiivistettävän maan tiiviydestä.

Tarkoituksenamme oli etsiä mahdollinen yhtymäkohta nykyisillä maaperän tiiviyttä tutkivilla menetelmillä saatujen mittaustulosten ja tärylevyn tiivistettäessä syntyvän y-akselin suuntaisen kiihtyvyyden välille. Tutkimusteoreeman mukaan kiihtyvyyden pitäisi kasvaa maan tiivistyessä.

Samalla teimme tarpeeksi kattavat tutkimukset tutkimushetkellä vallinneista olosuhteista, jotta tekemämme kokeiden mahdollinen uusiminen olisi tulevaisuudessa mahdollista.

Varsinaiset tutkimukset, koskien tärylevyn kiihtyvyyden muutosta tiivistystyön edetessä, teimme Tampereen Ammattikorkeakoulun rakennuslaboratoriossa sijaitsevassa koesiilossa. Koesiilo on rakennettu nimenomaan maan tiivistymisen tutkimiseen.

Koejärjestelyjen lopputuloksista voidaan havaita, että maantiiveyden ja tärylevyn pystysuuntaisen kiihtyvyyden väliltä löytyy selvä yhteneväisyys. Keveydestä tärylevystä johtuen paras korrelaatio saavutettiin pienimmällä tutkitulla kerrosvahvuudella, kyseisessä koejärjestelyssä käytettiin betonilaattoja tiivistettävän kerroksen alla.

Tekemämme kokeet luovat mahdollisuuden uusille koejärjestelyille, joilla päästään lähemmäksi tulevaa mittalaitetta.

---

Asiasanat: tärylevy, kiihtyvyys, maantiiveys

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Structural Engineering  
Civil Engineering

MIKKO ASUNEN & MATTI MÄKELÄ:  
VIBRATING PLATE AT MONITORING THE DENSITY OF THE SOIL-  
STRUKTURE

Bachelor's thesis 70 pages, appendices 4 pages  
March 2013

---

Purpose of this thesis was to investigate y-axis acceleration of the vibrating plate and find out information about the density of the compacted.

Our goal was to look for a possible link between these days investigates methods of measurements of the current density of the soil and the concentration of vibrating plate generated y-axis acceleration. Research theorem, acceleration should grow when the soil intensive grows.

At the same time we made enough research investigations comprehensive conditions that existed at the moment, in order to match any possible repetition of the tests would be possible in the future.

The actual investigations on acceleration of vibrating plate stacking change as the work progresses we made in Tampere University of Applied Sciences building laboratory. Test silo is built specifically to soil compaction testing.

The result of the investigation is that we can observe that the tightness of the soil and the vibrating plate vertical acceleration can be found a clear consistency. Because we use lightweight vibration plate we had the best correlation in the lowest investigated layer thickness, the test arrangement was used in concrete beam below.

The tests make it possible. Because our test it is easy to do new experimentation, which will unlock the future of the measuring instrument.

---

Key words: vibrating plate, acceleration, ground intensity

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
1.1	AL- engineering Oy .....	7
1.2	Tavoitteet ja menetelmät.....	7
1.3	Taustaa .....	8
2	YLEISTÄ TIIVISTYSTÖISTÄ .....	9
2.1	Yleistä tiivistämisestä .....	9
2.2	Tiivistystöissä käytettävät koneet .....	10
2.3	Tiiveyden mittauksista .....	13
2.4	Tiiviyden mittaamiseen käytettävät mittalaitteet .....	14
2.4.1	Levykuormituskoe.....	14
2.4.2	Pudotuspainolaite .....	15
2.4.3	Kannettava pudotuspainolaite (LOADMAN).....	16
2.4.4	Vesivolymetri.....	17
2.4.5	Säteilyyn perustuvat mittausmenetelmät.....	18
2.5	Tiivistystyön laatuvaatimukset .....	19
2.5.1	Penkereiden tiivistäminen ja tiiviysvaatimukset.....	19
2.5.2	Jakavan kerroksen tiivistämisen ohjearvoja ja ohjeita niiden varmistamiseen .....	21
2.5.3	Kantavan kerroksen taulukkoarvoja ja ohjeita niiden varmistamiseen .....	23
3	LABORATORIO KOKEIDEN SUORITTAMINEN.....	26
3.1	Koejärjestelyn tarkentuminen .....	26
3.2	Koejärjestelyt ja välineet .....	29
3.2.1	Kiihtyvyyssanturi.....	29
3.2.2	Oskilloskooppi (PicoScope 4224).....	31
3.2.3	Tärylevy .....	33
3.2.4	Loadman.....	34
3.2.5	Tilavuuden muutos.....	34
3.2.6	Ajorata.....	34
3.2.7	Vesivolymetri.....	35
3.2.8	Karpidimetri .....	35
3.3	Olosuhteiden todentaminen mittaustulosten perusteella.....	36
3.4	Kokeet rakennuslaboratoriossa .....	37
3.4.1	Koejärjestely 1 .....	37
3.4.2	Koejärjestely 2 .....	37
3.4.3	Koejärjestely 3 .....	39

3.4.4	Koejärjestely 4 .....	41
3.4.5	Koejärjestely 5 .....	42
3.4.6	Koejärjestely 6 .....	45
4	MAAN TIIVIYDEN MÄÄRITTÄMINEN TÄRYLEVYN Y-AKSELIN SUUNTAISEN KIIHTYVYYDEN AVULLA .....	46
4.1	Kiihtyvyys.....	46
4.2	Datan sisältö.....	46
4.3	Kiihtyvyyden tutkiminen .....	47
4.3.1	Koejärjestely 2 .....	48
4.3.2	Koejärjestely 3 .....	49
4.3.3	Koejärjestely 4 .....	50
4.3.4	Koejärjestely 5 .....	52
4.3.5	Koejärjestely 6 .....	53
4.3.6	Tulokset.....	54
4.4	Koejärjestelyn 5 syventävä laskenta .....	54
5	PÄÄTELMÄT JA LOPPUTULOKSET .....	58
5.1	Lopputulos .....	58
5.2	Koejärjestely 2 (lopputulos).....	58
5.3	Koejärjestely 3 (lopputulos).....	59
5.4	Koejärjestely 4 (lopputulos).....	59
5.5	Koejärjestely 5 (lopputulos).....	60
5.6	Koejärjestely 6 (lopputulos).....	61
5.7	Päätelmät lopputuloksista .....	62
5.8	Kehitysehdotukset.....	63
6	POHDINTA.....	65
	LÄHTEET.....	66
	LIITTEET .....	67
	Liite 1 Tutkimussuunnitelma.....	67
	Liite 2. Mittapöytäkirjat laboratoriokokeista.....	68

**ERITYISSANASTO**

E	jäykkyysmoduuli, kimmomoduli
FWHD	full width height medium
spektri	signaalin taajuusjakauma
data	ohjelmakoodi oskiloskoopista
FFT	spektrianalysaattori
dB	desibeli
f/Hz	taajuus, hertsi
$a_{\text{korj}}^2$	korjatun kiihtyvyyden toinen potenssi
histogrammi	graafinen esitys tilastollisesta jakaumasta
gravitaatiovoima	maanvetovoiman kiihtyvyys
regressiosuora	tasapainosuora

# 1 JOHDANTO

## 1.1 AL- engineering Oy

AL- Engineering Oy on perustettu 6.12.1989. Yrityksen toimipaikka sijaitsee Espoossa. Yrityksen on perustanut tekn. tri Anssi Lampinen, Anssi Lampinen toimii myös yhtiön toimitusjohtajana.

Yritys kehittää ja markkinoi erilaisia mittauslaitteita maanrakennusalan tarpeisiin, esim. tien ja tienpinnan arviointiin, tien rakenteiden ja materiaalien arviointiin sekä konsultoi tienrakennusalan kysymyksissä.

Laitteiden kehittämisessä yritys toimii yhteistyössä eri intressitahojen kanssa. Yhteistyökumppaneitamme ovat korkeakoulut, VTT, liikennevirasto sekä muut alan yritykset. Yritys pyrkii räätälöimään mittalaitteita eri käyttäjien mieltymyksiä silmälläpitäen.

## 1.2 Tavoitteet ja menetelmät

AL- Engineering Oy tilasi Tampereen ammattikorkeakoululta tutkimuksen, jonka tavoitteena oli kehittää tärylevyyn tiiviysmittari. Tiiviysmittarilla voitaisiin määrittää tiivistettävän kerroksen tiivyyttä ja samalla myös kantavuutta.

Määrittäminen tapahtuisi laboratorio-olosuhteissa vertaamalla kiihtyvyyssanturilta saatua dataa Loadmannilla saatuihin painumiin, sekä testien edetessä tehtyihin materiaalin tilavuuspainoihin ja muihin tutkittaviin muutoksiin tiiveyden edetessä. Koeolosuhteet pyritäisiin mallintamaan mahdollisimman tarkasti, jotta koe voitaisiin tarvittaessa uusina samanlaisena. Tutkimukseen kuuluisi laboratoriokokeiden lisäksi koetulosten tulkitseminen ja laskeminen taulukkolaskentaohjelman avulla.

Tutkimukset tehtiin TAMK:n rakennuslaboratoriossa sijaitsevassa koesiilossa. Siilossa oli kalliomurskettä ja siiloa käytetään pääasiassa rakennusalan opiskelijoiden kursseihin liittyviin tutkimuksiin maan tiivistymisestä. Päätimme käyttää kokeissa siilossa jo valmiiksi ollutta materiaalia (KaM/ 0-16).



Kuva 1. Koesiilo (Kuva: Mikko Asunen 2012)

Työn tarkoitus ja tavoite oli tutkia tärylevyn kiihtyvyyttä tiivistymistyön edetessä kiihtyvyyssanturilla ja löytää saadusta datasta yhtymäkohtia maantiiveyteen. Mahdollisesti tutkimustyön edetessä löytyvistä yhtymäkohdista voisi sitten kehittää mittarin, jolla maantiiviys todetaan. Lopulliseen tuotteeseen ei tämän tutkimuksen teko riitä, mutta toivottavasti tutkimusta voidaan tulevaisuudessa jatkaa, saamiemme tulosten perusteella.

### 1.3 Taustaa

Rakennuttajien tiukentuvat vaatimukset rakennusvaiheiden raportoinnista, luo markkinat erilaisille mittalaitteille. Tulevien kokeidemme onnistuessa, luodaan mahdollisuus tiiveysmittarin rakentamiselle, jossa tiiveyden mittaaminen perustuisi tärylevyn y-akselin suuntaisen kiihtyvyyden mittaamiseen. Onnistuessaan tärylevyyn asennettava tiiveysmittari helpottaisi dokumentointia huomattavasti.



## 2 YLEISTÄ TIIVISTYSTÖISTÄ

### 2.1 Yleistä tiivistämisestä

Tiivistämistyö on huomattu todella tärkeäksi ja vaikeasti jälkeensä korjattavaksi työvaiheeksi siksi siihen kiinnitetään entistä enemmän huomiota. Parhaan tuloksen saavuttamiseen on tunnettava käytettävissä oleva tiivistyskalusto todella tarkasti. Tiivistämiseen käytettävän kaluston valintaan on useita mahdollisuuksia, varmasti löytyy jokaiseen kohteeseen oikea koko ja parhaiten kohteeseen sopiva kalusto. Tiivistämistä koskevat vaatimukset ovat tarkasti määriteltyjä. Työn tekijöiltä ja heitä valvovilta työnjohtajilta vaaditaan paljon tietotaitoa.

Jyrät ja muut tiivistämiskalustot erotetaan kahteen ryhmään niiden toimintatavan mukaisesti:

- *Staattisen tiivistäjän*, vaikutus perustuu pelkästään koneen painoon.
- *Dynaamisen tiivistäjän*, vaikutus perustuu painon lisäksi koneen tuottamiin impulsseihin, jotka etenevät maahan saaden maarakeet siirtymään lähemmäksi toisiaan.

(Kulmala Hannele pohjarakentaminen 2009)

Staattisten valssijyrien etuna on, että niillä pystytään saamaan erittäin tasainen ja tiivis, huonosti vettä läpäisevä pinta. Koska tiivistyskyky perustuu pelkkään painoon, niillä ei pystytä tiivistämään paksuja kerroksia kerrallaan. Tavallisimmin staattisia valssijyriä käytetään asfalttitoissa sekä kohteissa, joissa värinä voi aiheuttaa vaurioita lähellä oleville rakenteille. (Kulmala Hannele pohjarakentaminen 2009)

Dynaaminen jyrän tiivistämisvaikutus ulottuu syvemmälle, sen tuottaman värinän takia. Maarakeet siirtyvät helpommin lähemmäksi toisiaan, joka on tiivistämisen tarkoitus. Määrätyissä kohteissa tärytys on kuitenkin haittaava tekijä. Jyrän tärytys voi rikkoa herkkiä rakenteita. (Kulmala Hannele pohjarakentaminen 2009)

Tiivistyskalustolla siirretään energiaa löysiin maa-aineksiin tai muihin materiaaleihin ja lisätään materiaalin tiheyttä ja samalla sen kuormankantokykyä. Maarakeet siirtyvät lähemmäksi toisiaan, jolloin huokosten määrä (ilma ja vesi) pienenevät. Tiivistäminen lisää materiaalin kantokykyä, vähentää veden tihkumista, ehkäisee kerros materiaalin

tiivistymisestä aiheutuvaa maaperän painumista, vähentää maa-aineksen laajenemista ja maan supistumista sekä hidastaa roudan tunkeutumista. (Infra-RYL 2012/1, Kulmala Hannele pohjarakentaminen 2009)

Parhaan tiivistystuloksen saa rakeisten maa-ainesten, kuten hiekan, soran, murskatun betonisoran ja sekoitettujen maa-ainesten lajeista.

Maan tiivistymiseen vaikuttavat;

- maan koostumus sekä sen rakeisuus, rakeiden muoto
- maan sisältämä vesipitoisuus
- sopiva kalusto ja tiivistystyön määrä
- ilman lämpötila vaikuttaa myös tiivistystyön tulokseen (Infra-RYL 2012/1, Kulmala Hannele pohjarakentaminen 2009)

## 2.2 Tiivistystöissä käytettävät koneet

Käytössä olevat koneet eroavat toisistaan niin kokonsa, kuin muidenkin ominaisuuksiensa mukaan.

- Tärylevytiivistäjä
  - kuuluu dynaamisten tiivistäjien sarjaan
  - pystymallinen jossa on pyöreä tiivistyslevy
    - tarkoitettu pienien kuoppien pohjien sekä paalujen ympäristöjen tiivistämiseen
    - käyttäjä ohjailee ja siirtelee tiivistämisen edetessä
  - nelikulmaisella pohjalevyllä varustetut tärylevyt ovat yleisimpiä
    - pienimmät ovat yhteen suuntaan ajettavia
  - tärylevytiivistäjät toimivat joko sähköllä, bensiinillä tai dieselöljyllä
  - koko vaihtoehtoja on useita
  - tärylevyjä on saatavana käsin ohjattavana
  - nykyään on yleistynyt kauko-ohjattavat versiot, niiden hyvinä puolina voi todeta sen että käyttäjä ei tarvitse olla aivan koneen lähellä työvaihetta tehtäessä

- ohjaussauvat on eristetty hyvin koneen tärinästä, eli käyttäjän kädet eivät altistu tärinälle
  - koneen tuottama työmelu on vaimennettu hyvin pieneksi, kuitenkin kuulosuojaimia pitää käyttää ([www.konevalitys.com](http://www.konevalitys.com), Hannele Kulmala pohjarakentaminen 2009)
- Yksivalssinen täryjyvä
    - voi olla dynaaminen tai staattinen
    - monen kokoisia tarjolla, kuten mainittu voi olla täryttävä malli (täryn voi kytkeä pois päältä), tai sitten pelkästään painonsa avulla tiivistävä
    - vedettäviä malleja
      - liikutetaan esim. traktorilla
      - ammattitaitoisen työntekijän tiivistämistyökalu
    - ajettavia malleja
      - käytössä paljon tietyömailla, koneessa on edessä suuri metallivalssi ja takana työntävä koneisto jossa yleensä kumipyörät
      - laitteella saa hyvän ja sileän lopputuloksen
      - tiivistämiskerroksen vahvuus perustuu koneen painoon, tärytykseen tai materiaaliin jota tiivistetään
      - kone on runko-ohjattu, eli helppo ja tarkka ohjata
      - kone on rungon taittokohdasta nivelöity, liike voi tapahtua myös sivuttaissuunnassa eli kallistuksissa
      - kitkamaiden tiivistämiseen ([www.konevalitys.com](http://www.konevalitys.com), Hannele Kulmala pohjarakentaminen 2009)
- Kaksivalssinen täryjyvä
    - staattinen kaksivalssijyvä on käytössä yleisesti asfalttitöissä etujyränä, käytössä tienrakennuskohteissa muutenkin useissa paikoissa
    - kaksivalssisia täryjyriä on useita alkaen aivan pienistä kanaalin pohjien jyristä suuriin tien kantavien rakenteiden tiivistämiseen käytettäviin jyriin
    - pienet kaksivalssiset jyrät saa halutessa kauko-ohjauksella varustettuna
    - radio-ohjaus antaa lisää turvallisuutta työntekijälle, koska ei tarvitse mennä esim. kanaaliin ohjaamaan konetta vaan voi ohjata jyrää kauempaa

- Kaivinkoneen puomiin liitettävät tärylevytiivistäjät
  - lisälaitteella esim. pienet kanaalinpohjat, tolppienjuuret, putkien alustat saadaan nopeasti ja turvallisesti tiivistettyä
  - työntekijän ei tarvitse mennä kaivantoon
- Kumipyöräjyrät
  - suomessa hieman harvinaisempi työkone
  - käytetään asfalttitoissa
  - raskaimpia malleja käytetään myös maantiivistämiseen
- Sorkkajyrä
  - malliltaan kuin kumipyörävetoinen valssijyrä
  - valssissa on ”nystyröitä” ei sileä, kuten muut valssijyrät
  - koheesiomaiden tiivistämiseen ([www.konevälitys.com](http://www.konevälitys.com), Hannele Kulmala pohjarakentaminen 2009)

Tiivistystyön toteuttamisen suunnitteluun on määritelty ohjeelliset ylityskerrat (Kuvio 1). Työmaalla tarkempien mittausten ja tarkastelujen jälkeen tehdään olosuhteista ja muista tekijöistä johtuvia hienosäätöjä. Työmaalla tehtävät tarkemmat materiaalien, olosuhteiden ja muiden muuttuvien tekijöiden vaikutusten arviointi pyritään tekemään mahdollisimman pian aloituksen jälkeen. Työvaiheiden ja työtapojen oppiminen heti työmaan alussa helpottaa pääsemään vaadittuun vaatimustasoon helpoimmin. (Infra-RYL 2012/1)

Jyrätyyppi	Paino, t	Ylityskertojen ohjeisto															
		Suodatin-/eristyskerros		Jakava kerros / välkerros		Kantava kerros		Tien tai kadun aksrakenne H <sup>1)</sup> ≤ 30			Tien tai kadun aksrakenne H <sup>1)</sup> > 30			Louhe		Radan pengertäyty	
Kerrospaksuus enintään, m		0,25	0,5	0,25	0,4	0,2	0,3	0,25	0,5	0,8	0,25	0,5	0,8	0,8	1,0	0,4	0,8
Tärytyt <sup>2)</sup>																	
- vedettävät	> 5	4	7	5	8	5	9	3	6	11	3	7	13	6 <sup>12)</sup>	7 <sup>12)</sup>	5	5 <sup>12)</sup>
- 2 täräytysosa	> 5	3	4	3	5	3	6	2	4	8	2	4	8	—	—	—	—
- 1 täräytysosa	> 5	4	7	5	8	6	9	3	6	11	3	6	11	5 <sup>13)</sup>	7 <sup>13)</sup>	5	5 <sup>13)</sup>
Kumpyräjätyt <sup>3)</sup>	< 20 <sup>4)</sup>	6	—	8	—	10	—	6	—	—	6	—	—	—	—	—	—
	> 20 <sup>5)</sup>	4	8	6	12	8	12	4	8	14	3	6	11	—	—	10	—
Staatit/vahojäät <sup>6)</sup>	> 10	—	—	—	—	10	—	7	—	—	7	—	—	—	—	—	—
Pyöräkuormat <sup>7)</sup>	> 40	—	—	—	—	—	—	4	8	14	3	7	13	—	—	—	—
Puskurakortit <sup>8)</sup>	> 10	—	—	—	—	—	—	4	—	—	6	—	—	—	—	—	—
Sorkkojäät <sup>9)</sup>	7...10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10 <sup>1)</sup>	10 <sup>1)</sup>	—	—	—	—	—
Tärytyt <sup>11)</sup>	> 0,05	6	—	7	—	6	—	5	—	—	6	—	—	—	—	—	—
	> 0,1	5	—	6	—	6	—	4	—	—	5	—	—	—	—	—	—
	> 0,2	4	—	5	—	5	—	3	—	—	4	—	—	—	—	—	—
	> 0,4	3	—	4	—	4	—	3	—	—	3	—	—	—	—	—	—

<sup>1)</sup> H = hienoainespitoisuus (0,063 mm:n seulan läpäisy-%).

<sup>2)</sup> Eivät sovellu runsaasti koheesioainesta sisältävien maalien tiivistämiseen. Amplitudi aluksi noin 1,5 mm ja viimeiset ylityskerrat < 1 mm, penkereen ja suodattimen jyräysnopeus 1..3 km/h, jakavan ja kantavan 3..6 km/h. Vivakuorma > 1,5 t/m.

<sup>3)</sup> Eivät sovellu runsaasti koheesioainesta sisältävien maalien tiivistämiseen, rengaspaino soralla maaloilla 500 kPa ja hiekkaisilla maaloilla 300 kPa, jyräysnopeus yli 5 km/h.

<sup>4)</sup> Pyöräpaino > 2 t.

<sup>5)</sup> Pyöräpaino > 3 t.

<sup>6)</sup> Eivät sovellu märkien silttien maalien tiivistämiseen. Vivakuorma > 5 t/m.

<sup>7)</sup> Eivät sovellu märkien silttien maalien tiivistämiseen.

<sup>8)</sup> Soveltuvat ohuiden kerrosten ja märkien silttien tiivistämiseen.

<sup>9)</sup> Soveltuvat silttien ja saven tiivistämiseen.

Kuvio 1. Tiivistyskoneiden ohjeellinen ylityskertamäärä (Kuvio: Infra- RYL 2012/1)

### 2.3 Tiiveyden mittauksista

Maanrakentamiseen kuuluu yhtenä työvaiheena keskeisesti materiaalien tiiveyksien todentaminen. Urakka- tai muissa sopimuspapereissa on myös määrätty tiettyjen kohteiden tiiveydet, tiiveyksien arvot löytyvät myös yleisistä ohjeista MaaRYL, InfraRYL ja RIL 132 talonrakennusten maarakenteet. Näissä ohjeissa on määritelty eri rakenteiden minimitiiviyssasteet. (Infra-RYL 2012/1)

Maamateriaalien tiiveyksiä mitataan työmailla monilla eri mittalaitteilla. Urakan suorittaja käyttää sellaista mittalaitetta, jollainen hänellä on käytettävissään tai on helposti saatavilla, ellei urakan tilaaja nimenomaan vaadi jotain tiettyä mittalaitetta käytettävän. Mittauksia täytyy tehdä tosi monesta kohteesta eikä kaikkia saada sopimaan samaan aikatauluun. Tästä syystä olisi kustannustehokasta ja järkevää että mittalaite ja sen käyttö olisi monella infrarakennuskohteita tekevillä käytettävissä jatkuvasti. (Infra-RYL 2012/1)

Oikein ja oikeista paikoista tehdyt mittaukset ja niistä tehdyt asiakirjat antavat työntekijöille ja niitä valvoville työnjohtajille vastuuvapauksia. Oikein tehdyt mittaukset ja niistä tehdyt asiakirjat antavat epäselvissä tilanteissa mahdollisen ratkaisun ongelmaan. Näin ollen on järkevää tehdä mieluiten liikaa mittauksia kuin liian vähän. (Infra-RYL 2012/1)

## 2.4 Tiiviyden mittaamiseen käytettävät mittalaitteet

### 2.4.1 Levykuormituskoe

Levykuormituskokeessa maapohjaa kuormitetaan pyöreällä kappaleella hitaasti painetta nostaan. Kuormitusportaan noston jälkeen, mitataan levyyn vaikuttava paine. Paine poistetaan ja koe uusitaan samasta kohtaa uuden kerran. Molemmista mittauksista tehdään kuormitus/painuma kuvaaja. Mitä lähempänä kuvaajat ovat toisiaan, sitä paremmin tiivistystyöt ovat toteutettu. (Hannele Kulmala pohjarakentaminen 2009)

Suuret painumat kertovat huonoista pohjamaaolosuhteista. Tiivistystyö onnistuu heikosti kantaville pohjille huonosti. Heikoille pohjamaaolosuhteille ei saada vaadittavia tiiveyksiä. Kuormitus/painuma kuvaajasta lasketaan kokoonpuristuvuusmoduuli. Molemmista mittauksista lasketaan kantavuusmoduulit  $E_1$  ja  $E_2$ . Rakenteille on määritelty miten suuri suhdeluku  $E_2/E_1$  voi maksimissaan olla ja määrätty kuinka suuri  $E_2$ :n täytyy vähintään olla. (Hannele Kulmala pohjarakentaminen 2009)

Levykuormituskokeen etuna on siihen liittyvä laaja kokemuspohjainen tieto mittaustulosten ja rakenteiden käyttäytymisen välisistä yhteyksistä. Levykuormituskokeella määritetty muodonmuutosmoduuli ei edusta minkään rakenteessa olevan materiaalin käyttäytymistä erikseen. Kokeen hyviin puoliin kuuluu myös se, että koska kuormittava paino on suuri, kokeen syvyysvaikutus on myös hyvä verrattuna kevyisiin mittalaitteisiin. (Hannele Kulmala pohjarakentaminen 2009)

Kokeen tekeminen vie aikaa ja sitoo kuorma-auton, kaivurin tai jonkin muun raskaan koneen kokeen tekemisen ajaksi. Huomioitava on myös, että raskailla ajoneuvoilla ei pääse aivan joka paikkaan ja näin mittausta ei pääse toteuttamaan ahtaissa paikoissa, esim. putkikaivantojen arinojen mittaukset. (Hannele Kulmala pohjarakentaminen 2009)



Kuva 2. Levykuormitus koe, kuorma-auto vastapainona (Kuva: Kulmala Hannele 2009)

#### 2.4.2 Pudotuspainolaite

Pudotuspainolaitteessa maapohjaan pudotetaan paino vaimentimen ja kuormituslevyn kautta. Painon aiheuttamat painumat mitataan mittausantureissa, joita on sijoitettu eri etäisyyksille kuormituskohdasta. Kuormitus poistetaan ja koe uusitaan samasta kohtaa. Pudotuspainolaitteella voidaan mitata erityisesti liikenteen aiheuttaman rasituksen vaikutusta maapohjan kantavuuteen. Mittalaitteet on yleensä rakennettu auton peräkärryn päälle, näin ollen helppoja siirtää mittausta paikasta toiseen kohteeseen. Laite on dynaaminen kantavuusmittauslaite. ([www.Roadconsulting.fi](http://www.Roadconsulting.fi), Hannele Kulmala pohjarakentaminen 2009)



Kuva 3. Kevyt perävaunuun rakennettu pudotuspainolaite (Kuva: roadmasters).

Pudotuspainolaitteen hyvinä ominaisuuksina voidaan mainita, testin nopea suorittaminen, luotettavuus ja koneeseen saatavalla mitoitusohjelmistolla saadaan laskettua esim. vaadittavat lisäkerrosten vahvuudet. Kokeen tekeminen suoritetaan auton ollessa pysähtyneenä, mikä on aina riskitekijä liikenteessä. ([www.Roadconsulting.fi](http://www.Roadconsulting.fi), Hannele Kulmala pohjarakentaminen 2009)

Käyttökohteita ovat niin yksityis- ja yleiset tieverkot, niiden perusparantamiset ja keli-rikkokohteet. ([www.Roadconsulting.fi](http://www.Roadconsulting.fi), Hannele Kulmala pohjarakentaminen 2009)

### 2.4.3 Kannettava pudotuspainolaite (LOADMAN)

LOADMAN on kevyt kannettava pudotuspainolaite, joka mittaa laitteen sisällä olevan 10 kg painoisen painon pudottamisen aiheuttamaa painumaa. Pudotuspainon aiheuttama kuormitus mitataan kiihtyvyyssanturilla. Painuma lasketaan kiihtyvyydestä integroimalla. Kiihtyvyyssarvo muutetaan loadmanin elektroniikkaosassa taipumaksi. Taipumarvon perusteella prosessori sitten laskee E moduulin. Loadmanilla mittaustulosten toistettavuus on n. 5 %, millä tarkoitetaan joustavalla alustalla tehtyjen mittausten keskihajontaa. ([www.al-engineering.fi](http://www.al-engineering.fi))

Moduulin arvo lasketaan kaavalla (1):

$$E = (1.5pa)/s \quad (1)$$

$E$  = jäykkyysmoduuli  $MN/m^2$

$p$  = kuormitus  $MN/m^2$

$a$  = kuormituslevyn säde mm

$s$  = taipuma mm

Laitetta voidaan käyttää kaikenlaisilla rakennustyömailla kantavuusmittauksiin ja tiivistyksen tarkkailuun sidotuilla ja sitomattomilla kerroksilla, sen kevyen rakenteen takia. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi teillä, kaduilla, siltatyömailla, talonrakennustyömailla, kaivannoissa, urheilukentillä sekä erilaisten materiaalien testaamiseen laboratoriossa. ([www.al-engineering.fi](http://www.al-engineering.fi))





Kuva 4. Kannettava pudotuspainolaite kuvassa vasemmalla (Kuva: Mikko Asunen 2012)

Laitteen huonoina puolina voi tuoda esille:

- Pienestä painosta johtuen syvyys vaikutus ei ulotu kuin noin 500 mm asti.
- Loadmanilla mitattaessa alustan täytyy olla tasainen.
- Koje on pidettävä pysty suorassa mittausten ajan, jotta saatava tulos olisi luotettava.

#### 2.4.4 Vesivolymetri

Vesivolymetri on perinteinen kuivatilavuuspainon mittauslaite. Vesivolymetriä voidaan käyttää hienorakenteisissa ja kivettömissä maalajeissa. Irtorakeisissa maissa häiriintymättömän näytteen ottaminen on mahdotonta. (Hannele Kulmala pohjarakentaminen 2009)

Mittauksen toteuttaminen:

1. Maa-aines tasataan mitattavalta kohtaa ja päälle asennetaan vesivolymetrin pohjalevy, jossa on reikä keskellä.
2. Varsinainen mittalaite asennetaan pohjalevyn päälle ja mitataan alkutilavuus V1.

3. Pienellä kauhalla kaivetaan maata pohjalevyn reiästä, varoen liikuttamasta itse levyä, kuopan tilavuus noin yksi litra.
4. Kaivettu maa-aines otetaan tarkasti talteen erilliseen astiaan.
5. Mittalaite asennetaan takaisin pohjalevyn päälle ja mitataan (kuopan) lopputilavuus  $V_2$ .
6. Tilavuuksien erotuksesta saadaan maanäytteen tilavuus  $V$ .
7. Talteen otetun maanäytteen paino saadaan punnitsemalla.
8. Maanäytteen paino jaetaan näytteen tilavuudella  $V$ , saadaan selville kyseisen näytteen tilavuuspaino (luonnontilainen). (Hannele Kulmala pohjarakentaminen 2009)

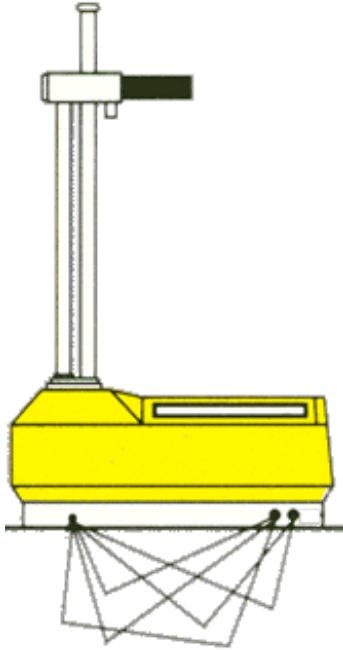


Kuva 5. Vesivolymetri (Kuva: Mikko Asunen 2012)

#### 2.4.5 Säteilyyn perustuvat mittausmenetelmät

Tiiveyden mittausta voidaan suorittaa erilaisilla säteilyyn perustuvilla mittauslaitteilla. Säteilevät laitteet aiheuttavat radioaktiivista säteilyä maaperään, joka vaimenee eri maa-aineksilla ja tiheyksillä eri tavoin. Näiden avulla laite rekisteröi mm. tiiveys- ja kosteustietoja maaperästä (RIL 132-2000, 62). Usein säteilevät laitteet ovat herkkiä tutkittavien pintojen epätasaisuuksille, minkä vuoksi pinnat vaativat valmistelutoimenpiteitä, tai vaativat suurta mittauskoe-erää. (Hannele Kulmala pohjarakentaminen 2009)

Säteilyyn perustuvilla mittalaitteilla saadaan suoraan kuivatilavuuspaino, kosteusprosentti ja märkätilavuuspaino. Laitteet voidaan vesivolymetrikokeiden perusteella kalibroida tarkemmin tutkittavalle materiaalille sopivaksi. Hyvänä puolena voidaan todeta, että säteilyyn perustuvat laitteet antavat tuloksen heti, tiivistystyötä ei tarvitse keskeyttää. (Hannele Kulmala pohjarakentaminen 2009)



Kuvio 2. Troxler merkkinen säteilyyn perustuvan mittalaitteen havainne kuva (Kuva: groundtest).

## 2.5 Tiivistystyön laatuvaatimukset

### 2.5.1 Penkereiden tiivistäminen ja tiiviysvaatimukset

Penkereen tiiviyttä tarkkaillaan sekä kokeellisesti että työmenetelmätarkkailuna (Kuviot 3 – 6). Työmenetelmätarkkailuun sisältyy kerrospaksuuksien, jyräyskertojen ja pengermateriaalin laadunvalvonta. (Infra-RYL 2012/1)

Työn alussa tehdään tiivistyskokeita oikeiden työmenetelmien varmistamiseksi ja selvitetään käytössä oleville tiivistyskoneille työmaan olosuhteissa sopivat kerrospaksuudet ja yliajokerrat siten, että vaaditut tiiviyydet saavutetaan. (Infra-RYL 2012/1)

Työtapamenettelyn käytöstä on tehtävä merkintä työmaapäiväkirjaan. Tiivistystyön onnistuminen on selvitettävä mahdollisimman nopeasti pengerrystyön aikana. Tiivistämistyön onnistumisen mahdollisimman nopeaan selvittämiseen soveltuvat parhaiten itse mittaavat jyrät. (Infra-RYL 2012/1)

Jos penkereen tiiviyttä tarkkaillaan muilla menetelmillä, tulee osoittaa niillä saatavien tulosten riippuvuussuhde levykuormituskokeen tuloksiin tai parannettua Proctor- koetta käyttäen määritettyyn tiiviyssasteeseen. Mursketta käytettäessä pengertäytteen tiiviyttä määritetään levykuormituskokeella. (Infra-RYL 2012/1)

		Laatuluokka		
		1 Rakennuksen alla	2 Liikennealueella	3 Viheralue
Pienin sallittu yksittäinen tiiviyssaste	%	≥ 95	≥ 90	≥ 87
Pienin sallittu yksittäinen kantavuusarvo	MN/m <sup>2</sup>	E <sub>1</sub> ≥ 50	E <sub>1</sub> ≥ 40	–
Tiiviyssuhde (kevyt pudotuspainolaite d 300 mm)	E <sub>max</sub> /E <sub>1</sub>	1,7	2,0	2,1

Kuvio 3. Maapenkereen tiiviy- ja kantavuusvaatimukset (Lähde: MaaRYL 2010)

Parannetun Proctor-kokeen arvo	Kevyen pudotuspainolaitteen kokeen arvo, kun pohjalevyn halkaisija on		
	300 mm	200 mm	132 mm
95	1,7	2,1	2,5
92	1,9	2,3	2,8
90	2,0	2,4	2,9
87	2,1	2,5	3,0
	Kerros-paksuus <sup>1)</sup>		
	350...400 mm	300...350 mm	200...300 mm

<sup>1)</sup> Vaikutussyvyys noin 1,5 x D, mutta kuormitus pienempi kuin esimerkiksi LKK:ssa.

Kuvio 4. Parannetun Proctor- kokeen ja kevyen pudotuspainolaitteen kokeen arvojen ohjeellinen vastaavuus pohjalevyn halkaisijan mukaan. Taulukon arvot koskevat Loadman- laitetta. (Lähde: AL- Engineering Oy 2005.)

Kuormitusluokka (KKL 20 vuotta milj. stand. akselia)	Syvyys tien tasausviivasta m	Alusrakenneluokka <sup>1)</sup>		
		A, B, C, D tai uE	uF, uH, uI	uG
0,8...25	< 2	95	92	–
	2...5	90	87	–
	> 5	–	–	–
0,1...0,4	< 3	90	87	–
	≥ 3	–	–	–

<sup>1)</sup> Alusrakenneluokat esitetään taulukoissa Liite:T17 ja Liite:T18. Ryhmittely on tehty kelpoisuusluokan ja olosuhteiden mukaan.

Kuvio 5. Tiiviyssasteen keskiarvovaatimukset (%) pengertäyhteille. Yksittäinen tiiviyssaste saa alittaa vaatimusrajan enintään 5 % -yksikköä. (Infra-RYL 2012/1)

Etäisyys radan kv:sta tai kadun tsv:sta	Vaadittu tiiviysaste		1, 2) $E_2$ (MPa)	
	Keskimäärin	Vähintään	Keskimäärin	Vähintään
< 3,0 m	92 %	90 %	120	100
> 3,0 m	90 %	87 %	100	90

1) Pengertäyte mursketta tai soraa.  
2) Määritetään liitteen *kuva: K7* mukaan.

Kuvio 6. Kadun ja radan penkereen tiiviysasteen ja levykuormitusmoduulien vaatimukset. (Infra-RYL 2012/1)

### 2.5.2 Jakavan kerroksen tiivistämisen ohjearvoja ja ohjeita niiden varmistamiseen

Jakavan kerroksen tiivistystyön laatu varmistetaan työkohtaisesti sovittavalla tavalla tai jollakin seuraavan ohjeen tavoista. Tiivistystyön laatu täyttää valitun menetelmän vaatimukset. (Infra-RYL 2012/1)

#### Menetelmä 1:

Kerroksen kuivatiheys mitataan kalibroidulla säteilymittauslaitteella ja lasketaan mittastuloksen ja kuivatiheyden enimmäisarvon suhde eli tiiviysaste. Tiiviysasteen tulee olla keskimäärin vähintään 95 % ja yksittäisen arvon vähintään 90 %. Kuivatiheyden enimmäisarvo määritetään koetiivistyksellä tai laboratoriossa käyttäen parannettua Proctor- tai tärypöytämenetelmää. (Infra-RYL 2012/1)

#### Menetelmä 2:

Jos jakavan murskeen enimmäisraekoko on  $\leq 125$  mm tai materiaali on luonnonsoraa, voidaan tiivistystyön laatu varmistaa mittaamalla pudotuspaino- tai levykuormituslaitteella tiiviyssuhde  $E_2/E_1$ , joka on toisesta kuormituksesta lasketun kantavuusarvon suhde ensimmäisestä kuormituksesta laskettuun kantavuusarvoon. Levykuormituslaitteella mitatun tiiviyssuhteen vaatimukset esitetään *kuviossa 7* ja pudotuspainolaitteella mitatun *kuviossa 8*. (Infra-RYL 2012/1)

### Menetelmä 3:

Jos jakavan murskeen tai luonnonsoran enimmäisraekoko on  $\leq 80$  mm ja kerrospaksuus alle 300 mm, voidaan tiiviyssuhde mitata myös kevyellä pudotuspainolaitteella. Tulos saa olla korkeintaan 1,1-kertainen verrattuna koetiivistyksessä määritettyyn tiiviyssuhteen tavoitearvoon. (Infra-RYL 2012/1)

### Menetelmä 4:

Käytetään *kuvion 1* vaatimukset täyttävää jyrää ja jatkuvasti mittaavaa ja dokumentoitavaa jyrämittaria. Osoitetaan, että tiivistystä on jatkettu niin kauan, että jyrämittarin arvot eivät ole enää parantuneet ja että kahdesta huonoimmat jyrämittariarvot antaneesta kohdasta mitatut tiiviyssuhteet täyttävät vaatimukset. (Infra-RYL 2012/1)

### Menetelmä 5:

Jos jakavan murskeen enimmäisraekoko on suurempi kuin 125 mm, voidaan tiiviyys varmistaa mittaamalla tiivistettävän kerroksen pinnan korkeustason alentumista esimerkiksi vaaitsemalla tai takymetrillä. Tällöin valitaan vähintään 2 poikkileikkausta, joihin merkitään esimerkiksi maalimerkki vähintään 10 kohtaan. Pisteiden korkeustasot mitataan 0, 2, 4, 6, 8 jne. jyrän ylityskerran jälkeen. Kun kahden viimeisen ylityskerran painumat ovat alle 10 mm, tiivistystaso on riittävä. (Infra-RYL 2012/1)

### Menetelmä 6:

Osoitetaan muulla tavalla, että jyräys on tehty *kuvion 1* jyräysohjeen mukaisella laitteistolla ja tiivistystyömäärällä. Jyräysohjeen mukaista tiivistystyömäärää voidaan tarkistaa koejyräyksen tai työnaikaisten mittaustulosten perusteella. (Infra-RYL 2012/1)

Kantavuus, MPa	Tiiviyssuhde $E_2/E_1$
< 125	$\leq 2,2$
125...134	$\leq 2,3$
135...144	$\leq 2,4$
145...154	$\leq 2,5$
155...164	$\leq 2,6$
165...174	$\leq 2,7$
175...184	$\leq 2,8$
$\geq 185$	$\leq 2,9$

Kuvio 7. Levykuormituslaitteella jakavan kerroksen pinnalta mitatun tiiviyssuhteen vaatimukset. (Infra-RYL 2012/1)

Kantavuus, MPa	Tiiviyssuhde $E_2/E_1$
< 125	$\leq 1,9$
125...134	$\leq 2,0$
135...144	$\leq 2,1$
145...154	$\leq 2,2$
155...164	$\leq 2,3$
165...174	$\leq 2,4$
175...184	$\leq 2,5$
$\geq 185$	$\leq 2,6$

Kuvio 8. Pudotuspainolaitteella jakavan kerroksen pinnalta mitatun tiiviyssuhteen vaatimukset. (Infra-RYL 2012/1)

Työtapatarkkailun yhteydessä on käytettävien työmenetelmien soveltuvuudesta paikallisiin olosuhteisiin aina varmistettava mittauksin sekä työtä aloitettaessa että silloin, kun rakentamisessa käytettävän materiaalin laatu tai kosteustila taikka rakentamisolosuhteet muuttuvat. (Infra-RYL 2012/1)

### 2.5.3 Kantavan kerroksen taulukkoarvoja ja ohjeita niiden varmistamiseen

Kantavan kerroksen tiivistystyön laatu varmistetaan suunnitelma-asiakirjojen mukaan tai jollakin seuraavan ohjeen tavoista. Tiivistystyön laatu täyttää valitun menetelmän vaatimukset. (Infra-RYL 2012/1)

#### Menetelmä 1:

Kerroksen kuivatiheys mitataan kalibroidulla säteilymittauslaitteella ja lasketaan mittau tuloksen ja kuivatiheyden enimmäisarvon suhde eli tiiviyssaste. Tiiviyssasteen tulee olla keskimäärin vähintään 95 % ja yksittäisen arvon vähintään 90 %. Kuivatiheyden enimmäisarvo määritetään koetiivistyksellä tai laboratoriossa käyttäen joko parannettua Proctor- tai tärypöytämenetelmää. (Infra-RYL 2012/1)

## Menetelmä 2:

Mitataan pudotuspaino- tai levykuormituslaitteella tiiviyssuhde  $E_2/E_1$ , joka on toisesta kuormituksesta lasketun kantavuusarvon suhde ensimmäisestä kuormituksesta lasketuun kantavuusarvoon. Levykuormituslaitteella mitatun tiiviyssuhteen vaatimukset esitetään *kuviossa 9* ja pudotuspainolaitteella mitatun tiiviyssuhteen vaatimukset *kuviossa 10*. (Infra-RYL 2012/1)

## Menetelmä 3:

Tiiviyssuhde mitataan kevyellä pudotuspainolaitteella. Tulos saa olla korkeintaan 1,1-kertainen verrattuna koetiivistyksessä määritettyyn tiivistyysuhteen tavoitearvoon. (Infra-RYL 2012/1)

## Menetelmä 4:

Osoitetaan, että tiivistystä on jatkettu niin kauan, että jyrämittarin arvot eivät ole enää parantuneet ja osoitetaan, että kahdesta huonoimmat jyrämittariarvot antaneesta kohdasta mitatut tiiviyssuhteet (*menetelmä 1*) tai tiiviyssuhteet (*menetelmä 2*) täyttävät vaatimukset. (Infra-RYL 2012/1)

## Menetelmä 5:

Osoitetaan, että jyräys on tehty *Kuvio 1* annettuja ohjeita noudattaen. (Infra-RYL 2012/1)

Kantavuus, MPa	Tiiviyssuhde $E_2/E_1$
< 145	$\leq 2,0$
145...159	$\leq 2,1$
160...174	$\leq 2,2$
175...189	$\leq 2,3$
190...204	$\leq 2,4$
205...219	$\leq 2,5$
220...234	$\leq 2,6$
$\geq 235$	$\leq 2,7$

*Kuvio 9*. Levykuormituslaitteella sitomattoman kantavan kerroksen pinnalta mitatun tiiviyssuhteen vaatimukset. (Infra-RYL 2012/1)



Kantavuus, MPa	Tiiviyssuhde $E_2/E_1$
< 145	$\leq 1,7$
145...159	$\leq 1,8$
160...174	$\leq 1,9$
175...189	$\leq 2,0$
190...204	$\leq 2,1$
205...219	$\leq 2,2$
220...234	$\leq 2,3$
$\geq 235$	$\leq 2,4$

Kuvio 10. Pudotuspainolaitteella sitomattoman kantavan kerroksen pinnalta mitatun tiiviyssuhteen vaatimukset. (Infra-RYL 2012/1)

Jos tiivistystyön laatu varmistetaan menetelmällä 1 (tiiviyssaste), mittaukset tehdään 150 m:n välein. Jos käytetään menetelmää 2 (tiiviyssuhde), mittaukset tehdään 100 m:n välein. Mittaukset tehdään kultakin ajokaistalta ja yli 1,5 m:n pientareelta. (Infra-RYL 2012/1)

Katselmuspöytäkirjat, laadunvalvontaraportit ja suorituspöytäkirjat kootaan työmaalla aina ajan tasalla pidettävään kelpoisuusasiakirjaan. (Infra-RYL 2012/1)

### 3 LABORATORIO KOKEIDEN SUORITTAMINEN

#### 3.1 Koejärjestelyn tarkentuminen

Alkuperäisen tutkimussuunnitelman mukaan tarkoitus oli mitata tärylevyn kiihtyvyyttä tärylevyn tiivistäessä maata siten, että tärylevyä pidettäisiin käsin paikoillaan. Kokeiden teko tapahtuisi 2 metriä leveässä, 1,5 metriä pitkässä ja puoli metriä syvässä koesiiloon tehdyssä montussa (kuva 6).

Tutkimuksiin kuuluneet tärylevytiiveyskokeet rajoitettiin yhteen materiaaliin, koska siiloon olisi ollut hankalaa vaihtaa tiivistettävää materiaalia. Laboratorion koesiilossa oli kalliomursketta 0-16 mm raekoolla. Päätimme että kaikki kokeet tehdään kyseisellä materiaalilla.

Alussa koesiilossa oleva (KaM 0/16) täytyi löyhdyttää. Kaivamisen edetessä havaittiin että altaan toisessa päässä oleva materiaali oli huomattavasti löyhemmässä tiiveydessä. Laboratoriohenkilökunnan mukaan se johtui tiivistystyö harjoitusten sijoittumisesta altaan toiseen päähän. Toinen mahdollisuus tähän ilmiöön on murskeen lajittuminen kuljetuksesta, materiaalin kippauksesta ulko-ovenpuoleiseen altaanpäähän tai sitten materiaalin siirtämisestä kippausläjistä lapiolla kauimmaiseen päähän. (Kati Orjala)



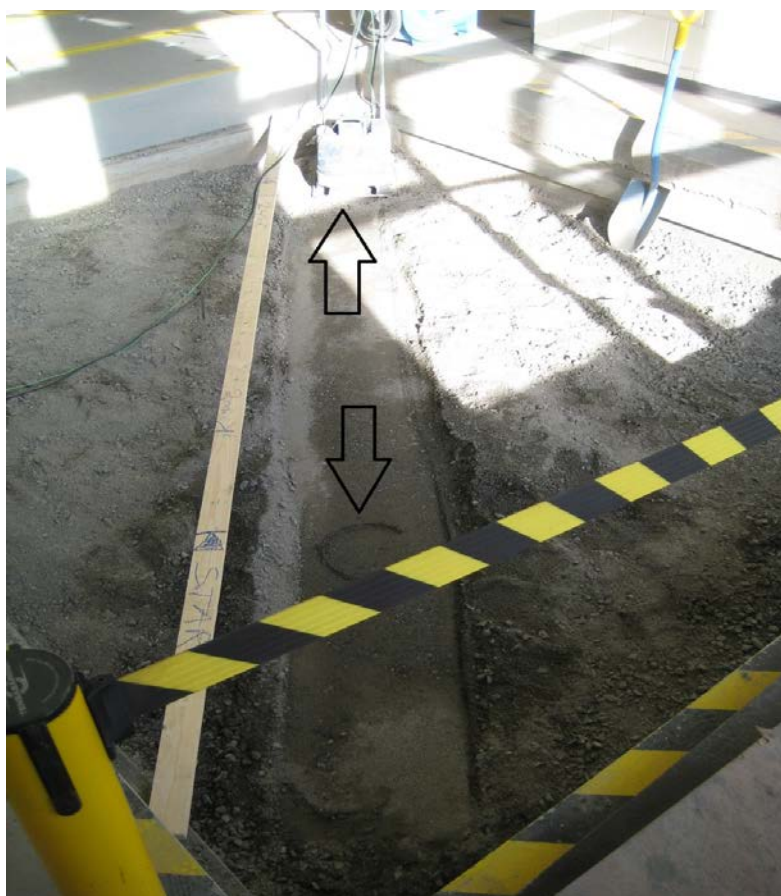
Kuva 6. Alkuperäinen idea koemontusta, jolloin kokeessa tärylätettä pidettäisiin paikallaan (Kuva: Mikko Asunen 2012).

Kokeen aloituksen jälkeen havaittiin kuitenkin, että tärylevyä paikallaan pidettäessä tilannetta ei saada vastaamaan käytännön tiivistystyö tilannetta ollenkaan, koska tärylevylle ominainen liike pyrkii viemään tärylevyä eteenpäin.

Koejärjestelyä muutettiin siten, että ajaisimme tärylätäkää alkuperäisen tutkimussuunnitelman mukaisella (kokoisella) koealueella. Kuoppa on nyt täytetty löyhdytetyllä murskeella.

Neliön muotoisella koeradalla käännöksiä tuli kuitenkin liikaa ja tärylevy ei toiminut moitteettomasti useista käännöksistä johtuen.

Johtuen tärylevyn ominaisuudesta pyrkiä liikkumaan eteenpäin, päätettiin suorittaa koe suoralla testiradalla (Kuva 7). Suoralla testiradalla tärylevy saa edetä rauhassa, eikä siihen kohdisteta muita ulkopuolisia voimia kuin ohjaajan ohjausliike, jotta levy kulkee suoraan testiradalla. Suoran radan havaittiinkin soveltuvan parhaiten tarkoituksiin.



Kuva 7. Suora koeajorata: tiivistäminen tärylevyllä tapahtui ajamalla molempiin suuntiin (Kuva: Mikko Asunen 2012).



Kuva 8. Suora nostettu ajorata tiivistäminen tapahtui molempiin suuntiin ajaen (Kuva: Mikko Asunen 2012).

Yhtenä ideana kokeiltiin ajoradan nostamista hieman ylemmäksi ympäröivästä maasta (kuva 8.). Tällä pyrittiin poistamaan polanne, joka tiivistettäessä syntyy tiivistyksen reunaan. Polanne haittasi tutkimuksia vaikuttaen maan tiivistymiseen, koska tärylevyn reuna ottaa ko. polanteeseen kiinni koko tiivistyksen ajan ja näin ollen vaikuttaa myös tärylevyn kiihtyvyyteen. Nopeasti havaittiin kuitenkin että ns. reunatuon puuttuminen kokeesta ei ollut hyvä asia, koska tiivistettävä murske pääsee leviämään pois tärylevyn alta.

Tärylevyn y-akselin suuntaisen kiihtyvyyden maksimia haimme betonilattialla, tämä siksi että olisimme saaneet signaalille maksimi arvon. Tulokset eivät muodostuneet järkeviksi, koska tärylevyn liike on terävä ja vaatii käytössä alleen jonkinlaisen joustavan tiivistettävän kerroksen. Kova betonilattia saa koneen vain hyppimään hallitsemattomasti sinne tänne.

Materiaalista oli valmiiksi tehty Proctor- sullontakoe, eli materiaalin maksimi kuivatilavuuspaino oli tarkasti tiedossa. Koesiilossa olleen kalliomurskeen maksimi kuivatilavuuspaino oli  $22,4 \text{ kN/ m}^3$ . (Jarno Oravasaari)

Lopullisissa kokeissa päätettiin tutkia materiaalin tiiveyttä eri kosteuksilla ja myös eri vahvuisilla kerroksilla ja havainnoida näiden tekijöiden vaikutuksia kiihtyvyyssarvoihin. Koetilannetta pyrittiin varioida esimerkiksi materiaalia löyhdyttämällä.

Eräissä koejärjestelyissä murskekerroksen alle haudataan betonipalkit. Koejärjestelyllä pyrittiin korreloimaan tilannetta, mitenkä oikein tehty tiivistämistyö etenisi. Tiivistetyn pohjan päälle lisättiin uusi kerros materiaalia, jonka jälkeen tiivistystyötä jatkettiin.

Muutamien testien ja niiden tarkastelujen jälkeen havaittiin että kiihtyvyys kasvaa tiivistymisen edetessä. Myös taajuutta esittävässä kuvaajassa huomaa tiivistämisen vaikutuksen. Tämä tieto antoi varmuutta siitä, että uusia testejä kannattaa tehdä lisää.

Taulukko 1. Koejärjestelyt (\* kokonaispaksuus/löyhennetty)

koejärjestely	kuvaus	radan ajosuunta	laatta	kosteus	kiihdytyskaista	kerrosvahvuus
1.	aloitus	<=-----=>		2 %		2500/500*
2.	kuiva	<=-----=>		1,9 %		2500/500*
3.	kiihdytyskaista kokeilu	-----=>		1,9 %	x	2500/500*
4.	optimivesipitoisuus	-----=>		6,9 %	x	2500/500*
5.	mallintaa proctor sullontaa.	-----=>	x	4,8 %	x	200
6.	mallintaa proctor sullontaa.	-----=>	x	4,9 %	x	400

## 3.2 Koejärjestelyt ja välineet

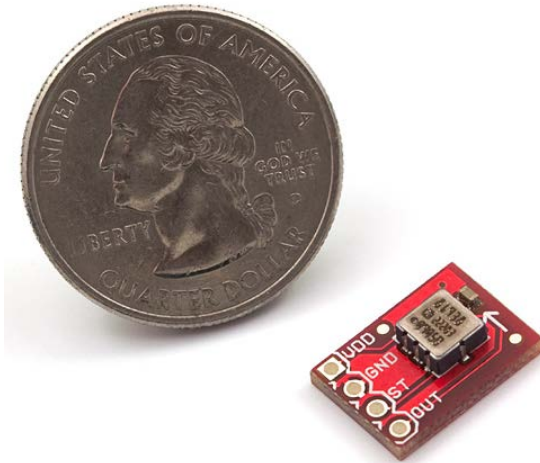
### 3.2.1 Kiihtyvyyssanturi

Yleisesti kiihtyvyyttä mittaavaa laitetta kutsutaan kiihtyvyyssanturiksi. Kiihtyvyyssanturien toiminta perustuu jonkin fyysikaalisen suureen muuttumiseen kiihtyvyyden aikana, esimerkiksi jousivoiman, kapasitanssin, jännitteen tai vastuksen muuttuminen.

Useimmiten kiihtyvyyssanturin toiminta perustuu kiinteisiin piikiteisiin, joiden resistanssi muuttuu kiihtyvyyden muuttuessa. Niin sanotussa Pietsosähköisessä kiihtyvyyssanturissa pietsosähköinen materiaali, esimerkiksi kvartsi, synnyttää sähkövarauksen kiihtyvyyden vaikutuksesta. (www.robomaa.com)

Kiihtyvyyssanturi antaa analogisen jännitteen, joka on suoraan verrannollinen kiihtyvyyden suuruuteen. Kiihtyvyyssanturilla voidaan mitata kiihtyvyyttä joko yksi-, kaksi- tai kolmiulotteisesti, riippuen anturin mallista. Kyseisessä tutkimuksessa käytettiin yksiulotteista kiihtyvyyssanturia, eli mittasimme ainoastaan y- akselin suuntaista kiihtyvyyttä. (www.robomaa.com)

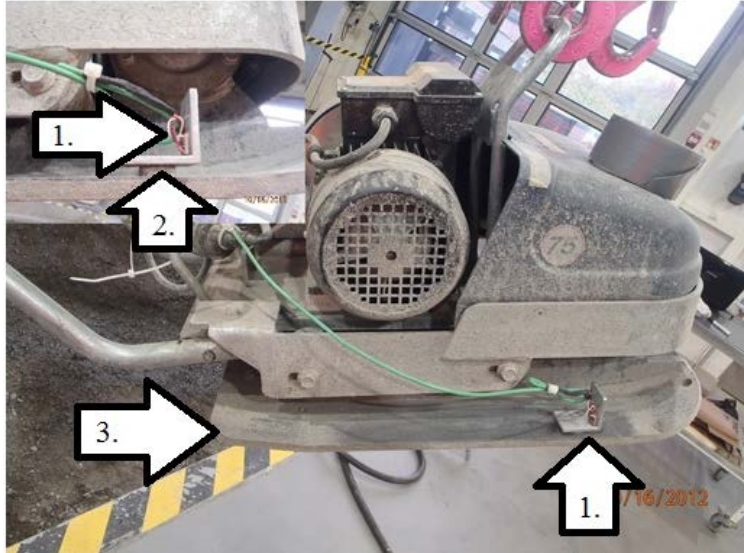
Kiihtyvyyssanturina kokeissa käytettiin yhden akselin kiihtyvyyssanturia, mallimerkinnältään ADXL193 (kuva 9). Anturilla pystyi mittaamaan 250 g:n kiihtyvyyksiä. Käyttämällä anturilla pystyi mittaamaan vain yhden akselin kiihtyvyyttä kerrallaan. Muuttamalla anturin asentoa (x, y, x) olisi ollut mahdollista mitata kiihtyvyyttä valitun akselin suuntaan. (www.robomaa.com)



Kuva 9. ADXL193 (Robomaa)

Kiihtyvyyssanturi (Kuva 9) tarvitsi 5 Voltin (DC) syöttöjännitteen, mistä se sitten antoi anturijännitteenä tutkittavassa kohteessa tapahtuneen kiihtyvyyden. Nyt 5 V:n syöttöjännite oli toteutettu 9 V patterilla ja muuntajalla.

Kiihtyvyyssanturilta takaisin saatu jännite (signaali) on verrannollinen tapahtuneeseen kiihtyvyyteen, niin että 2 V oli 250 g:n kiihtyvyys ja 8 mV:n signaali oli 1 g kiihtyvyys, joka vastaa putoamiskiihtyvyyttä maanpinnalla ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).



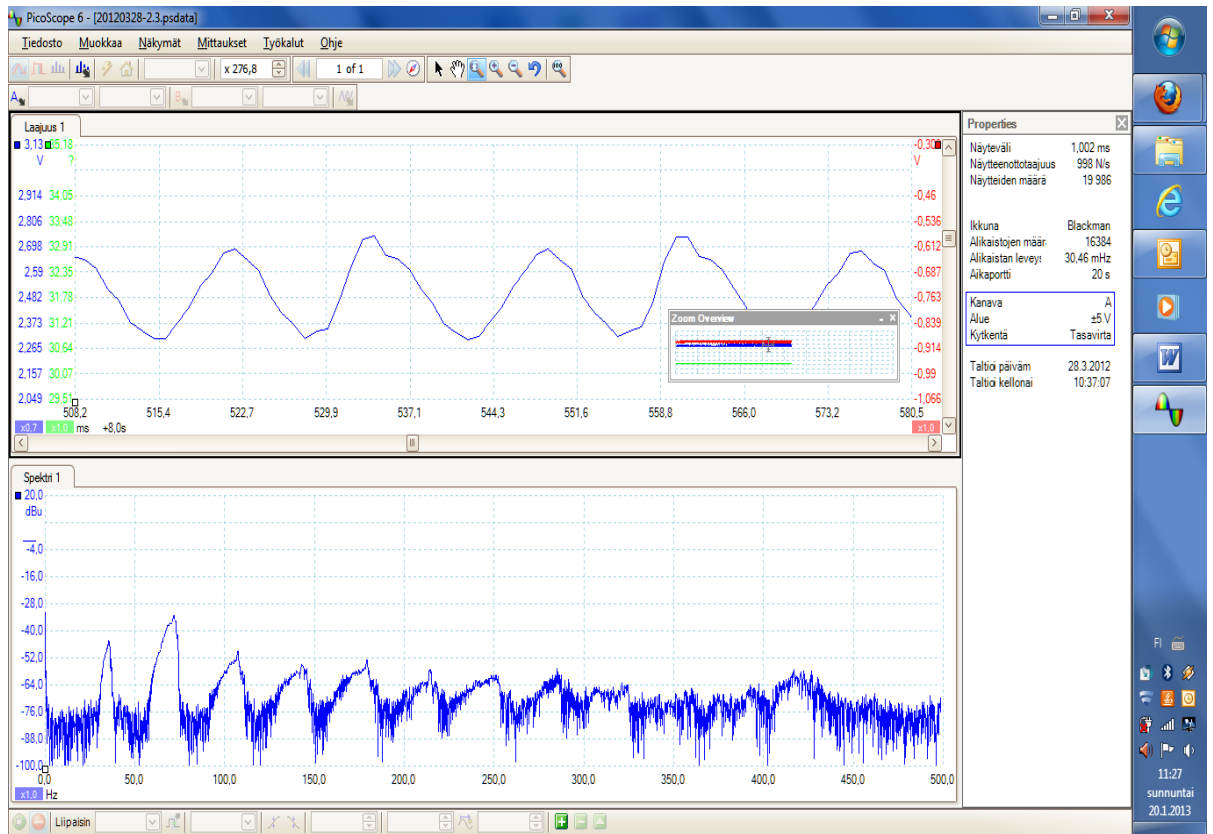
Kuva 10. Kuvaan on nuolilla merkitty seuraavat osat: 1. kiihtyvyyssanturi 2. kiihtyvyyssanturin magneettijalka 3. tärylevy (Kuva: Mikko Asunen 2012)

Kokeilla haluttiin löytää yhteneväisyys tärylevyn kiihtyvyyden ja käytössä olevien maantiiviyden tutkimismenetelmien välille, joten tuloksia ei muutettu kiihtyvyyksiksi vaan tutkittiin anturisignaalia semmoisenaan. Haluttiin selvittää, voiko kiihtyvyyssanturin signaalia hyödyntää tiiveyden määrittämisessä.

### 3.2.2 Oskilloskooppi (PicoScope 4224)

Käytettävissä oli PicoScopen valmistama oskilloskooppi. PicoScope on mittalaite, jossa on USB- liitäntä tietokoneeseen liittämistä varten ja tietenkin myös liitäntöjä mittaavia antureita varten. Yhdessä ohjelmistonsa kanssa se pystyy muuntamaan kannettavan tietokoneen tehokkaaksi oskilloskoopiksi. ([www.picotech.com](http://www.picotech.com))

PicoScopen ohjelmistolla voidaan luoda virtuaalisia mittalaitteita tietokoneella, kuten oskilloskooppi (Kuvio 11), spektrianalysointilaite, digitaalivolttimittari ja digitaalitaajuusmittari. Mittaustiedot voidaan tallentaa ja tulostaa. ([www.picotech.com](http://www.picotech.com))

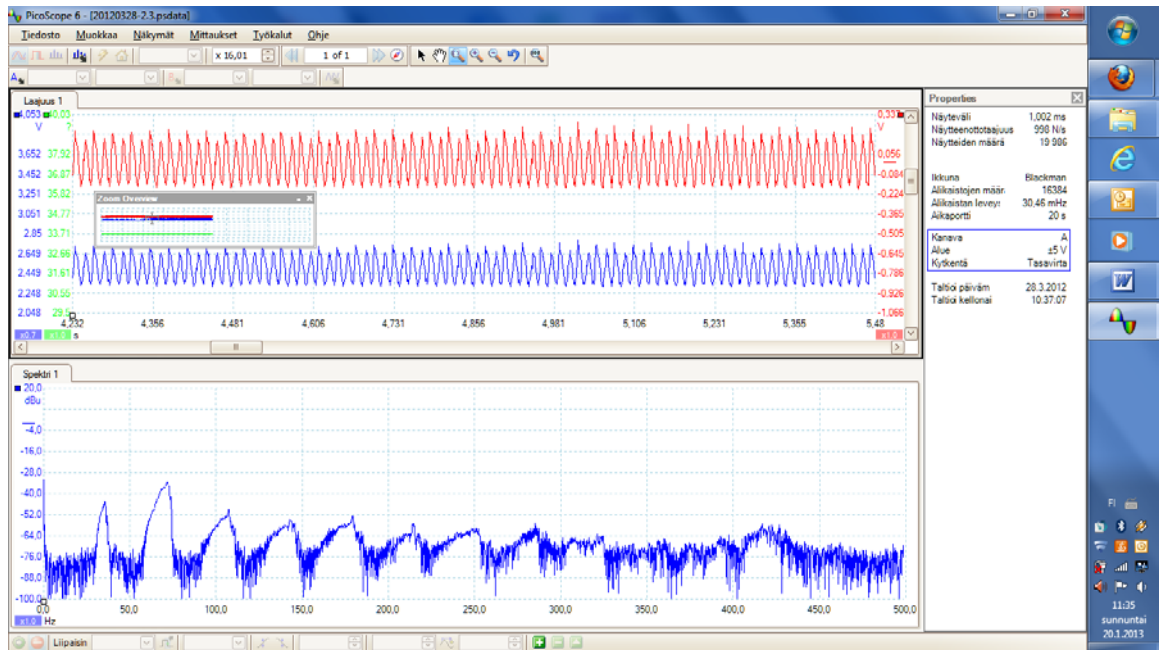


Kuvio 11. Kuvakaappaus oskilloskoopista (Mikko Asunen 2012).

Ohjelmisto pystyy myös tietojen keräämiseen, analysointiin ja reaaliaikaiseen esittämiseen. Monipuolinen tietojen kerääminen tiheydellä 1/ms - 1/päivä, keskiarvojen ja minimi- ja maksimiarvojen määrittäminen, mittausarvojen lineaarinen skaalaus tasausten tai taulukoiden avulla. ([www.picotech.com](http://www.picotech.com))

Oskilloskooppi muutti anturisiinaalin tietokoneavusteisesti luettavaan muotoon ja lisäksi oskilloskoopin ominaisuuksiin kuului, että ohjelmaan voitiin syöttää laskutehtäviä joiden tuloksia pystyttiin tarkastelemaan oskilloskoopin käytön aikana. ([www.picotech.com](http://www.picotech.com))





Kuvio 12. Kuvakaappaus oskilloskoopista (Mikko Asunen)

Kuviossa 12 näemme kiihtyvyyssanturilta saadun signaalin 2,5 V:n kohdalla (sininen) ja myös signaalin joka on pudotettu nollaan, vähentämällä alkuperäisestä signaalista 2,5 voltia (punainen).

### 3.2.3 Tärylevy

Kokeissa käytettiin Swepac:n vuonna 2010 valmistamaa sähköstä käyttövoimansa saavaa tärylevyä (Kuva 11). Tärylevy oli painoltaan 75 kg:n suuruinen ja tärylevy oli varustettu 1,1 kW:n moottorilla. Käyttöjännite tärylevyllä oli 230 V (50Hz/ 6,73 A).



Kuva 11. 75 kg:n sähkökäyttöinen tärylevy (Kuva: Mikko Asunen 2012)

### 3.2.4 Loadman

Loadmanilla mitattiin pudotussarjoja jokaisen tärylevyllä tehdyn koeradan ylittämisen jälkeen. Tuloksista kirjattiin vain painuma jokaisen pudotuksen jälkeen.

### 3.2.5 Tilavuuden muutos

Tilavuuden muutoksen suuruutta tarvitaan todentamaan murskeen tiivistymistä tiivistämistyön edetessä.

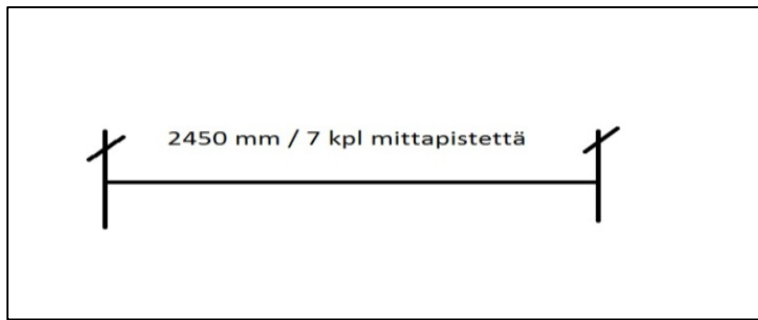
Tilavuuden muutos mitattiin vaakalaserilla. Laseri asennettiin koealtaan reunukseen magneettikiinnityksellä, laserin paikka merkittiin koealtaan reunukseen. Merkistä voitiin kokeen edetessä tarkastaa laserin paikalla pysyminen. Laser lähettää valojuovan koealtaaseen. Valojuovan ja rullamitan avulla koeradan pinnanmuutos mitataan.

Mittaustulokset merkitään mittauspöytäkirjaan, josta sitten tilavuuden muutos voidaan laskea. Laskennassa käytimme muutujana ainoastaan pinnan korkeuden muutosta.

### 3.2.6 Ajorata

Ajoradan (Kuvio 13) sijainti merkittiin siiloon laudan avulla, että koeajoradan dimensiot ja paikka pysyisi muuttumattomana läpi kokeiden.

Lautaan merkittiin ajoradan pituus ja kohdat joista muita mittauksia otettiin, mittaukset suoritettiin etukäteen tehdyn suunnitelman mukaisesti. Radan sivulla sijaitseva mittalaudan paikka merkitään koealtaan reunukseen huopakynällä, jotta mittalaudan paikallaan pysyminen voidaan varmistaa.



Kuvio 13. Ajorata (Matti Mäkelä 2012)

### 3.2.7 Vesivolymetri

Vesivolymetrillä mitattiin kiviaineksen kuivatilavuuspaino, aina kokeen tiivistyön edessä. Mittaukset tehtiin aina testin alussa, puolivälissä ja koesarjan lopussa.

### 3.2.8 Karpidimetri

Karpidimetrillä (Kuva 12) määritetään kiviaineksen kosteusprosentti. Vesivolymetrikokeen tekemisen tueksi täytyy tarkastaa materiaalin sisältämä vesimäärä, koska tiivistymisprosessia tarkastellaan kuivatilavuuspainoina. Karbidimetrikoe on nopea tapa määrittää materiaalin vesipitoisuus.

Koe suoritetaan seuraavasti:

- Tarkasteltavaa materiaalia laitetaan 10 g mittalaitteen painepulloon.
- Painepulloon laitetaan teräskuula ja lasinen ampulli, joka sisältää kardia.
- Painepullo suljetaan ja ravistellaan pulloa parin minuutin ajan.
- Luetaan painemittarista painelukku.
- Mittalaitteen mukana olevasta taulukosta katsotaan paineen avulla kosteusprosentti.
- Mittauksen jälkeen täytyy varoa, koska asetyleenikaasu saattaa räjähtää pullon tyhjentämisen yhteydessä, jos teräskuula aiheuttaa kipinän pullon sisälle.



Kuva 12. Karpidimetri (Kuva: Mikko Asunen 2012)

### 3.3 Olosuhteiden todentaminen mittaustulosten perusteella

Mittapöytäkirjaan teimme seuraavat laskelmat kaikista kokeista:

Tilavuuspaino saatiin kaavasta (2):

$$\gamma = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g \quad (2)$$

missä,  $\gamma$  on tilavuuspaino  $\text{kN/m}^3$ ,  $\rho$  on irtotiheys  $\text{g/cm}^3$ ,  $m$  kuopasta otettu massa kosteana  $\text{g}$ ,  $V$  kuopan tilavuus  $\text{cm}^3$  ja  $g$  maanvetovoiman kiihtyvyys  $9,8 \text{ m/s}^2$ .

Kuivatilavuuspaino lasketaan kaavasta (3):

$$\gamma = \frac{\gamma}{1 + \gamma \frac{w}{100}} \quad (3)$$

missä,  $w$  on kosteusprosentti.

Tilavuuden (pinnan korkeuden) muutos saadaan kaavasta:

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (4)$$

missä,  $\Delta h$  on pinnan muutos,  $h_1$  on mitta kokeen alussa ja  $h_2$  on mitta tarkasteltavan ylityskerran jälkeen (7 ja 15).

Kosteusprosentti:

Maanäytteen kosteusprosentti määritettiin ainoastaan karbidimetrillä ja merkittiin mittapöytäkirjaan.

### 3.4 Kokeet rakennuslaboratoriossa

#### 3.4.1 Koejärjestely 1

Ensimmäisenä koejärjestelynä oli selvittää, miten koe käytännössä tehdään. Ensimmäinen koejärjestely onkin selvitetty kappaleessa 3.1. Ensimmäisestä koejärjestelystä emme tehneet laskentaa ollenkaan, johtuen koejärjestelyn kokeellisuudesta.

#### 3.4.2 Koejärjestely 2

Suoritimme aloituspäivän kokeen kokonaisuudessaan uudestaan. Ennen varsinaista kokeen tekemistä täytyy tehdä mittaradan esivalmistelut. Tämä kyseinen työvaihe on kokeiden tekemisessä se ruumiillisia työponnisteluja vaativin työvaihe. Tässä vaiheessa murskeeseen lisätään vettä murskeen pölyämisen hillitsemiseksi. Tähän testiradan valmisteluun pyrimme lisäämään mahdollisimman vähän vettä, koska testi oli suunniteltu tehtäväksi mahdollisimman kuivalla materiaalilla.

Varsinaiset mittauksen valmistelut alkavat mittaradan kaivamisen ja radan tasaamisen jälkeen. Näihin töihin kuuluvat, tärylätjän varustaminen kiihtyvyyssanturilla, oskilloskoopin yhdistäminen kiihtyvyyssanturiin ja tietokoneeseen, vaakalaserin kiinnitys koe-

siilonreunukseen ja mittausvälineiden paristojen tarkastus (vaikea toimenpide, koska mittausvälineissä ei ole testereitä pattereille)

Varsinainen testien tekeminen aloitettiin murskeen pinnan korkeuden mittaamisella. Mittaus suoritetaan vaakalaserin lähettämästä valojuovasta, juovasta mitataan rullamitalilla murskeen pinnan korkeusasema. Mittauspisteitä oli radalla kolme, alussa, lopussa ja keskivaiheilla. Korkeuden muutosta seurataan kokeen edetessä, korkeudet kirjataan ylös kokeen alussa, puolivälissä ja lopussa.

Ennen testejä mittaradasta otettiin ensimmäinen murskeen tilavuuspaino, koe tehtiin vesivolymetrillä. Samasta näytteestä mitattiin myös murskeen kosteusprosentti, mittaus toteutettiin karbidimetrikokeella.

Loadman testi tehtiin ennen testien aloittamista, loadman testi toteutettiin käyttäen mitalaitteen 300 mm halkaisijalla olevaa pohjalevyä. Pohjalevyä käytetään vain ensimmäisessä mittauksessa, koska murske on juuri kaivettu ja möyhennetty, joten painuma tulisi liian suureksi pienemmällä pohjalevyllä.

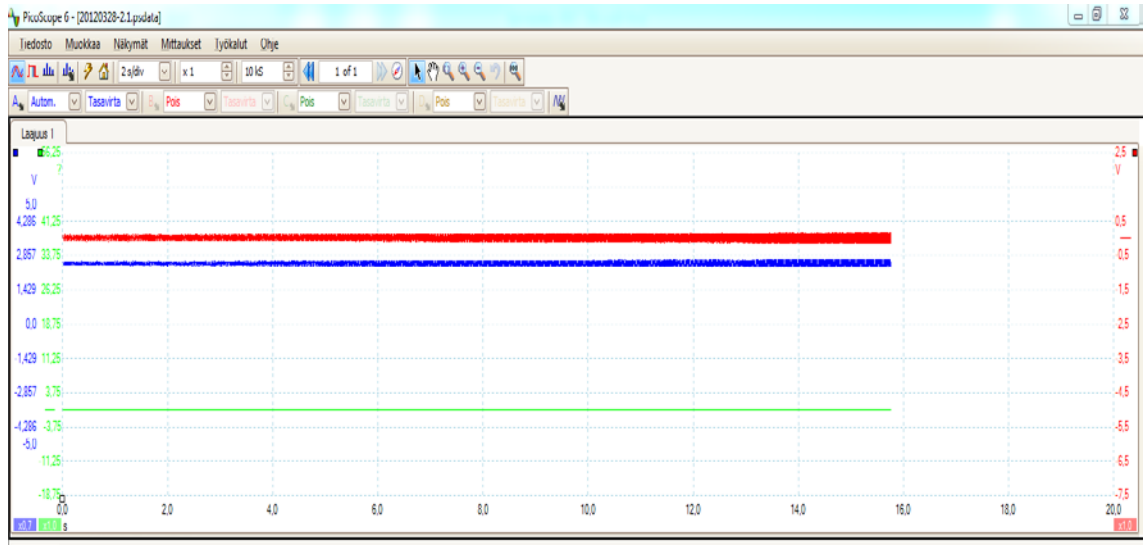
Valmistelujen jälkeen aloitettiin itse testit. Suoritimme aloituspäivänä tehdyn testin kokonaisuudessaan uudestaan. Käytimme samaa koejärjestelyä kuin mihin aloituksessa päädyimme. Tärylätäkää ohjattiin rataa pitkin molempiin suuntiin, samalla dataa talteen ottaen (Kuva 7).

Loadman testaukset otettiin jokaisen yliajokerran jälkeen, mutta muistiin ei laitettu muuta kuin pelkkä painuma. Testaukset tehdään eri kohdalta testirataa joka kerta, tällä tavoin toimien loadman testin tiivistävä vaikutus ei aiheuta haitallisen suurta tiivistymistä testirataan. Pudotus-sarjat ovat pituudeltaan 3-4 pudotuksen pituisia, ainoastaan testien alussa, puolivälissä ja lopussa tehdään pudotus-sarja loppuun asti.

Vesivolymetri ja karbidimetri kokeet tehdään myös kolme kertaa testin aikana. Mittaukset tehdään yliajokertojen 0, 7 ja 15:sta jälkeen.

Testien jälkeen testasimme koemielessä muutamia uusia ideoita, jolla testaukset saataisiin yhtenäisimmiksi. Ideoissa otimme huomioon myös testien uusimisen ja toistamisen

helppouden. Luultavammin myös ulkopuoliset häiriötekijät vaikuttaisivat vähemmän uuteen testauskäytäntöön.



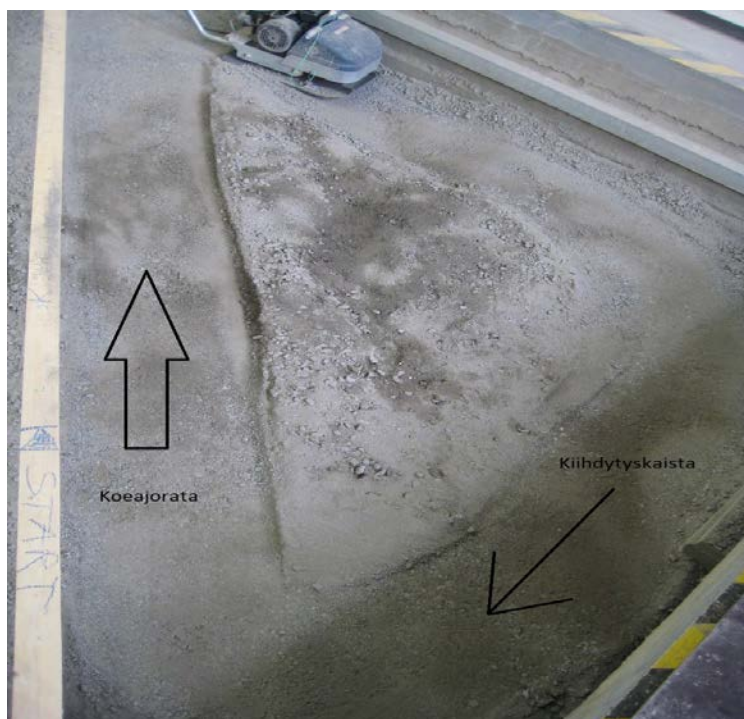
Kuvio 14. Kuvakaappaus oskilloskoopista.

### 3.4.3 Koejärjestely 3

Aloitimme testin tekemisen testiradan löyhdyttämällä. Aamupäivän tiivistykokeet olivat tiivistäneet murskeen pinnan todella tiiviiksi, mutta tiivistys vaikutus ei onneksi ollut ulottunut kovin syväälle. Valmistelevien toimien jälkeen päästiin jatkamaan testaamista.

Edellisessä testissä havaitsimme, että tärylätkä vaatii kunnolla käynnistyäkseen tietyn ajomatkan. Kuvio 14:stä huomasimme, että kiihtyvyys kiihtyy koko ajan testin edetessä. Tämä ei tunnu kovin loogiselta, koska tiivistettävä maa-aines on kuitenkin varsin homogeenista.

Tästä syystä lisäsimme testirataan kiihdytyskaistan (Kuva 13), jossa tärylevy kerkesi käynnistymään kunnolla ennen testiradan alkamista. Kun teimme testiä, tärylätkä pysäytettiin aina radan loppuun. Uudelle testilenkille lähdettiin radan lopusta ja sieltä ajoimme suoraan testiradalle.



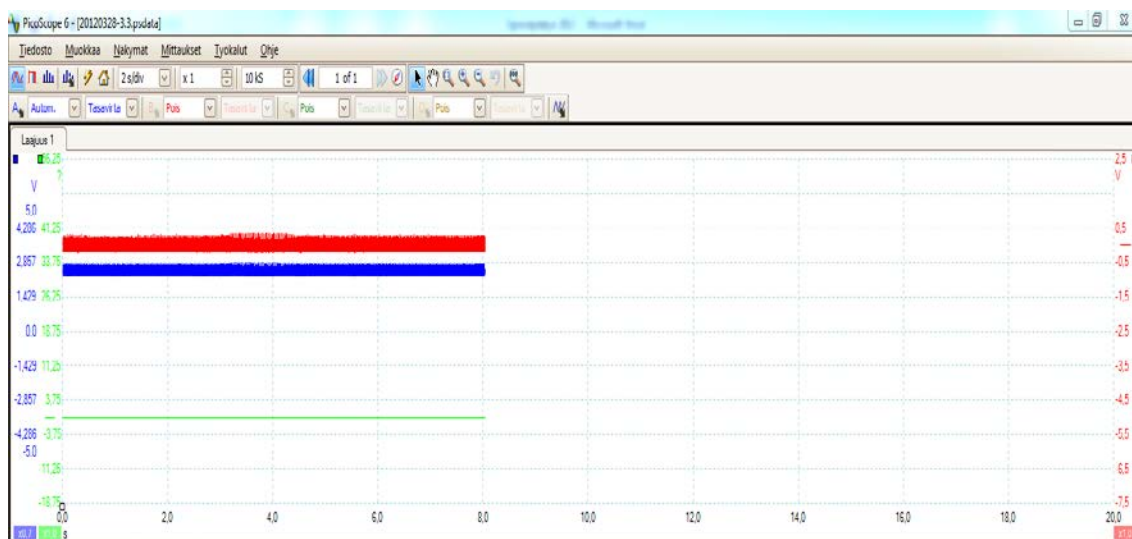
Kuva 13. Koeajorata, kuvassa näkyy myös kiihdytyskaista (Kuva: Mikko Asunen 2012).

Tällä toimenpiteellä saatiin aikaan se että tärylevy saavutti ominaistaajuutensa jo varsinaisen mittaradan ulkopuolella. Datan tarkastelu antoi myös lupaavia arvoja uuden testaus käytännön puolesta.

Muut tarkastelut ja mittaukset tehtiin alkuperäisen suunnitelman mukaisesti, jotta testaukset olisivat yhtäläisiä. Lopetimme testien tekemisen 10 ylityskerran jälkeen, koska ajattelimme hyväksyttää koejärjestelyn valvojillamme.

Datasta pystyimme kuitenkin heti päättelemään, että testijärjestely oli käyttökelpoinen. Kuten kuviosta 15 voidaan nähdä, on kiihtyvyyys nyt paljon tasaisempi koko testiradan ajalla.





Kuvio 15. Kuvakaappaus oskilloskoopista

Pariston loppumisen kanssa tuli tässäkin testissä pieni häiriö, nyt vuorossa oli loadman koneen paristo.

#### 3.4.4 Koejärjestely 4

Aloitettiin taas mittaradan valmistelulla, epäonneksi testien toteuttamisen välillä on tehty altaassa muita tiivistyskokeita. Tästä syystä mittaradan kaivaminen tuntui todella haasteelliselta. Mittaradan kaivaus tehdään tällä kertaa puoli metriä syväksi, joten kyllä siinä tulee lapio tutuksi työkaluksi.

Vettä lisätään koko kaivausten ajan, koska tarkoituksena oli tutkia kiihtyvyyttä kosteassa murskeessa. Veden lisääminen onneksi vähentää pölyämistä. Vettä täytyy lisätä koko ajan kun kaivantoa täytetään, kuiva murske vaatii todella paljon vettä kosteusprosentin saamiseksi lähelle optimivesipitoisuutta.

Testit toteutetaan normaalisti alustavien suunnitelmien mukaisesti. Kosteata mursketta tiivistettäessä huomattiin, ettei ylityskertojen lisääminen tuota murskeen pintaan hienoa-aineksesta koostuvia esiintymiä. Tällainen ilmiö oli todennettavissa kuivalla materiaalilla tehdyissä kokeissa

Varsinkin tilavuuspainoista pystyy päättämään että murskeen kastelu on onnistunut varsin hyvin. Tilavuuspaino kokeen lopussa on aivan todella korkea, (suuri arvo johtuu luultavasti murskeen lajittumisesta)

### 3.4.5 Koejärjestely 5

Testillä numero 5 ajattelimme pyrkiä lähelle hyvin tehtyä tiivistystyötä, seuraavalla koejärjestelyllä, koejärjestely pyrki omalla tavallaan matkimaan proctor koetta (Kuva 17). Murskeeseen testiradan alle haudataan kaksi betonipalkkia (Kuva 14), tämä tietää entistäkin kovempaa lapion heiluttelua. Betonipalkit saimme onnesta rakennuslaboratoriosta. Betonipalkit olivat oppilaiden betoniteknikan kurssilla tekemiä testipalkkeja, joilla betonin ominaisuuksia testataan.



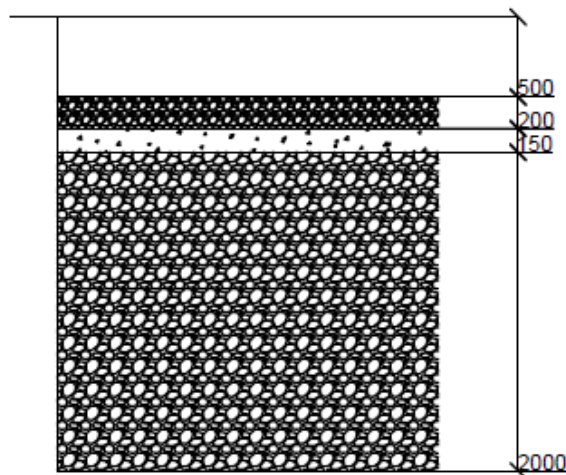
Kuva 14. Betonipalkit kaivannossa (Kuva: Mikko Asunen 2012).

Palkit ovat 150 mm x 250 mm x 2400mm kokoisia. Kaksi palkkia rinnakkain riittää käyttämämme tärylätjän leveydelle hyvin. Murskeen reunat (Kuva 15) kaivauksen edessä pyritään pitämään koskemattomana. Jyrkät reunukset pidetään kosteana, ettei reunit lossaa kuivuessaan.



Kuva 15. Kuva betonipalkkien päältä ennen testin aloittamista (Kuva: Mikko Asunen 2012).

Kovalla pohjalla toteutettiin ensimmäinen testi, jossa murskeella oli kerrosvahvuutta betonin päällä 200 mm (Kuvio 16). Koska käytössä oleva tiivistäjä oli vain 75 kg painoinen, eivät sen tiivistysominaisuudet ulotu kovinkaan syvälle. Siksi tämä koejärjestely tuntuikin järkevimmältä kaikista tähän mennessä tehdyistä testeistä.



Kuvio 16. Havainne kuva testijärjestelyn kerroksista (Matti Mäkelä 2012).

Tulokset näyttivätkin lupaavilta heti alkuunsa. Tiivistyminen eteni vauhdilla, mutta pieni kone ei saa aikaan niin sanottua ylitiivistymistä, vaikka kerros ei ollut kovin paksu (Kuva 16).



Kuva 16. Koeajorata ennen testin aloittamista ja pikkukuvassa on mittalaite kerrosvahvuuden mittaamiseen (Kuva: Mikko Asunen 2012).

Muut tarkastelut ja mittaukset tehdään kuten kaikissa edellisissäkin testeissä. Mittarata oli aivan edellisten mittaratojen toisinto, eli mittaustulokset ja mittauspisteet ovat yhtäläiset koko testien ajan. Veden lisäykset kaivausten edetessä voi todeta kosteusprosentteista.



Kuva 17. Testirata käytössä (Kuva: Mikko Asunen 2012).

### 3.4.6 Koejärjestely 6

Koejärjestely 6, kokeessa käytetään pohjalaattaa ja koe toteutettiin uusintana edellisestä kokeesta, eroavaisuutta on vain murskekerroksen vahvuudessa (Kuva 18).



Kuva 18. Mittalaite ja havainne kuva testin rakennekerroksista (Kuva: Mikko Asunen 2012).

Kokeen alkuvalmistelut aloitetaan betonilaattojen päällä olevan tiivistetyn murskeen möyhennyksellä, pehmittämiseen hyvä työkalu on rautakanki. Palkkien päällä olevan murskeen pehmittämisen jälkeen, lisätään mursketta, jotta kokonaiskerrosvahvuus saadaan 400mm.

Kokeet toteutetaan tästä eteenpäin, kuten kaikissa muissakin kokeissa. Veden lisäystä vältetään, jotta testillä olisi hieman eri kosteusprosentti kuin ohuemmalla kerrosvahvuudella tehdyllä testillä.

## 4 MAAN TIIVIYDEN MÄÄRITTÄMINEN TÄRYLEVYN Y-AKSELIN SUUNTAISEN KIIHTYVYYDEN AVULLA

### 4.1 Kiihtyvyys

Paikan ja nopeuden lisäksi liikettä voidaan yleisesti kuvata kiihtyvyyden avulla. Nopeus ( $v$ ) kuvaa paikan muutosta (siirtymä) ajan suhteen ja kiihtyvyys ( $a$ ) puolestaan kuvaa nopeuden muutosta ajan suhteen. Keskikihtyvyys voidaan määrittää seuraavasti:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

missä  $\Delta v$  kuvaa nopeuden ja  $\Delta t$  ajan muutosta pisteiden 2 ja 1 välillä.

Hetkellinen kiihtyvyys infinidesimaalisen pienelle ajanjaksolle ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) määritellään puolestaan seuraavasti:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dt} \right) = \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (5)$$

Kiihtyvyyden yksikkö on  $\text{m/s}^2$ . Kiihtyvyys ilmoitetaan usein myös gravitaatiovoiman eli painovoiman aiheuttaman kiihtyvyyden ( $g$ ) avulla ( $1 \text{ g} = 9.81 \text{ m/s}^2$ ). Kiihtyvyys voi saada arvon  $0 \text{ m/s}^2$ , vaikka tarkasteltava kohde liikkuisikin, tällöin nopeus pysyy vakiona eikä muutu.

### 4.2 Datan sisältö

Datassa aika kertoo tärylevyn paikan koeajoradalla, tärylevy liikkui kiihdytyskaistalla varustetuilla koeajoradoilla melko vakiolla nopeudella, näin voidaankin varmasti ajatella, että laskemalla saatu sekunnin kiihtyvyyksien summa, jonka laskeminen selvitetään edempänä opinnäytetyössä, kuvaa kiihtyvyyttä ko. sekunnin kohdalla mittaradalla. Koeajoradalla oli siis kahdeksan mittapistettä ja radan ajamiseen kului myös tuo noin kahdeksan sekuntia.

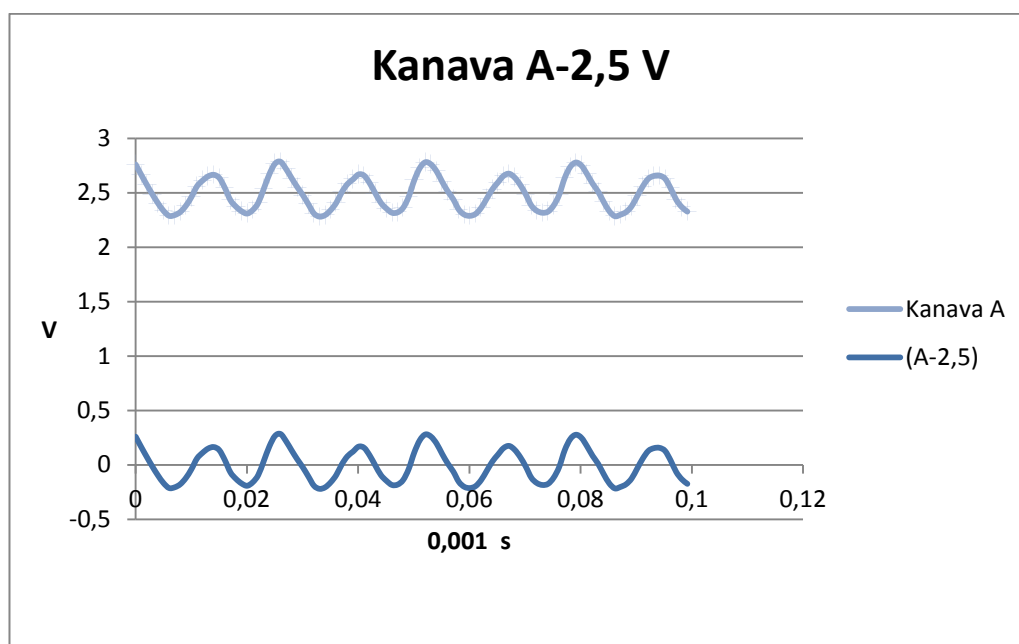
Koko koeajoradalla oli aina ylityksen ajan sama tiiveys, koska alussa murske löyhennettiin koko radan mitalla ja tiivistettäessä aina ylitettiin koko ajorata kerralla. Ajatuksena kiihtyvyyden tulisi siis olla aika vakio aina samalla ylitys kerralla.

Kiihtyvyydsanturilta otettiin arvoja talteen, 0,001 sekunnin välein ja testiradan yhteen ylitykseen kului noin kahdeksan sekuntia. Näin ollen saadaan varsin paljon dataa laboratoriokokeista analysoitavaksi.

Laboratoriokokeista saadun datan laajuudesta johtuen, varsinainen tulkinta oli tehtävä laskemalla saatujen tulosten kaaviokuvista. Kaavioiden muoto yritetään saada sellaiseksi, että niiden tulkinta olisi helppoa ja johdonmukaista.

#### 4.3 Kiihtyvyyden tutkiminen

Laskimme Excelillä Datasta kiihtyvyyttä, kuitenkin muuttamatta anturilta saamaamme anturijännitettä kiihtyvyydeksi. Ensimmäinen laskutoimitus oli vähentää anturijännitteestä 2,5 V, jolloin anturilta saamamme data putosi tasoltaan 0 Volttiin, kuten kuviosta 17 voimme havaita. Näin on helpompi havainnoida kiihtyvyyden suuntaa, onko tärylevyn kiihtyvyys kasvamassa ylöspäin + vai alaspäin -.



Kuvio 17. Signaalin muokkaaminen (Mikko Asunen 2013)

Tämän jälkeen korjasimme dataa vielä vähentämällä siitä ensimmäisen sekunnin keskiarvon ja korotimme vielä tämän toiseen potenssiin, jolloin saimme vastauksena  $a_{\text{korj}}^2$  (Kuvio 18). Toiseen potenssiin korottaminen suurentaa datan vaihteluväliä, jolloin havainnointi paranee.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1								SUMMA(E8:1005)	23,3443	0
2								SUMMA(E1008:2005)	24,2598	1
3	Aika (s)	Kanava A (V)	(A-2,5) (V)	(A-2,5)-keskiarvo(C6 - C1006)	(A-2,5)*(A-2,5)			SUMMA(E2006:3005)	24,9752	3
4								SUMMA(E3006:4005)	25,1817	4
5			0,0007					SUMMA(E4008:5005)	26,4700	5
6	0	2,7603	0,2603	0,2597	0,0674	23,3443	0	SUMMA(E5006:6005)	26,3032	6
7	0,001	2,6651	0,1651	0,1644	0,0270			SUMMA(E6006:7005)	25,9620	7
8	0,002	2,5736	0,0736	0,0729	0,0053			SUMMA(E7006:8005)	26,2742	8
9	0,00301	2,4857	-0,0143	-0,0150	0,0002					
10	0,00401	2,4045	-0,0955	-0,0962	0,0093					
11	0,00501	2,3343	-0,1657	-0,1664	0,0277					
12	0,00601	2,2885	-0,2115	-0,2122	0,0450					
13	0,00701	2,2952	-0,2048	-0,2055	0,0422					
14	0,00802	2,3233	-0,1767	-0,1774	0,0315					
15	0,00902	2,3801	-0,1199	-0,1206	0,0146					
16	0,01002	2,4606	-0,0394	-0,0400	0,0016					
17	0,01102	2,5595	0,0595	0,0588	0,0035					
18	0,01202	2,6120	0,1120	0,1113	0,0124					
19	0,01303	2,6511	0,1511	0,1504	0,0226					
20	0,01403	2,6651	0,1651	0,1644	0,0270					
21	0,01503	2,6370	0,1370	0,1364	0,0186					
22	0,01603	2,5455	0,0455	0,0448	0,0020					
23	0,01703	2,4325	-0,0675	-0,0681	0,0046					
24	0,01804	2,3727	-0,1273	-0,1279	0,0164					
25	0,01904	2,3306	-0,1694	-0,1701	0,0289					
26	0,02004	2,3092	-0,1908	-0,1914	0,0386					
27	0,02104	2,3410	-0,1590	-0,1597	0,0255					

Kuvio 18. Kuvakaappaus Excelistä (Mikko Asunen 2013).

Näistä  $a_{\text{korj}}^2$ :n sitten laskimme yhteen sekunnin summat ja keräsimme saadut sekunnin summat tarkasteltaviksi allekkain. Sekunnin summia tuli aina 8 kpl per testiradan ylitys.

Kun kaikista yhteen kokeeseen liittyvistä testiradan ylityksistä oli laskettu  $a_{\text{korj}}^2$ , aloitimme kaavioiden luonnin. Kaavioihin tuli vaaka-akselille aika (t) sekunteina kuvaamaan koeajorataa ja pystyakselille tuli tutkittava suure  $a_{\text{korj}}^2$ .

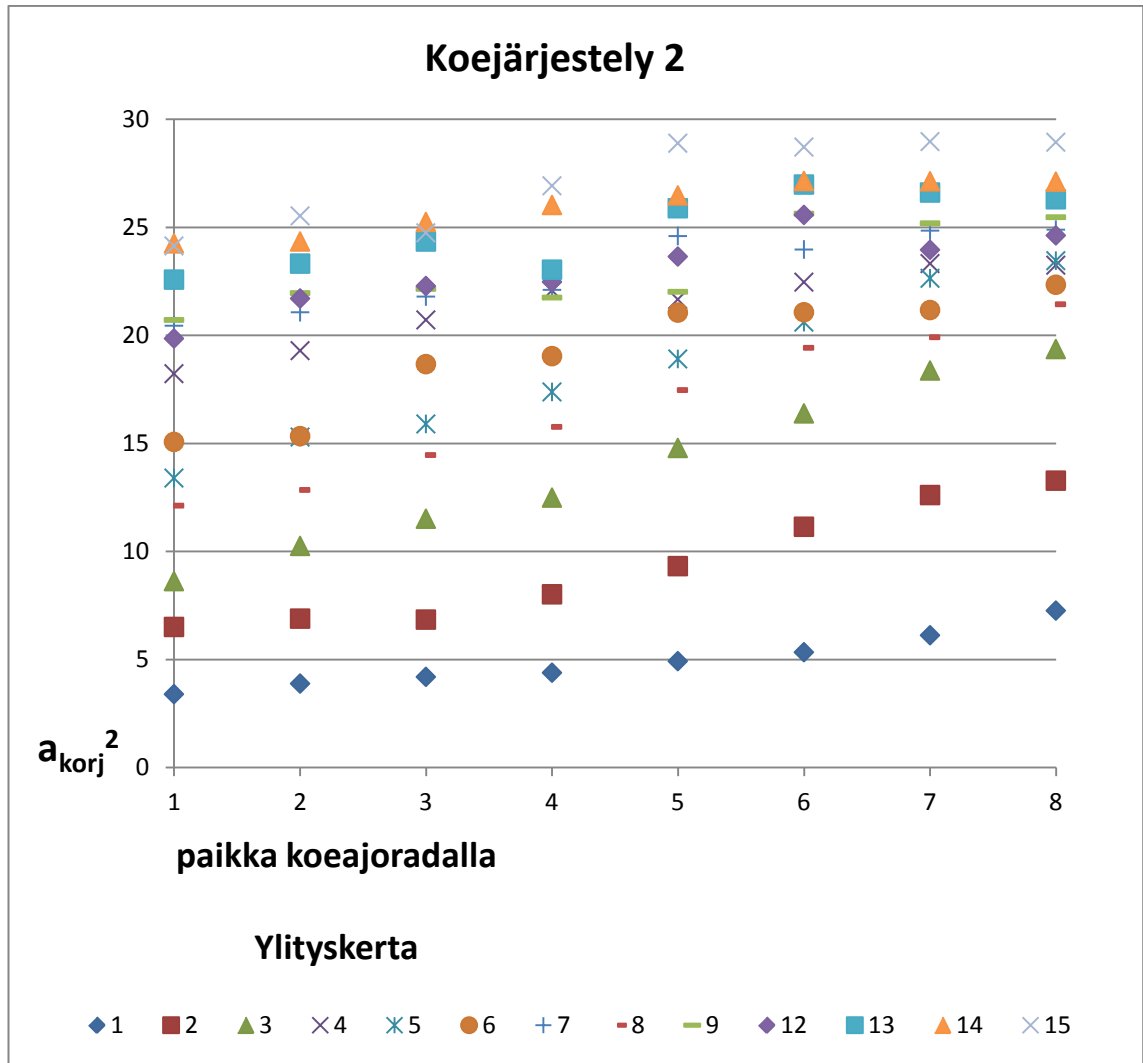
Kaavioiden avulla pystyimme selvittämään mahdollisen korrelaation maan tiivistymisen ja tärylevyn kiihtyvyyden välille.

#### 4.3.1 Koejärjestely 2

Kokeessa numero 2 ajoimme koeajorataa edestakaisin, ilman kiihdytyskaistaa. Kuvioista 19 voimme havaita tärylevyn kiihtyvyyden kasvavan koeajoradan loppua kohden. Koe-



ajoradalla vallitsi vakio maantiiveys aina ylityksen ajan. Koeajoradan ylityksiä tuli aina 15 kappaletta per koe.

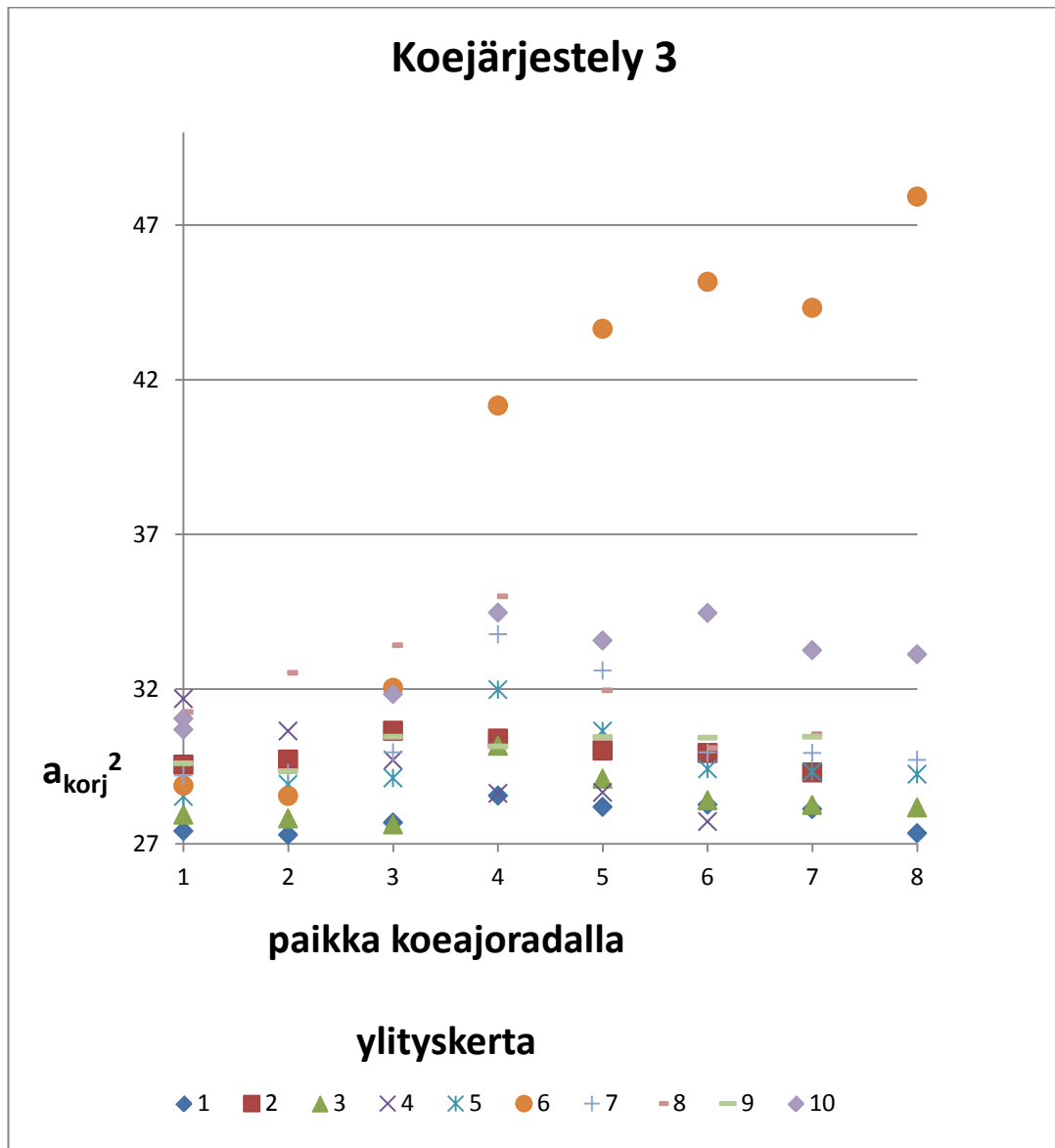


Kuvio 19. Koejärjestely 2 (Mikko Asunen 2012)

#### 4.3.2 Koejärjestely 3

Edellisessä kokeessa havaitsimme, että tärylevy vaatii kunnolla käynnistyäkseen jonkin verran ajomatkaa, arviolta noin 1-2 metriä.

Kolmanteen kokeeseen lisäsimme koeajoradan alkuun alueen, jolla tärylevy käynnistetään kunnolla, ennen saapumista varsinaiselle koeajoradalle. Alue nimettiin kiihdytyskaistaksi. Havaitsimme että koeajorataan lisätty kiihdytyskaista toimii, koska kiihtyvyyksi ei kasva enää radan loppua kohden, muuten tulokset hajaantuvat kaavioon aika epämääräisesti.



Kuvio 20. Koejärjestely 3 (Mikko Asunen 2012)

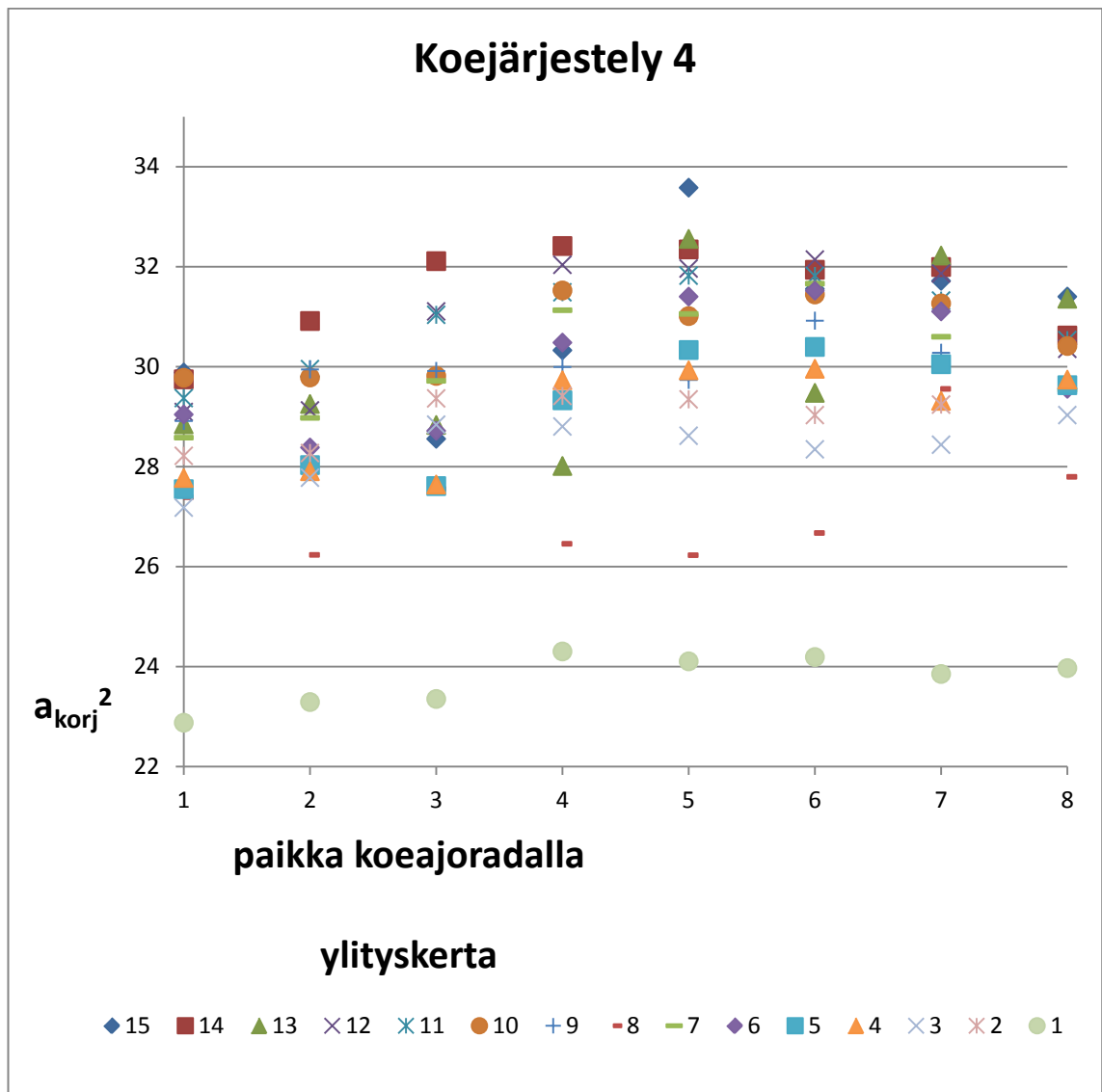
Mahdollinen kiihtyvyyksien hajonta, ylityskertojen välillä ja ylityskertojen sisälläkin, johtui tiivistettävänä olevan murskeen kuivuudesta. Koeajoradalle alkoi muodostua hieno-ainesta, hieno-aines kulki tärylevyn edellä aiheuttaen muutosta kiihtyvyyteen.

#### 4.3.3 Koejärjestely 4

Edellisessä kokeessa havaitsimme että hieno-aines voisi haitata kiihtyvyyden korrelointia maan tiivistymiseen.

Lisäsimme kokeeseen 4 tutkittavan materiaalin kosteutta. Tiivistettävän murskeen kosteusprosentti nostettiin lähelle optimivesipitoisuutta ja ajoimme edelleen tärylevyllä koeajoradalle kiihdytyskaistan kautta.

Kaaviosta havaitsemme, että murskeen vesipitoisuuden nostaminen aiheutti tiiviiden nopeamman kasvamisen.



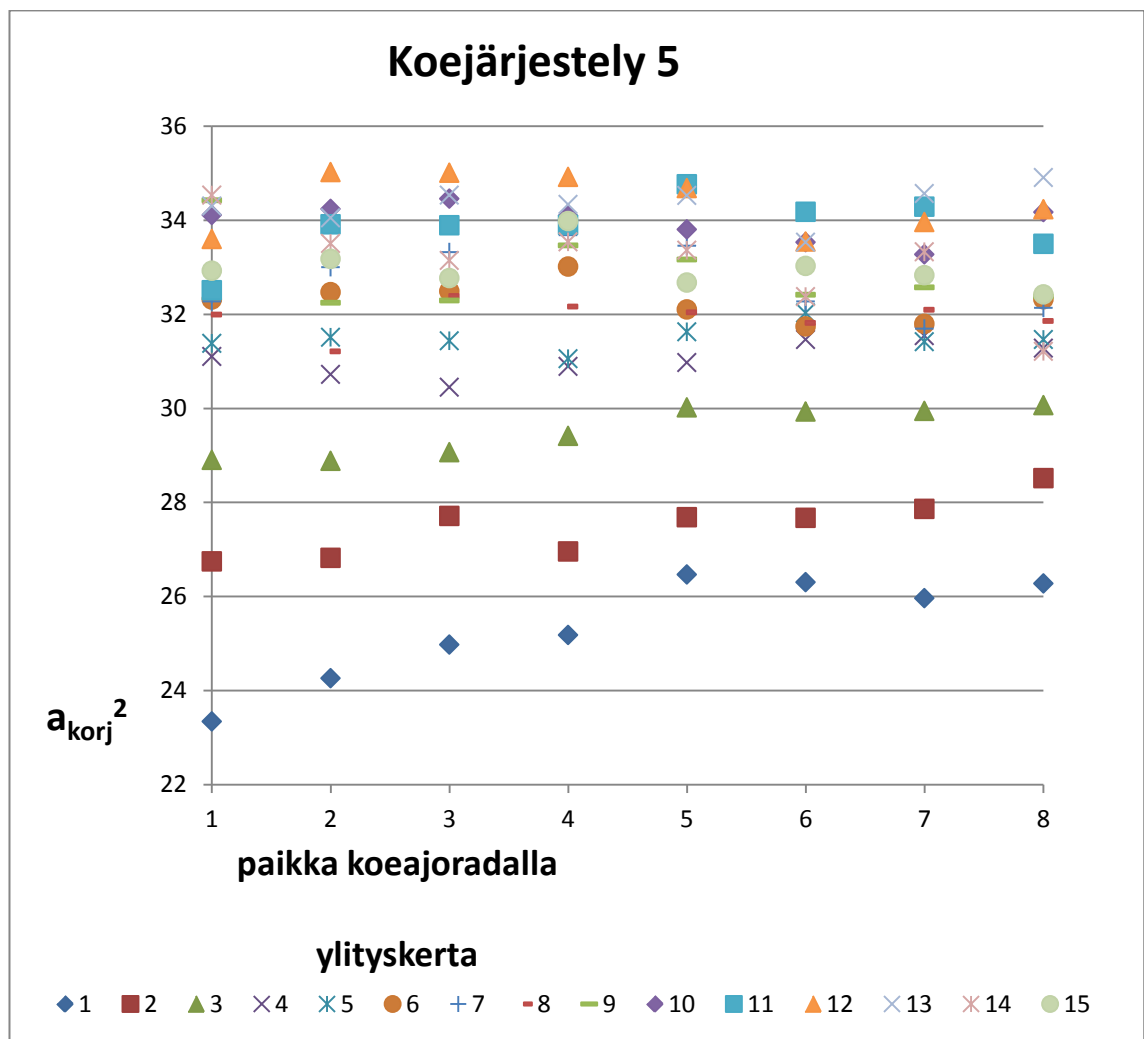
Kuvio 21. Koejärjestely 4 (Mikko Asunen 2012)

Testissä mielenkiintoiseksi nousi kiihtyvyyden kasvaminen koeajoradan keskivaiheilla. Koeajoradan alussa ja myös lopussa kiihtyvyys oli selvästi matalammalla tasolla, kuin kokeen keskivaiheilla. Kiihtyvyyden kasvu keskivaiheilla rataa näyttäisi vielä kasvavan kokeen edetessä.

Kiihtyvyyden kasvaminen koeajoradan keskivaiheilla voisi selittyä, koealtaan seinämien läheisyyden vaikutuksella tärylevyn mitattuun kiihtyvyyteen. Altaan seinämistä saattoi tulla heijastumia, jotka sitten pienensivät kiihtyvyyttä seinämien (reunojen) läheisyydessä.

#### 4.3.4 Koejärjestely 5

Kokeessa numero 5 laitoimme betonipalkit tiivistettävän kerroksen alle.



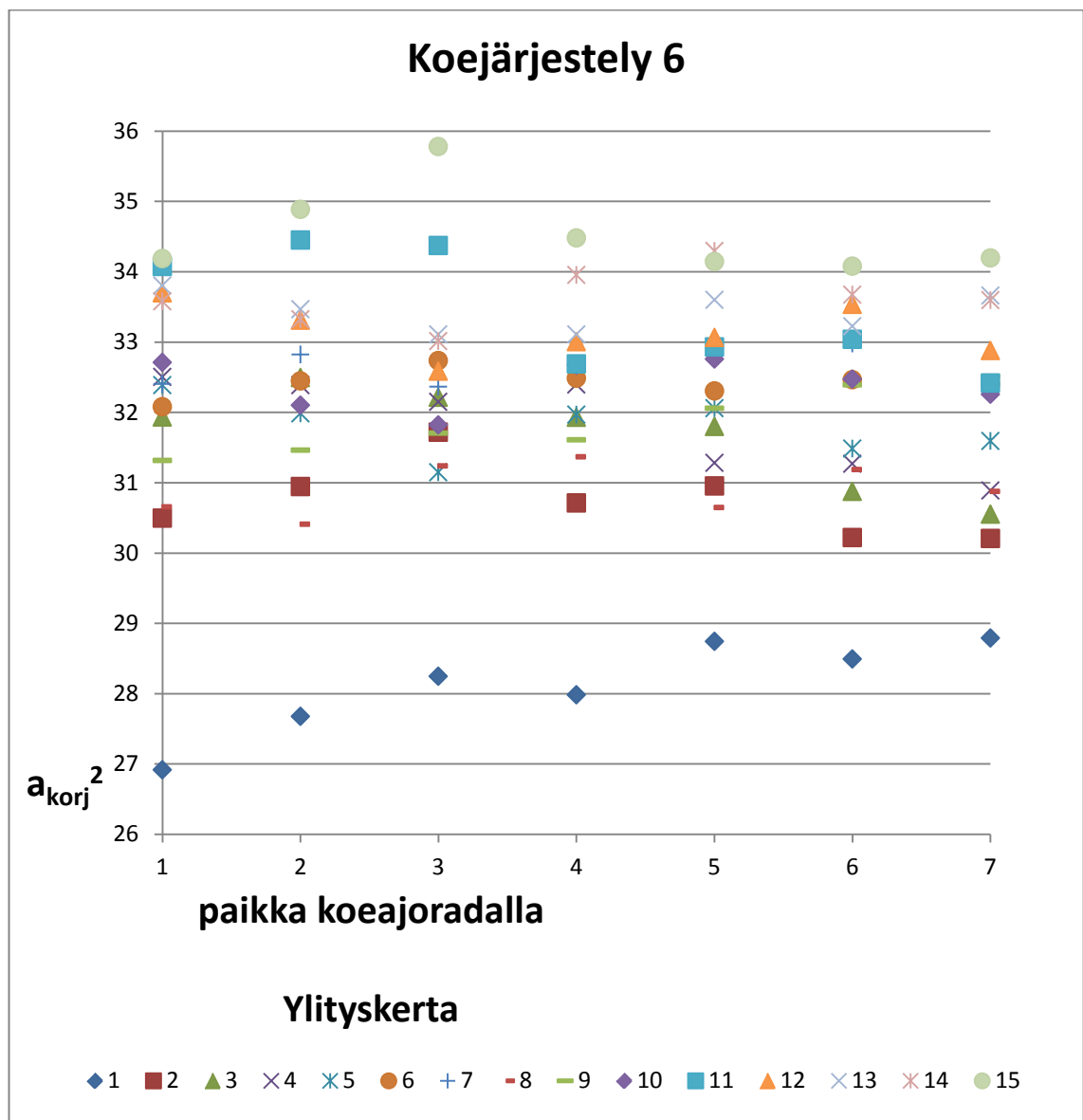
Kuvio 22. Testi 5 (Mikko Asunen 2012)

Kun katsomme kokeen kaaviota huomaamme, että saimme parhaan tuloksen tähän mennessä, kiihtyvyys kasvaa ylityskertojen lisääntyessä melko tasaisesti. Kaaviosta käy myös ilmi että viimeisellä ylityskerralla saadaan tasaisesti pienempiä kiihtyvyyden arvoja, kuin edellisillä ylityskerroilla. Voidaan siis ajatella että kävimme jo niin suuressa

tiiviydessä että lisää tiivistämällä, murske olisi ruvennutkin löyhtymään ylityskertojen tästä vielä lisääntyessä.

#### 4.3.5 Koejärjestely 6

Kokeessa numero 6 lisäämme edellisen testin murskepatjan vahvuutta 400 millimetriin. Tuloksista voimme ainakin tulkita että emme pääse tiiviyden murtumispisteeseen, koska viimeisellä sarjalla oli kaikkein kovin kiihtyvyys.



Kuvio 23. Koejärjestely 6 (Mikko Asunen 2012)

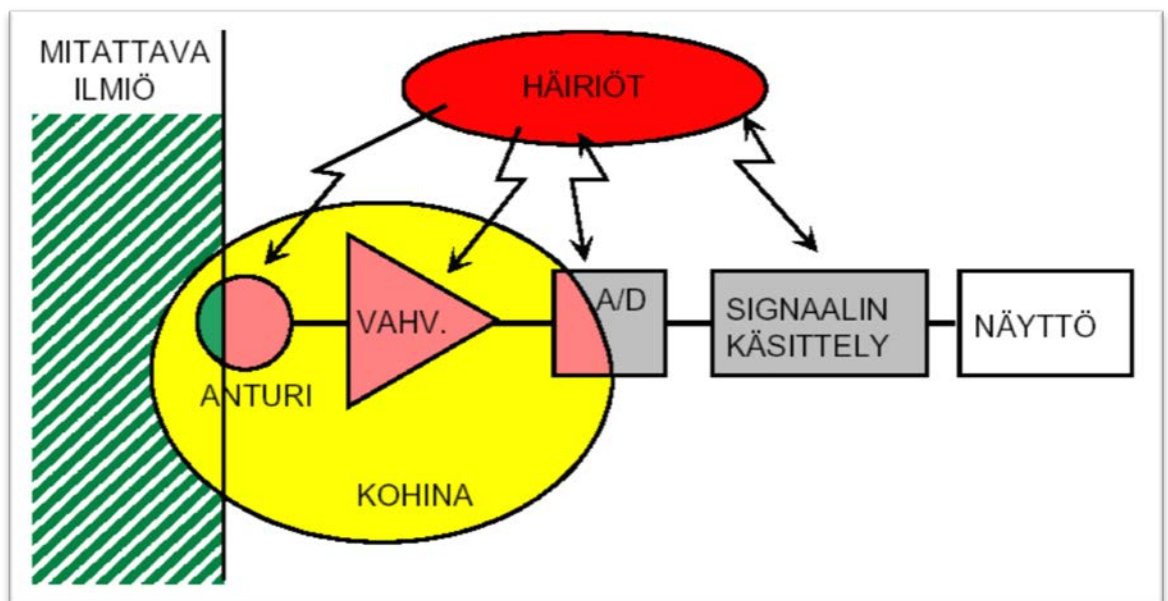
#### 4.3.6 Tulokset

Tuloksena siitä mitä tähän mennessä olemme saaneet selville, on että 200 mm murskepatjalla saamamme kiihtyvyyden arvot tuntuisivat parhaimmilta ja järkevimmiltä. Koejärjestelyllä saavutamme todennäköisesti myös materiaalin maksimi tiiviyden, jonka johdosta tiivistettävä kerros rupeaa jo löyhtymään uudestaan.

On siis syytä tutkia ko. koetta vielä lisää.

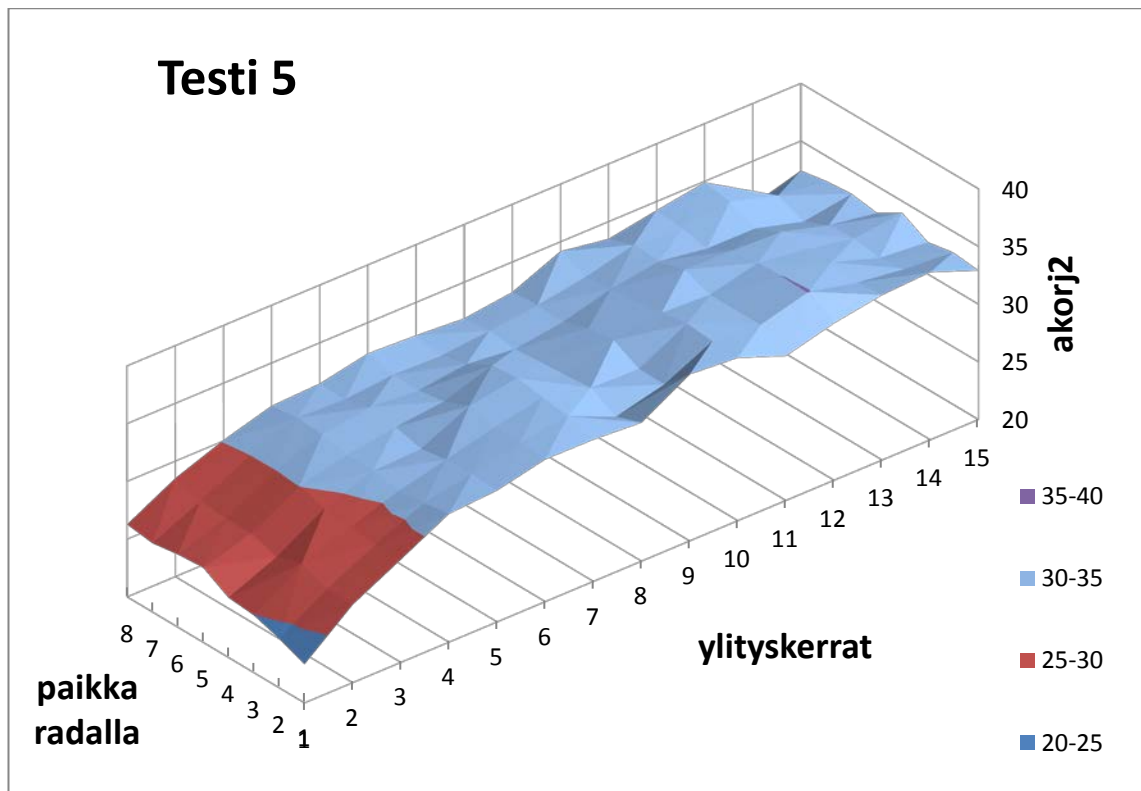
#### 4.4 Koejärjestelyn 5 syventävä laskenta

Kuviosta 24 näkee, että mittausmenetelmät ovat arkoja häiriöille, joten pieni muotoinen tarkistus laskenta lienee paikallaan.



Kuvio 24. Kuvassa syitä lisälaskutoimitusten tekemiseksi. (Petri Kärhä)

Saaduista tuloksista teimme Excelillä kolmiulotteisen pintakaavion mallintamaan maan tiivistymistä kokeen edetessä (Kuvio 25). Pintakaaviosta näki kiihtyvyyden muutoksen eri ylityskertojen välillä.



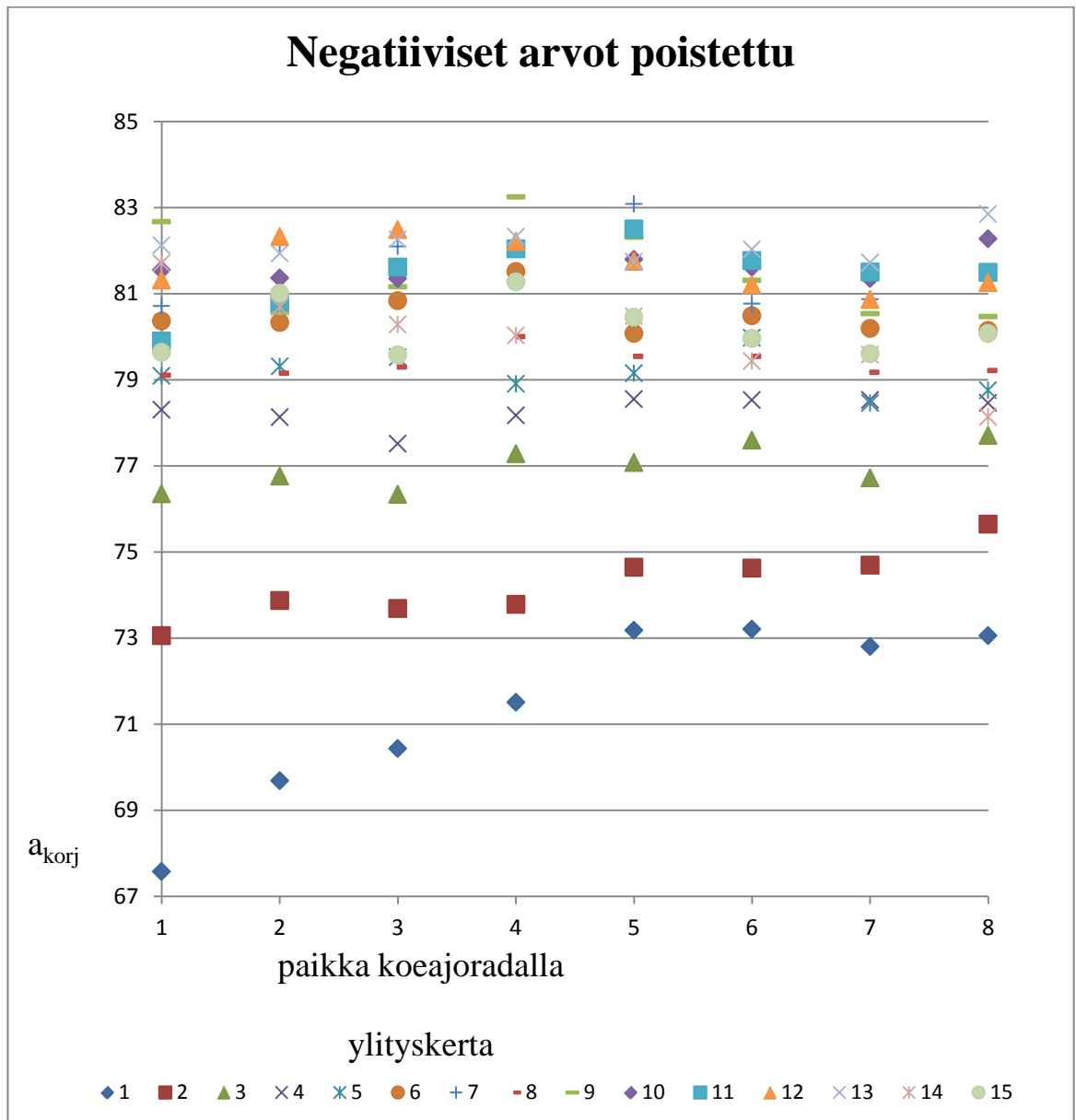
Kuvio 25. Pintakaavio koejärjestelystä 5 (Mikko Asunen 2013)

Negatiivisen anturisignaalin poistaminen datasta, aluksi anturisignaalista vähennettiin 2,5 voltia ja yhden sekunnin keskiarvo. Tämän laskutoimituksen tuloksista poistimme vielä negatiivisen kiihtyvyyden Excelin funktion JOS() avulla (Kuvio 26). Ko. laskutoimituksella saimme tuloksista karsittua pois alaspäin suuntautuneen kiihtyvyyden, tarkoituksemmehan oli tutkia kiihtyvyyden kasvamista ylöspäin, maan tiivistämistyön edetessä.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1					D6^2			23,3442973	0,0000000	IF(D6>0,D6;IF(D6<0,0))	SUM(J6:J1005)	t
2								24,2597585	1,0000000			
3	Aika	Kanava A	(A-2,5)	(A-2,5)*(A-2,5)				24,9751812	3,0000000			
4	(s)	(V)	(V)	(?)				25,1817062	4,0000000			
5			0,0006747					26,4699928	5,0000000			
6	0	2,760347	0,2603467	0,2596720	0,0674295	23,3442973	0,0000000	26,3031985	6,0000000	0,259671974	67,5735475	0
7	0,001002	2,66512	0,1651201	0,1644454	0,0270423			25,9620065	7,0000000	0,164445374		
8	0,002004	2,573558	0,07355642	0,0728817	0,0053117			26,2742178	8,0000000	0,072881694		
9	0,003006	2,485655	-0,01434517	-0,0150199	0,0002256					0		
10	0,004008	2,404468	-0,0955317	-0,0962064	0,0092557					0		
11	0,00501	2,334269	-0,1657307	-0,1664054	0,0278908					0		
12	0,006012	2,288487	-0,2115126	-0,2121873	0,0450235					0		
13	0,007014	2,295202	-0,204798	-0,2054727	0,0422190					0		
14	0,008016	2,323282	-0,1767185	-0,1773932	0,0314684					0		
15	0,009018	2,380051	-0,1199489	-0,1206236	0,0145501					0		
16	0,01002	2,460628	0,03937244	0,0400472	0,0016038					0		
17	0,011022	2,559516	0,05951643	0,0588417	0,0034623					0,058841704		
18	0,012024	2,612013	0,1120131	0,1113384	0,0123962					0,111338374		
19	0,013026	2,65108	0,1510804	0,1504057	0,0226219					0,150405674		
20	0,014028	2,66512	0,1651201	0,1644454	0,0270423					0,164445374		
21	0,01503	2,637041	0,1370406	0,1363659	0,0185957					0,136365874		
22	0,016032	2,545477	0,04547668	0,0448020	0,0020072					0,044801954		

Kuvio 26. Kuvakaappaus Excelistä (Mikko Asunen 2013)

Havaitsimme että negatiivisen kiihtyvyyden poistaminen ei oleellisesti muuta saamaamme tulosta (Kuvio 27). Negatiivinen kiihtyvyys poistamalla, kiihtyvyyden arvo sekunnin summana tarkasteltuna kasvaa kyllä oleellisesti. Mutta kuten kaaviosta voidaan nähdä, pysyy kaavion muoto hyvin samanlaisena, oli negatiivinen kiihtyvyys mukana tai ei.



Kuvio 27. Koejärjestelyn 5 tulos, kun JOS() lausekkeella poistettiin negatiivinen kiihtyvyys (Mikko Asunen 2013).

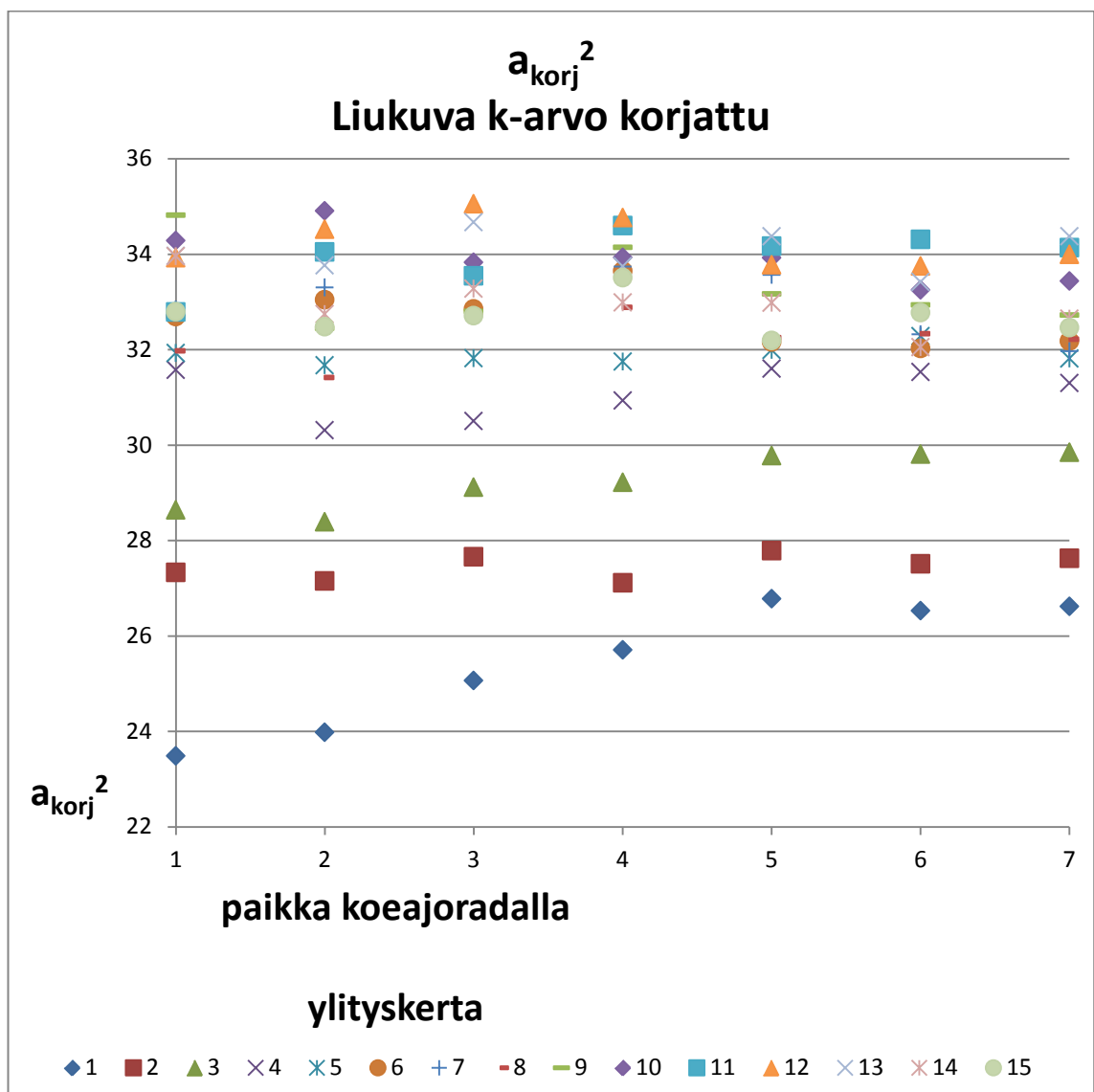
#### Liukuva keskiarvo

Anturilta saadusta signaalista vähennetään signaalin liukuva keskiarvo, liukuvan keskiarvon poistamisella korjataan anturin 0-tason ryömintää (Kuvio 28).



	P	Q	R	S	T
223	AVERAGE(C6:C506)				
224	C231-P231				
225	Q231^2				
226	SUM(R231:R1230)				
227	t				
228	korjattu V-sign				
229	liukuva keskiarvo	signaali-liukuva ka			
230					
231	-0,0001091	0,1017450	0,0103520	23,4859012	0
232	-0,0007134	0,1414166	0,0199987		
233	-0,0007561	0,1518365	0,0230543		
234	-0,0003345	0,1196728	0,0143216		
235	0,0001992	0,0519923	0,0027032		

Kuvio 28. Liukuva keskiarvo (Mikko Asunen 2013)



Kuvio 29. Testin 5 tulos liukuvalla keskiarvolla tarkasteltuna (Mikko Asunen 2012)

## 5 PÄÄTELMÄT JA LOPPUTULOKSET

### 5.1 Lopputulos

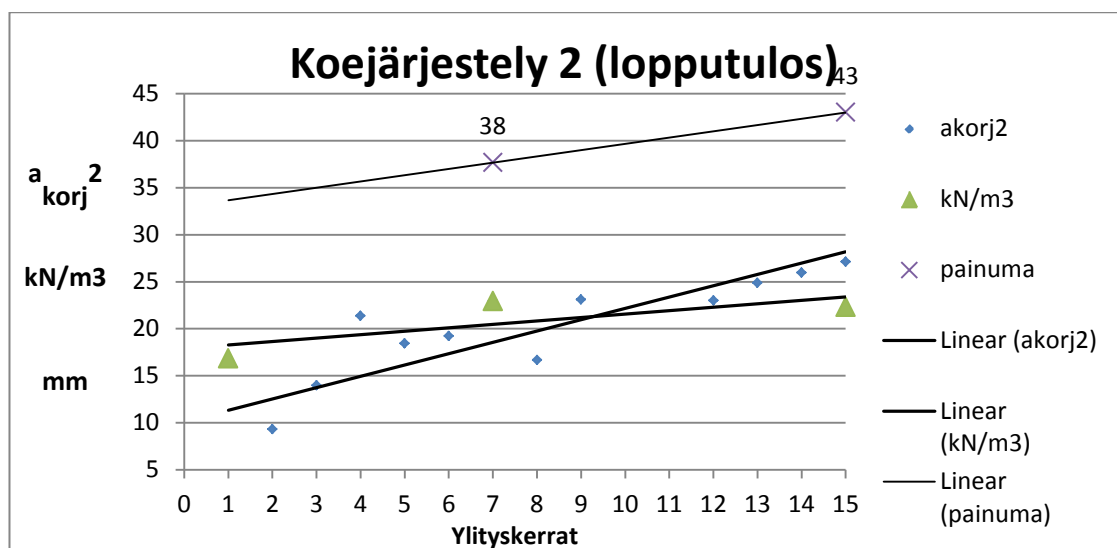
Opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia tärylevyn y-akselin suuntaisen kiihtyvyyden muutosta tiivistystyön edetessä.

Lopputuloksena esitämme kaaviot testeistä. Kaavioissa on x-akselilla ylityskerrat ja y-akselilla on  $a_{korj}^2$  keskiarvo per ylityskerta, kuivatilavuuspaino ja maan tilavuuden muutos eli painuma.

### 5.2 Koejärjestely 2 (lopputulos)

Testin 2 lopputuloksesta havaitaan tärylevyn kiihtyvyyden selkeä kasvaminen tiivistymisen myötä. Kiihtyvyys kasvaa vain huomattavasti nopeammin kuin maantiiveys.

Syy tähän on tärylevyn käynnistyminen koeradalla. Mitä tiiviimpää murske on, sitä nopeammin tärylevy käynnistyy. Mitä nopeammin käynnistyminen tapahtuu, sitä suurempi tärylevyn kiihtyvyys radalla saavutetaan, siksi ylityskerroilla saavutetaan aina vain suurempia kiihtyvyyksiä.

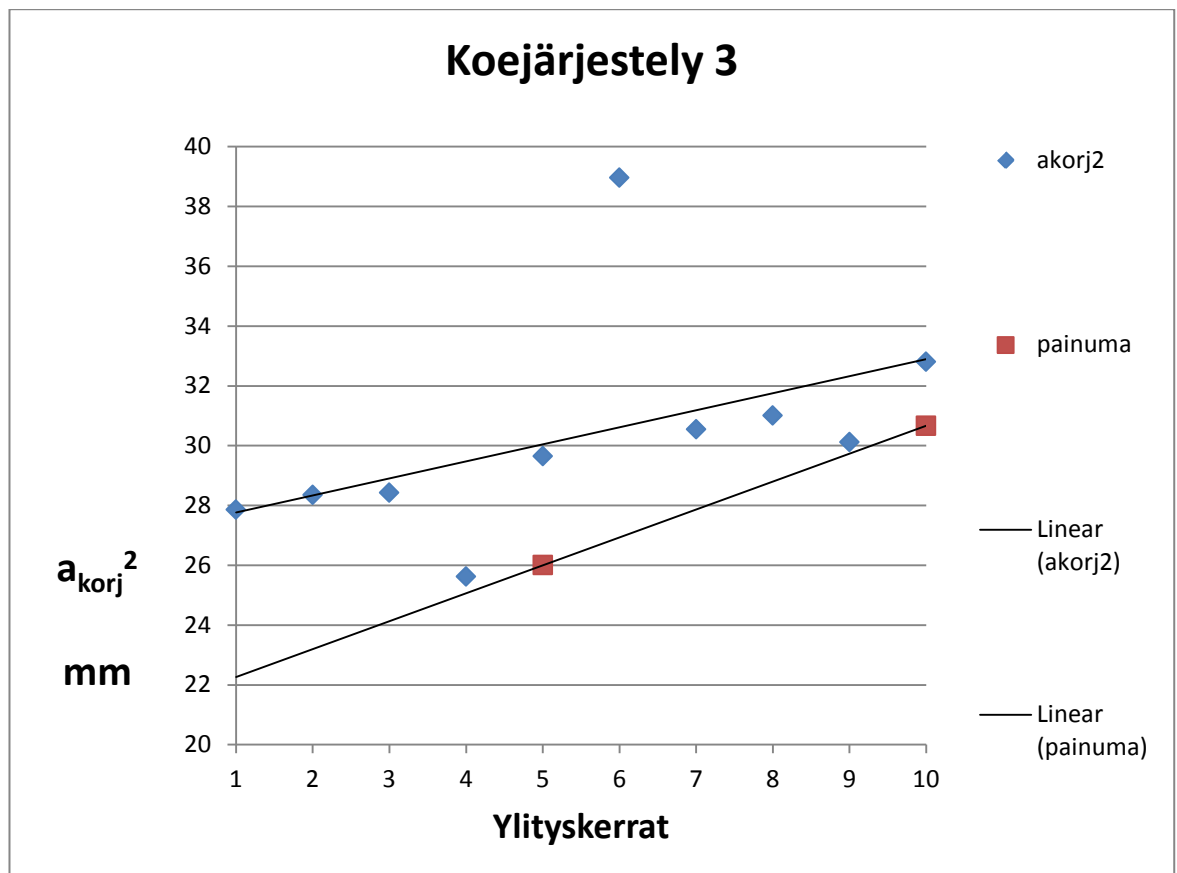


Kuvio 30. Koejärjestelyn 2 lopputulos (Mikko Asunen 2013)

### 5.3 Koejärjestely 3 (lopputulos)

Kokeella 3 otimme kiihdytyskaistan käyttöön. Kiihdytyskaista näkyy kuviossa 31 parempana korrelaationa kiihtyvyyden ja painuman välillä.

Ylityskerralla 6 saavutettiin varsin suuri kiihtyvyys, syyksi tähän epäilemme mittavirhettä. Virhe johtui hienon pölyn muodostumisesta koeajoradalle tiivistystyön edetessä, koska ylityskerran 5 jälkeen koeajorata kasteltiin pölyämisen estämiseksi

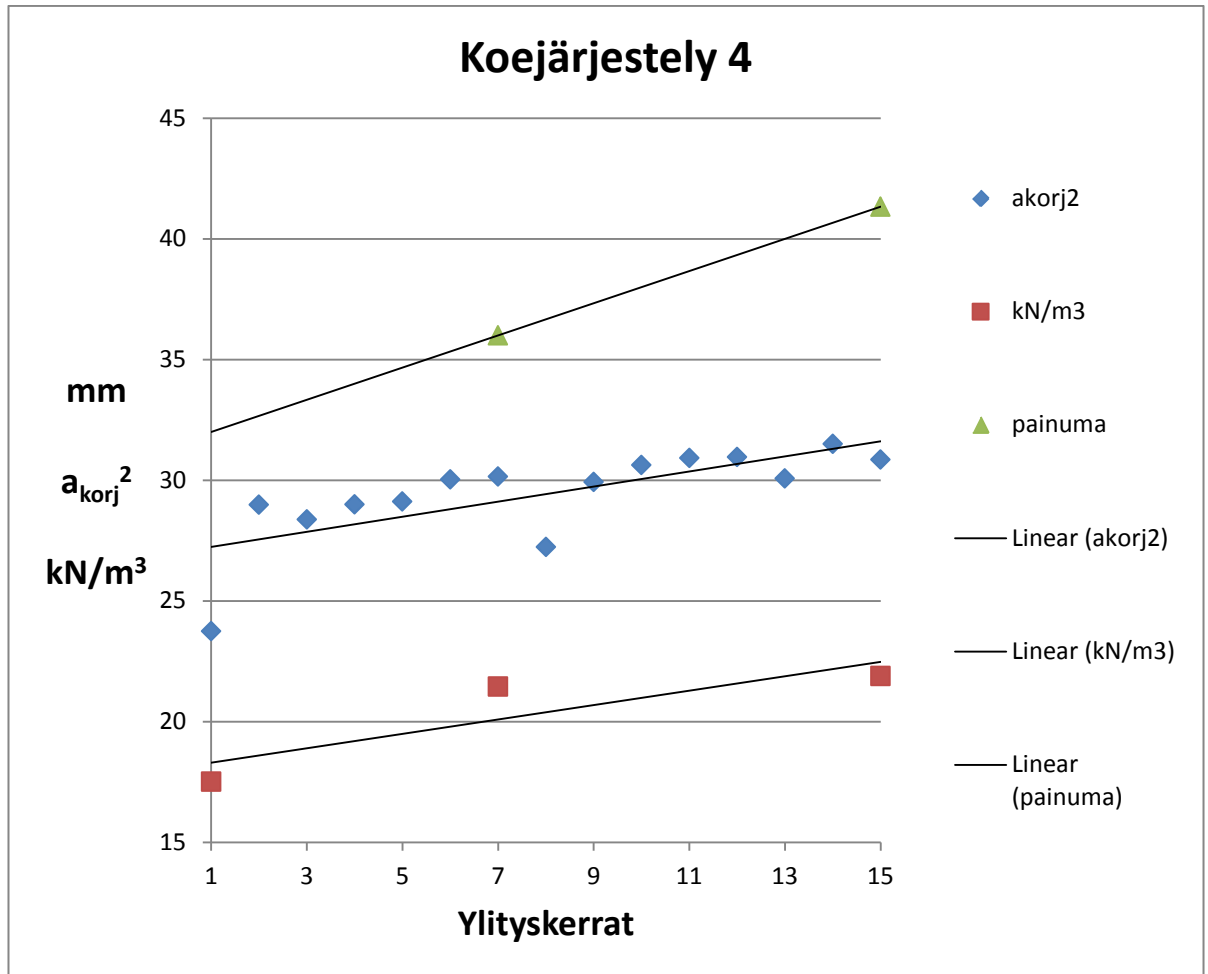


Kuvio 31. Testin 3 lopputulos (Mikko Asunen 2013)

### 5.4 Koejärjestely 4 (lopputulos)

Murskeen kosteusprosentin nostaminen muutti maantiivistymistä melkoisesti. Tiivistyminen tapahtuu nyt pääasiassa ensimmäisellä ylityskerralla ja jatkuu ensimmäisen ylityskerran jälkeen maltillisempaan.

Havaitsemme kuviosta 32, että korrelaatio kuivatilavuuspainon kanssa on hyvä. Painuma saattaa taas kasvaa alempien kerrosten tiivistymisen johdosta.

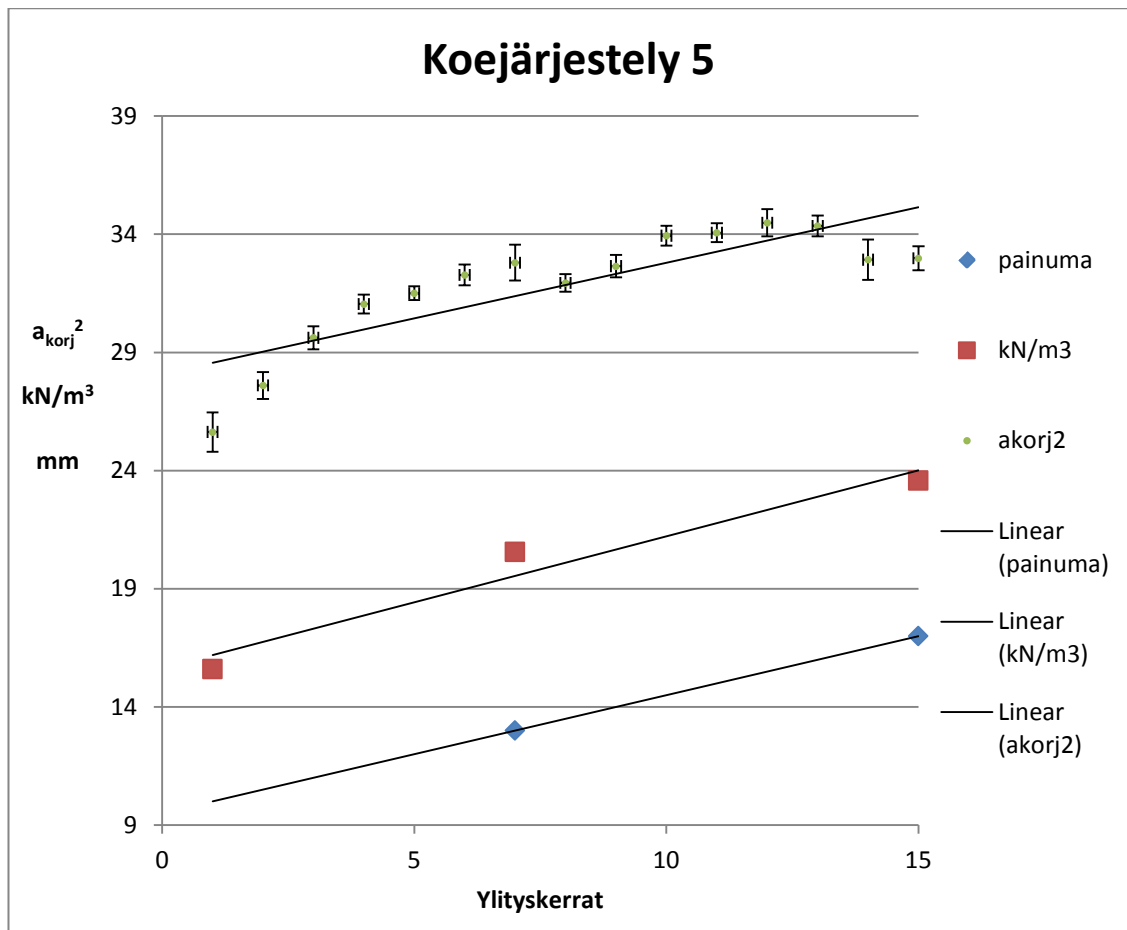


Kuvio 32. Koejärjestelyn 4 lopputulos (Mikko Asunen 2013)

### 5.5 Koejärjestely 5 (lopputulos)

Tärylevyn kiihtyvyyden korrelaatio maan tiivistymisen, käy aika ilmiselvästi kuviosta 32 ilmi.

Kaavioon piirretyt regressiosuorat omaavat saman trendin sekä kiihtyvyydellä, että kuivatilavuuspainolla mitaten.

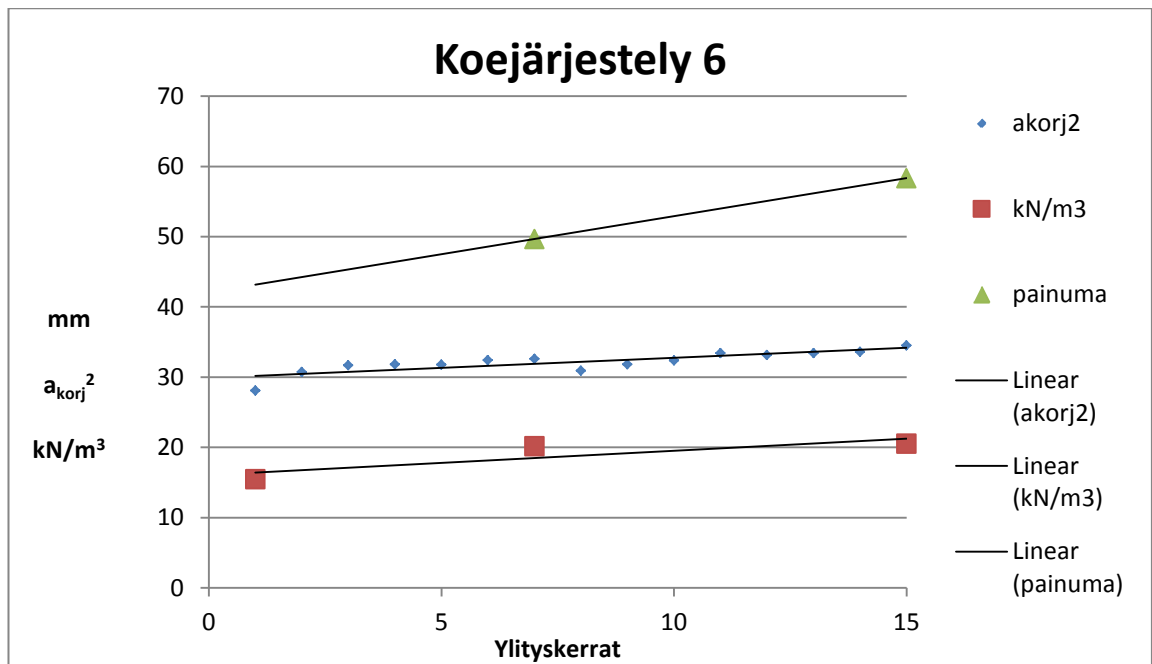


Kuvio 33. Testin 5 Lopputulos (Mikko Asunen 2013)

### 5.6 Koejärjestely 6 (lopputulos)

Testissä havaitaan painuman kasvavan nopeammin, kuin tilavuuspaino ja tärylevyn kiihtyvyys kasvaa.

Painuman kasvaminen nopeammin, kuin kiihtyvyys ja tilavuuspaino, johtuu paksusta löyhästä tiivistettävästä kerroksesta



Kuvio 34. Koejärjestely 6 lopputulos (Mikko Asunen 2013)

### 5.7 Päätelmät lopputuloksista

Havaitsimme että testissä numero 5 saimme tulokseksi parhaan korrelaation maantiivistymisen ja tärylevyn kiihtyvyyden kasvamisen välille.

Lopputuloksien perusteella voimme tehdä myös päätelmän, että mitä tiiviimmällä alustalla ollaan tiivistämässä, sitä paremmin tärylevyn y-akselin suuntainen kiihtyvyys korreloi maan tiivistymiseen.

Tekemiemme testien perusteella, tiivistettävä kerros ei saa olla kovin paksu ja tiivistettävän kerroksen alla täytyisi olla jo tiivistettyjä kerroksia, korrelaation syntymiseksi. Kun tiivistettävän materiaalin vesipitoisuus nostetaan lähelle optimivesipitoisuutta, saadaan aikaiseksi korrelaatio tärylevyn y-akselin suuntaisen kiihtyvyyden ja tilavuuspainon välille, vaikka tiivistettävän kerroksen alla olisi löyhää mursketta.

## 5.8 Kehitysehdotukset

### Kehitysehdotus 1:

Seuraava testi voisi olla tiivistettävän materiaalin murtumispisteen löytäminen, niin että silmälläkin voi todeta murtumispisteen löytymisen. Esim. toistamalla testi 5, mutta pienentää kerrosvahvuutta entisestään.

### Kehitysehdotus 2:

Myös ajatus että altaan reunoista tulisi heijastumia mittaustulokseen, vaatisi lisätutkimuksia. Esim. tehdään kaksi koeajorataa, toinen koeajorata altaan reunaan ja toinen altaan keskelle ja verrata näin saatuja tuloksia keskenään.

### Kehitysehdotus 3:

Testejä voisi tehdä myös, enemmän työmailla käytössä olevan kokoluokan tärylevyillä. Esim. 500 kg:n tärylevy.

Myös laskemalla voisi tehdä uusia tarkasteluja, esimerkiksi tärylevyn nopeuksia ja siirtymää voisi laskea.

	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
223	AVERAGE(C6:C506)						Q232*125*9,82							
224		C231-P231					U232+\$V\$228							
225			Q231*2					W231+V232*(A232-A231)						
226				SUM(R231:R1230)					X231+W232*(A232-A231)					
227					t				Y231+W231*(A232-A231)+0,5*V232*(A232-A231)*2					
228		korjattu V-sign												
229	liukuva keskiarvo	signaali-liukuva ka				kiikhtyvvyys	kiikhtyvvyys, kor. nopeus		siirtymä	siirtymä2				
230						m/s2								
231	-0,0001091	0,1017450	0,0103520	23,4859012	0	124,891967	124,891967	0	0	0				
232	-0,0007134	0,1414166	0,0199987			173,588898	173,588898	0,17393608	0,00017428	8,7142E-05				
233	-0,0007561	0,1518365	0,0230543			186,379257	186,379257	0,36068809	0,00053569	0,00035499				
234	-0,0003345	0,1196728	0,0143216			146,89835	146,89835	0,50788024	0,00104459	0,00079014				
235	0,0001992	0,0519923	0,0027032			63,8205782	63,8205782	0,57182846	0,00161756	0,00133108				
236	0,0008108	-0,0328583	0,0010797			-40,3336	-40,3336	0,53141419	0,00215004	0,0018838				
237	0,0014286	-0,1073375	0,0115213			-131,75673	-131,75673	0,39939395	0,00255023	0,00235013				
238	0,0020743	-0,1501027	0,0225308			-184,25108	-184,25108	0,21477436	0,00276544	0,00265783				
239	0,0025239	-0,1792424	0,0321278			-220,02006	-220,02006	-0,0056857	0,00275974	0,00276259				

Kuvio 35. Kokeelliset laskutoimitukset (Mikko Asunen 2012)

Kaavat

Kiihtyvyys:

$$a = V \times 9,82 \text{ m/s}^2 \quad (6)$$

missä,  $V$  on anturilta saatu jännite.

Kappaleen nopeus ajan funktiona:

$$v = v_0 + at \quad (7)$$

Kappaleen paikka:

$$x = v_0t + \frac{1}{2}at^2 \quad (8)$$



## 6 POHDINTA

Esittämästämme lopputuloksesta voidaan havaita, että tutkimustyö ei ole mennyt hukkaan. Saatujen lopputulosten perusteella voidaan ajatella että tietyin reunaehdoin (pohjamaan tiiveys, kosteusprosentti) olisi mahdollista kehittää mittalaite, jolla tiivistystyön etenemistä voitaisiin tarkkailla mittaamalla tärylevyn pystysuoraa kiihtyvyyttä.

Mittalaitteen kehittäminen vaatii kuitenkin vielä lisätestejä laboratoriossa, kuin myös itse rakennustyömailla. Seuraavilla koejärjestelyillä voisi etsiä tiivistettävän materiaalin murtumispistettä, pistettä jossa tiivistettävä maa-aines alkaa löyhtyä.

Uusia koejärjestelyjä pohdittaessa kannattaa ottaa huomioon tutkittavan tärylevyn tiivistyskapasiteetti ja suunnitella tutkittavat kerrosvahvuudet sen mukaan. Myös ajatus että altaan reunoista tulisi heijastumia mittaustulokseen, vaatisi lisätutkimuksia. Esim. tehdään kaksi koeajorataa, toinen koeajorata altaan reunaan ja toinen altaan keskelle ja verrata näin saatuja tuloksia keskenään.

Kaiken kaikkiaan lopputulos on oikein positiivinen ja kannustaa jatkamaan tutkimusta mittalaitteen kehitystyön vuoksi.

## LÄHTEET

Kulmala Hannele. 2009. Pohjarakentamisen kurssi, tiivistystöiden oppimateriaali  
moodle.tamk.fi

Infra- RYL 2012/1, Luettu 15.1.2013  
www.rakennustieto.fi

MaaRYL 2010, Luettu 15.1.2013,  
www.rakennustieto.fi

Anssi Lampinen, luettu 15.1.2013,  
[www.al-engineering.fi](http://www.al-engineering.fi)

Konevälitys, luettu 3.2.2013  
[www.konevalitys.com](http://www.konevalitys.com)

Roadconsulting, luettu 3.2.2013  
www.roadconsulting.fi

Robomaa, Kiihtyvyysanturi, Luettu 19.2.2013  
[http://www.robomaa.com/index.php?main\\_page=product\\_info&cPath=1009\\_1070&products\\_id=439](http://www.robomaa.com/index.php?main_page=product_info&cPath=1009_1070&products_id=439)

Oskilloskooppi, Luettu 19.2.2013  
<http://www.picotech.com/precision-oscilloscopes.html>

<http://electronics.physics.helsinki.fi>, Luettu 24.2.2013  
[http://electronics.physics.helsinki.fi/wp-content/uploads/2011/02/Anturit\\_ja\\_anturielektroniikka\\_2008.pdf](http://electronics.physics.helsinki.fi/wp-content/uploads/2011/02/Anturit_ja_anturielektroniikka_2008.pdf)

# LIITTEET

## Liite 1 Tutkimussuunnitelma

Screen 1 of 3

TkT Anssi Lampinen  
AL-Engineering Oy  
Leppälinnunpolku 26  
02620 Espoo  
0400-462 152  
[Anssi.lampinen@al-engineering.fi](mailto:Anssi.lampinen@al-engineering.fi)

TUTKIMUSSUUNNITELMA  
2.12.2011

**AIHE: TÄRYLEVYN KÄYTTÖ RAKENTEEN TIIVISTYSTYÖN TARKKAILUSSA**

1. Tavoite
 

Tavoitteena on kehittää tärylevyyn mittari, jolla voidaan määrittää täryttävän kerroksen tiiviyttä ja E-modulia.
2. Tärylevymittarin toimintaperiaate
 

Tärylevyyn asennetaan kiihtyvyyssanturi, jolla mitataan itse levyn pystysuoraa kiihtyvyyttä. Tästä kiihtyvyydestä saadaan integroimalla laskettua myös pystysuuntaiset nopeus- ja siirtymäkomponentit.

Tutkimusmielessä asennetaan toinen kiihtyvyyssanturi myös laitteen runkoon.
3. Tutkimushypoteesi
 

Rakennetta tärylevyllä tiivistettäessä muuttuu levyn pystysuuntainen kiihtyvyys siten, että rakenteen tiivistyessä kiihtyvyys kasvaa.

Vastaavasti samanaikaisesti integroimalla laskettu siirtymä pienenee tiivistymisen edistyessä.
4. Tutkimuksen toteutus
 

Muuttujat:

  - a. Materiaalina KaM 0-16 ja sora
  - b. Kerrospaksuus 50 cm
  - c. Tärylevyn ylityskerrat 10- 20
  - d. Alustan kantavuus 2 eri kantavuutta?
  - e. Tutkittava materiaali sijoitettu betonilaatan päälle, niin että tutkittava materiaali tukeutuu ympäröivään materiaaliin. Näin vältetään
5. Muut mittaukset
  - a. Loadman (siirtymä ja palautuma %)
  - b. Proctor ?
  - c. Troxler ?
  - d. Tilavuuden (=kerrospaksuuden) muutos tiivistystyön aikana

➔

mas...
Windows Update
Google Translate ...
Anssi Lampinen\_...
Opinnäytetyö 123...

## Liite 2. Mittapöytäkirjat laboratoriokokeista

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
1	Loadman										Kovalla								
2	0	1	2	3	4	5	6	7	8(0)	9(1)	10(2)	11(3)	12(4)	13(5)	14(6)	15(7)			
3	11,3	6,96	5,08	4,55	3,78	3,1	2,99	2,69	2,94	3,36	3,17	3,08	3,11	2,59	2,22	2,32	mm		
4	2	8	4,85	3,86	3,5	2,91	2,38	1,96	2,09	2,31	2,44	2,47	2,47	2,56	2,03	1,68	1,66	mm	
5	3	6,17																	
6	4	5,38																	
7	5	(6,9) 4,5																	
9	Mittaukset 5,6,7 kovalla pohjala, 0 - 4 pehmeällä, parittomat lähtee kovalla																		
12	Vesivolyometri					Karpidimetri													
14	Alkutilavuus			566 cm <sup>3</sup>			Paine			0,21 bar									
15	Mittattu tilavuus			1240 cm <sup>3</sup>			Kosteusprosentti			2,00 %									
16	Kuopan tilavuus			0,000674 m <sup>3</sup>															
17	Massa			1,2888 kg															
18	Kuivapaino kaavasta			18,37 kN/m <sup>3</sup>															
20	Vesivolyometri					Karpidimetri													
22	Alkutilavuus			900 cm <sup>3</sup>			Paine			0,21 bar									
23	Mittattu tilavuus			1580 cm <sup>3</sup>			Kosteusprosentti			2,00 %									
24	Kuopan tilavuus			0,00068 m <sup>3</sup>															
25	Massa			1,3924 kg															
26	Kuivapaino kaavasta			19,67 kN/m <sup>3</sup>															
28	Vesivolyometri					Karpidimetri													
30	Alkutilavuus			900 cm <sup>3</sup>			Paine			0,21 bar									
31	Mittattu tilavuus			1400 cm <sup>3</sup>			Kosteusprosentti			2,00 %									
32	Kuopan tilavuus			0,0005 m <sup>3</sup>															
33	Massa			1,1048 kg															
34	Kuivapaino kaavasta			21,23 kN/m <sup>3</sup>															

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	
1	Alkuperäisenä päätetty koejärjestely uusittuna.																			Alussa 0										
2																				Vesivolyometri		Karpidimetri								
3	Loadman																			250g painin loppu!		250g ei löytynyt?								
4	0	1	2	3	4	5	6	7	8(0)	9(1)	10(2)	11(3)	12(4)	13(5)	14(6)	15(7)														
5	10,52	5,98	4,82	4,24	3,43	3,3	2,85	2,81	3,48	3,21	3,11	2,99	2,75	2,49	2,31	2,37	mm													
6	6,42	4,26	3,49	3,16	2,44	2,45	2,16	2,04	2,48	2,45	2,19	2,29	1,97	2	1,75	1,87	mm													
7	4,51	4,12	3,13	2,87	2,26	2,24	1,97	2,01	2,3	2,2	2,11	2,22	1,93	1,83	1,83	1,78	mm													
8	3,72			2,17	2,23			1,93					1,85			1,69	mm													
9	3,26			2,18				1,61					1,83			1,62	mm													
10	2,96			2,22				1,97					1,8			1,67	mm													
11	2,75																mm													
12	2,62																mm													
13	2,52																mm													
14	2,41																mm													
15	2,3																mm													
16	2,24																mm													
18	Huomautus!																			Alussa 0										
19	Tärytystä ei saavutettu nopeutta lisäsuutta koeradan alussa.																			Vesivolyometri		Karpidimetri								
20	Tärytystä kehittyi vasta noin radan puolessa välissä.																			Alkutilavuus		910 cm <sup>3</sup>		Paine		0,21 bar				
21	Vaatus tasolinsen ja rullamitta																			Mittattu tilavuus		1520 cm <sup>3</sup>		Kosteusprosentti		1,90 %				
22	Kohdassa 10 loppu 250g sta patteri!																			Kuopan tilavuus		0,00061 m <sup>3</sup>		Massa		1,0687 kg				
23	Kohdassa 11 250gsta ei tullut signaalia picolle!																			Kuivapaino kaavas		16,85 kN/m <sup>3</sup>								
24	Ajanottiin kokeilla "kiihdytyksissä" ennen koeradon alkua, jota täytyisi kerkkiä kiihnyään täyteen																			Sarjan keskellä 7		Vesivolyometri		Karpidimetri						
25	luikkaan ennen mittaradan alkua.																			Alkutilavuus		910 cm <sup>3</sup>		Paine		0,21 bar				
26	Hiekka oli niin kuivaa, että laika olisi toiminut kunnolla, vie tavallaan edellään hiekoanes kerrosta.																			Mittattu tilavuus		1440 cm <sup>3</sup>		Kosteusprosentti		1,90 %				
27	Tehdään pari koeretoa kiihdytyksillä.																			Kuopan tilavuus		0,00053 m <sup>3</sup>		Massa		1,2641 kg				
28	Kovapää kiihdytettiin 500 mm:n																			Kuivapaino kaavas		22,94 kN/m <sup>3</sup>								
29	Lätkäisyä aina samaan suuntaan. 7 -> 0																			Lopussa 4		Vesivolyometri		Karpidimetri						
31																				Alkutilavuus		910 cm <sup>3</sup>		Paine		0,21 bar				
32																				Mittattu tilavuus		1440 cm <sup>3</sup>		Kosteusprosentti		1,90 %				
33																				Kuopan tilavuus		0,00053 m <sup>3</sup>		Massa		1,2293 kg				
34																				Kuivapaino kaavas		22,31 kN/m <sup>3</sup>		Lätkä ajanut hiekoanesta ko. kohtaan.						

Microsoft Excel - Mittapöytäkirjat [Yhteensopiva tiedo]

1 Aloitus päivän uusinta + kähdytyskäsista

2 \*patterin vaihto loadmanin

3 Loadman

	0	1	2	3	4	5	6	7	8(0)	9(1)	10(2)	11(3)	12(4)	13(5)	14(6)	15(7)	
4	1	9,26	5,79	4,43	3,81	3,43	4,35	3,49	2,86	3,33	2,9	2,73					
5	2	4,53	3,73	2,97*	2,88	2,47	3,14	2,53	2,11	2,48	2,06						
6	3	3,31	3,31	2,74	2,52	2,23	2,72	2,29	1,94	2,44	2,1	1,96					
7	4	2,72					2,65				2,04						
8	5	2,38					2,56				1,94						
9	6	2,18					2,49				1,92						
10	7																
11	8																
12	9																
13	10																
14	11																
15	12																
16	17																
18	19																
19	Tärvuuden muutos (vaistus)																
20		0	5	10													
21	1	455	488	492	mm												
22	4	448	472	477	mm												
23	7	449	470	475	mm												
24		5	10														
25	1		33	37	netto mm												
26	4		24	29	netto mm												
27	7		21	26	netto mm												

Microsoft Excel - Mittapöytäkirjat [Yhteensopiva tiedo]

1 Aloitus päivän uusinta

2 Käilytämisen, ennen korjotetaan...

3 Loadman

	0	1	2	3	4	5	6	7	8(0)	9(1)	10(2)	11(3)	12(4)	13(5)	14(6)	15(7)	
4	1	10,19	5,72	4,12	3,39	3,06	2,56	2,46	2,33	2,30	2,22	2,14	2,21	2,08	2,03	2,20	2,03
5	2	5,70	4,34	3,24	2,74	2,47	2,24	1,85	1,95	1,87	1,77	1,69	1,73	1,69	1,62	1,61	1,60
6	3	4,24	3,79	2,97	2,90	2,38	2,01	1,93	1,84	1,72	1,68	1,79	1,82	1,63	1,57	1,56	1,53
7	4	3,53		2,82	2,41		1,89		1,72		1,67		1,79		1,46		1,45
8	5	3,09			2,33		1,68		1,58		1,45		1,58		1,45		1,45
9	6	2,81			2,27		1,65		1,65		1,57		1,57		1,45		1,45
10	7	2,57					1,65		1,65		1,59		1,59		1,45		1,45
11	8	2,45															
12	9	2,39															
13	10	2,26															
14	11																
15	12																
16	17																
18	19																
19	Tärvuuden muutos (vaistus)																
20		0	7	15													
21	1	392	432	439	mm												
22	4	390	429	434	mm												
23	7	407	436	440	mm												
24		7															
25	1	40	47		netto mm												
26	4	39	44		netto mm												
27	7	29	33		netto mm												
28																	
29																	
30																	
31																	
32																	
33																	
34																	
35																	
36																	
37																	
38																	
39																	
40																	
41																	
42																	
43																	
44																	
45																	

Alussa 0

Vesivolytmetri

Alkutilavuus	960 cm <sup>3</sup>	Paine	0,45 bar
Mittau tilavuus	1560 cm <sup>3</sup>	Kosteusprosentti	4,40 %
Kuoppin tilavuus	0,0006 m <sup>3</sup>		
Massa	1,193 kg		
Kurapaino kaavas	17,3 kN/m <sup>3</sup>		
mm			
mm			
Sarjan keskellä 7			
Vesivolytmetri			
mm			
mm			
Alkutilavuus	970 cm <sup>3</sup>	Paine	0,7 bar
Mittau tilavuus	1480 cm <sup>3</sup>	Kosteusprosentti	6,90 %
Kuoppin tilavuus	0,00051 m <sup>3</sup>		
Massa	1,1934 kg		
Kurapaino kaavas	21,45 kN/m <sup>3</sup>		
mm			
mm			
Lopussa 4			
Vesivolytmetri			
Karpidimetri			
Alkutilavuus	970 cm <sup>3</sup>	Paine	0,7 bar
Mittau tilavuus	1500 cm <sup>3</sup>	Kosteusprosentti	6,90 %
Kuoppin tilavuus	0,00053 m <sup>3</sup>		
Massa	1,2651 kg		
Kurapaino kaavas	21,88 kN/m <sup>3</sup>		
mm			
mm			
Lopussa 7			
Vesivolytmetri			
Karpidimetri			
Alkutilavuus	970 cm <sup>3</sup>	Paine	0,7 bar
Mittau tilavuus	1370 cm <sup>3</sup>	Kosteusprosentti	6,90 %
Kuoppin tilavuus	0,0004 m <sup>3</sup>		
Massa	1,021 kg		
Kurapaino kaavas	23,40 kN/m <sup>3</sup>		
mm			
mm			

Havaintoja!

Vaistus tasokas ja rullamita.

Edellisen kerran kova piki johtu, "kovan päin" suuremmasta kosteudesta.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
1	Betonilaatat - tiivistetyt reunat!																												
2																													
3	Loadman															Aksa 0													
4	0	1	2	3	4	5	6	7	8(0)	9(1)	10(2)	11(3)	12(4)	13(5)	14(6)	15(7)	Vesivolyymetri				Karpidimetri								
5	1	16,11	3,33	2,50	2,29	2,04	2,33	2,43	1,93	2,33	1,82	1,68	1,58	1,72	1,60	1,71	1,85	mm	Alkutilavuus	640	cm <sup>3</sup>	Paine	0,35 bar						
6	2	12,60	2,25	2,12	1,91	1,88	1,65	1,89	1,45	1,71	1,30	1,36	1,21	1,42	1,28	1,32	1,55	mm	Mitatun tilavuus	1520	cm <sup>3</sup>	Kosteusprosentti	3,40 %						
7	3	2,16	2,04	2,06	1,80	2,17	1,62	1,64	1,37	1,94	1,36	1,28	1,31	1,29	1,26	1,61	1,76	mm	Kuopan tilavuus	0,00088	m <sup>3</sup>								
8	4	2,01	2,03	1,72	1,87	1,65	1,60	1,57	1,33	1,68	1,21	1,24	1,17	1,16	1,23	1,43	1,38	mm	Massa	1,449	kg								
9	5	1,79	1,92	1,64	1,72	1,54			1,33	1,49				1,28	1,25	1,27		mm	Kuivapaino kaavasta	15,61	kN/m <sup>3</sup>								
10	6	1,72			1,72					1,48				1,20		1,20		mm											
11	7	1,68			1,50									1,18		1,17		mm	Sarjan keskellä 7										
12	8	1,75			1,60									1,19		1,12		mm	Vesivolyymetri										
13	9	1,56			1,62													mm											
14	10	1,53																mm	Alkutilavuus	1000	cm <sup>3</sup>	Paine	0,5 bar						
15	11																	mm	Mitatun tilavuus	1560	cm <sup>3</sup>	Kosteusprosentti	4,80 %						
16	12																	mm	Kuopan tilavuus	0,00056	m <sup>3</sup>								
17																		mm	Massa	1,2311	kg								
18																		mm	Kuivapaino kaavasta	20,56	kN/m <sup>3</sup>								
19																		mm											
20	Huavintoja!																												
21	Vaahtus tasolasserit ja rollamitta																												
22	200 mm murekettia lastan päällä.																												
23	Sarjan keskellä tehdyissä mittauksissa rupeesi vesivolyymetri vuotamaan vettä. Karjainnne sen omistuksesta.																												
24																													
25																													
26																													
27																													
28																													
29																													
30																													
31																													
32																													
33																													
34																													
35																													
36																													
37																													
38																													
39																													
40																													
41																													
42																													
43																													
44																													
45																													
46																													
47																													
48																													
49																													
50																													
51																													
52																													
53																													
54																													
55																													
56																													
57																													
58																													
59																													
60																													

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
1	Mittastulokset: Betonilaatat pohjalla ja tiivistettävä materiaali 400 mm laattojen päällä.																												
2																													
3																													
4	Loadman															Aksa 0													
5	0	1	2	3	4	5	6	7	8(0)	9(1)	10(2)	11(3)	12(4)	13(5)	14(6)	15(7)	Vesivolyymetri				Karpidimetri								
6	1	11,22	7,94	4,58	4,26	4,84	3,25	2,67	2,31	2,79	2,10	2,16	2,57	2,47	2,25	1,97	1,91	mm	Alkutilavuus	990	cm <sup>3</sup>	Paine	0,5 bar						
7	2	7,40	5,32	3,44	3,14	4,75	2,66	1,98	1,74	2,22	1,69	1,70	1,87	2,27	1,72	1,61	1,46	mm	Mitatun tilavuus	1660	cm <sup>3</sup>	Kosteusprosentti	4,90 %						
8	3	4,64	4,57	3,15	2,89	3,06	2,25	1,97	1,73	1,86	1,70	1,60	1,93	1,98	1,68	1,82	1,53	mm	Kuopan tilavuus	0,00067	m <sup>3</sup>								
9	4	3,85	4,26	3,06	2,96	3,02	2,92	1,93	1,83	1,80	1,59	1,59	1,87	2,23	1,59	2,11	1,43	mm	Massa	1,1102	kg								
10	5	3,35			2,79			1,68				1,84	1,89		1,59	1,54		mm	Kuivapaino kaavasta	15,48	kN/m <sup>3</sup>								
11	6	3,03			2,88			1,62				1,81	1,81		1,68			mm											
12	7	2,78			2,81			1,76				1,96	1,96		1,63			mm											
13	8	2,69			2,75			1,62				1,83	1,83		1,53			mm											
14	9	2,50																mm											
15	10	2,42																mm											
16	11	2,28																mm											
17	12	2,22																mm											
18																													
19	Huavintoja!																												
20	Vaahtus tasolasserit ja rollamitta																												
21	400 mm murekettia lastan päällä.																												
22	0	7	15																										
23	1	710	763	770																									
24	4	695	746	758																									
25	7	695	740	747																									
26																													
27	1		53	60	netto mm																								
28	4		51	63	netto mm																								
29	7		45	52	netto mm																								
30																													
31																													
32																													
33																													
34																													
35																													
36																													
37																													
38																													
39																													
40																													
41																													
42																													
43																													
44																													
45																													
46																													
47																													
48																													
49																													
50																													
51																													
52																													
53																													
54																													
55																													
56																													
57																													
58																													
59																													
60																													