

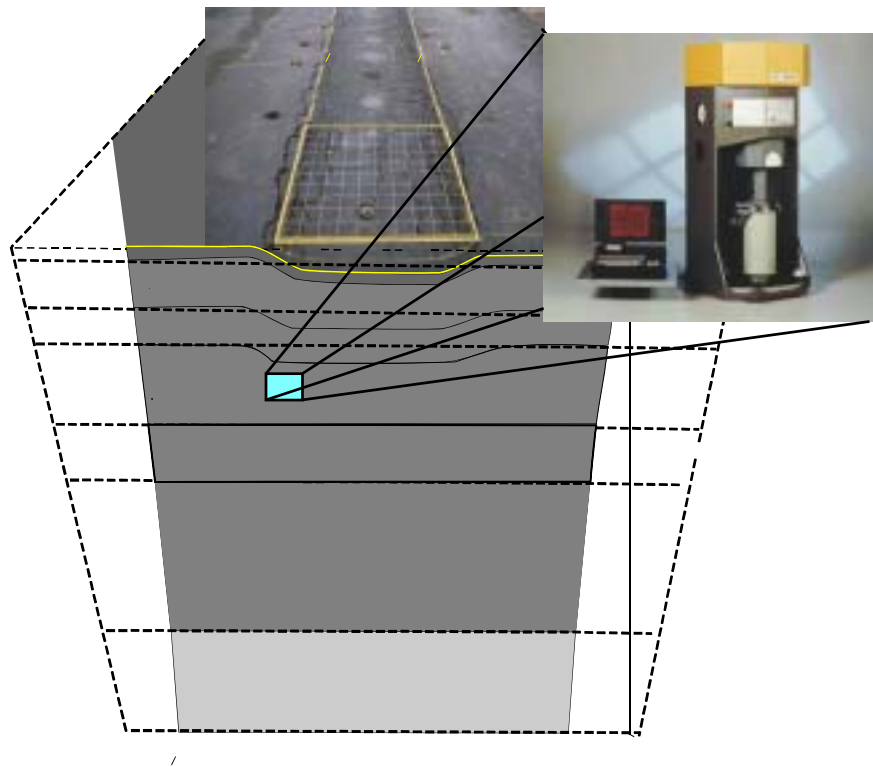


TIEHALLINTO

Pekka Jauhiainen, Jouko Törnqvist

## ICT -koe tien rakennekerrosmateriaalien deformaatioherkkyyden määrittämisessä

Tiehallinnon selvityksiä 63/2001



TIEHALLINTO  
Helsinki 2001

ISSN 1457-9871  
ISBN 951-726-815-7  
TIEH 3200709

Edita Oyj  
Helsinki 2001

Julkaisua myy/saatavana:  
faksi 0204 22 2652  
e-mail [julkaisumyynti@tiehallinto.fi](mailto:julkaisumyynti@tiehallinto.fi)  
[www.tiehallinto.fi/julk2.htm](http://www.tiehallinto.fi/julk2.htm)

TIEHALLINTO  
Opastinsilta 12 A  
PL 33, 00521 HELSINKI  
Puhelinvaihte 0204 22 150

**Jouko Törnqvist, Pekka Jauhiainen. ICT-koe tien rakennekerrosmateriaalien deformaatioherkkyyden määrittämisessä.** Helsinki 2001. Tiehallinnon selvityksiä 63/2001. 47 s. + liitt. 4 kpl. ISBN 951-726-815-7, ISSN 1457-9871, TIEH 3200709.

**Asiasanat:** rakennekerrokset, kiviainekset, tiivistys, deformaatio, tutkimusmenetelmät

**Aiheluokka:** 32, 56

## TIIVISTELMÄ

Tässä tutkimuksessa on haettu maamateriaaleille deformaatioherkkyyden luokittelutapaa. Luokittelu tapahtuu ICT-kiertotiivistimellä (Intensive compaction tester). Tutkimuksessa koestettiin 13 maamateriaalia. Näiden materiaalien hienoainesmääriä sekä vesipitoisuuksia muutettiin siten, että koetuksia oli yhteensä 52 kappaletta. Kokeiden perusteella päädyttiin esittämään sovellettavaksi indeksiksi tiiviuden muutos-%, ICT-työkierrosten 8-12 välillä. Tämä tiiviuden muutos-% laskettiin kuivatilavuuspainosta, joka saavutettiin 80 työkierroksella.

Tutkimuksessa selvitettiin materiaaliparametrien vaikutusta valittuun indeksiin. Selvitys tehtiin tilastollisella regressioanalyysillä. Tässä tutkimuksessa oli käytössä viidelle materiaalille tiedot deformatiivisuudesta joko todellisesta tierakenteesta tai simulointikokeista: TKT-kokeista tai HVS-kokeista. Regressioanalyysin sekä kyseisten viiden materiaalin verifiointitietojen pohjalta arvioitiin vastaako indeksi riittävässä määrin todellisuutta. Indeksi todettiin käyttökelpoiseksi. Vertailuaineiston määrää pidetään kuitenkin liian pienenä lopullisten johtopäätösten tekoon.

Materiaalin kelpoisuus arvioidaan deformaatioindeksillä seuraavasti:

Materiaaliluokitus deformaation suhteen	Deformaatioindeksi
Erinomainen	alle 1,25
Hyvä	1,25 – 1,40
Tyydyttävä	1,40 – 1,60
Huono	yli 1,60

Jouko TÖRNQVIST, Pekka JAUHAINEN. ICT-koe tien rakenekerrosmateriaalien deformaatioherkkyyden määrittämisessä. [ICT-method for determining the deformation sensitivity of unbound road materials]. Helsinki 2001. Tiehallinnon selvityksiä 63/2001. 47 s. + liitt. 4 kpl. ISBN 951-726-815-7, ISSN 1457-9871, TIEH 3200709

**Keywords:** pavement, layers, aggregate, compaction, deformation, test methods

## ABSTRACT

The main target, in this analysis, was to find deformation sensibility classification for unbounded materials. The classification was carried out with ICT-device (intensive compaction tester). Analysis included tests for 13 materials. Water content and percent fines of these materials were varied so that there were altogether 52 different samples which were put to test. On account of these tests the deformation index was defined as change in compaction index between 8-12 motive cycles. The change in compaction index was calculated from dry density which was achieved with 80 motive cycles.

The affect of material parameters for the deformation index was defined in this analysis. This definition was carried out with statistical regression analysis.

There were information for five materials in real structure or in simulation tests: PTF-test (pavement test facility) or HVS-test (heavy vehicle simulator). According to this information and regression analysis the deformation index was found to be applicable.

Material classification by deformation index is as follows:

Material classification regarding deformation	Deformation index
Excellent	below 1,25
Good	1,25 – 1,40
Fair	1,40 – 1,60
Bad	over 1,60

## **ALKUSANAT**

Kevytpäällysteisten tierakenteiden projekti on osa Tielaitoksen rahoittamaa Tierakenteiden tutkimusohjelmaa. Hanke käynnistettiin 1.6.1999 ja se kestää 31.12.2001 asti. Kevytpäällysteisten tierakenteiden projekti toteutetaan Tielaitoksen ohjausryhmän valvonnassa Oulun yliopiston Tie- ja liikennetekniikan laboratorion ja VTT Yhdyskuntatekniikan yhteistyönä.

Tutkimushankkeen johtoryhmään ovat kuuluneet Aarno Valkeisenmäki (puheenjohtaja), Panu Tolla Tieliikelaitos/konsultointi, Ismo Iso-Heiniemi, Pertti Virtala Tiehallinto/Hti, Tuomas Toivonen Tiehallinto/Hos, Tuomo Kallionpää, Kari Lehtonen Tiehallinto/Htl, Esko Ehrola Oulun yliopisto / Teknillinen korkeakoulu, Jouko Belt Oulun yliopisto, Laura Apilo, Jouko Törnqvist, Harri Spoof, Sami Petäjä (sihteeri) VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka.

Tämän osatutkimuksen tavoitteena oli vastata kysymykseen voidaanko ICT-laitetta eli kiertotiivistyslaitetta (ICT: Intensive compaction tester) käyttää kevytpäällysteisten teiden kantavan kerroksen materiaalien luokitteluun deformaatioherkkyyden suhteen siten, että deformaatioherkkyys olisi kuvattavissa indeksinomaisella suureella.

Tutkimusryötä on pääosin tehty VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan henkilökunnan toimesta. TKT-kokeet on tehty Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratoriossa. Pääosan työstä tekivät Pekka Jauhiainen ja Jouko Törnqvist VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta. Tutkimukseen ovat lisäksi osallistuneet VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta Risto Alkio ja Rainer Laaksonen, ja Oulun yliopistosta Jouko Belt.

Espoossa syyskuussa 2001

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



## SISÄLTÖ

1	TUTKIMUKSEN TAVOITE JA LÄHTÖKOHDAT	9
1.1	Tutkimus osana kevytpäällystetutkimusta	9
1.2	Kokonaistutkimuksen hypoteesit	9
1.3	Osatutkimuksen hypoteesi	10
2	KOEMENETELMÄ	12
2.1	ICT-laite eli kiertotiivistin	12
2.2	Materiaalien vesipitoisuuden ja laitteessa käytettyjen parametrien määrittäminen	13
2.3	ICT -laitteella tehdyt kokeet	14
3	MATERIAALIT	16
4	KOETULOKSET	19
4.1	Tiivistymistulokset	19
4.2	Monimuuttuja-analyysi	22
4.3	Pysyvät muodonmuutokset palautumiskokeella	29
5	DEFORMAATIOINDEKSI	32
5.1	Eri materiaalien luokitteluperusteet	32
5.2	Tiivistystyömäärän vaikutus deformaatioon	32
6	DEFORMAATIOINDEKSIIN VASTAAVUUS	35
6.1	TKT-laitteella tehdyt kokeet	35
6.2	Tierakenteessa olleet materiaalit	36
6.3	Vertailua tierakennehavaintojen sekä TKT- ja HVS-laittehavaintojen kesken	36
6.4	Geologisten kuvausten vertailua ICT-kokeeseen nähden	39
6.4.1	Teiskon kalliomurske	39
6.4.2	Ketunmaan kalliomurske	40
6.4.3	Alakylän kalliomurske (Vittakangas)	41
6.4.4	Luokitus	41
6.5	SPSS-analyysi	42
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	43
7.1	Suositus deformaatioindeksin määrittämiseksi	43
7.2	Jatkotutkimustarve tämän selvityksen perusteella	43
8	LÄHDELUETTELO	46
9	LIITTEET	47





# 1 TUTKIMUKSEN TAVOITE JA LÄHTÖKOHDAT

## 1.1 Tutkimus osana kevytpäällystetutkimusta

Tämä tutkimus on osa laajempaa kevytpäällystetutkimusta, jonka eräänä tavoitteena on luoda mitoitusmalli päällysteen pintaan syntyvälle tien poikisuuntaiselle epätasaisuudelle ja tarkastella eri rakennekerros-materiaalien ja olosuhteiden vaikutusta siihen. Tämän osatutkimuksen tavoitteena on vastata kysymykseen voidaanko ICT - eli kiertotiivistyslaitetta (ICT: Intensive compaction tester) käyttää kevytpäällysteisten teiden sitomattomien materiaalien luokittelemiseen deformaatioherkkyyden suhteen siten, että deformaatioherkkyys olisi kuvattavissa indeksinomaisella suureella. Indeksien luomisessa ei tavoitteena ole ollut selittää ilmiötä maamekaniikan teorioilla vaan tutkimukselle on jo lähtökodiltaan valittu empiirinen lähestymistapa.

Kevytpäällysteisillä teillä tarkoitetaan tässä projektissa alempiluokkaisia teitä, joiden päällyste on ohut ( $AB \leq 80$  mm) ja/tai pehmeä. Muita tyypillisiä piirteitä kevytpäällysteisille teille ovat:

- ohut tai puuttuva jakava kerros
- käytetyt rakennusmateriaalit ovat huonompilaatuisia kuin ylempiluokkaisilla teillä
- kapea tiepoikkileikkaus
- tien pientareet ovat kapeat ja luiskat ovat jyrkät
- kokonaiskerrospaksuus on ohut
- tierakenteen kuivatus toimii usein vain puutteellisesti
- pohjamaan ja/tai rakennekerrosten routimisongelmat.

## 1.2 Kokonaistutkimuksen hypoteesit

Tierakenteen muodonmuutosten arviointiin sopivaa yleispätevää mallia ei ole olemassa. Siksi yksi Kevytpäällystetie-projektin tavoitteista on laatia vaurioitumismalli tierakenteelle. Vaurioitumismallista pyritään kehittämään yksinkertainen analyyttis-empiirinen mitoitusmenetelmä. Mitoitusmenetelmä voi esim. koostua kahdesta tarkastelusta:

- kantokyky / stabiilitetitarkastelu pyörän alla ja koko rakenteen osalta
- pysyvien muodonmuutosten arvioinnista

Koko rakenteen kantokyvyn (stabiilitetti) tulee olla riittävä, jolloin rakenteen paikallista murtumista tai tien reunan sortumaa ei pääse tapahtumaan. Riittävän kantokyvyn lisäksi mitoitusmenetelmässä tulee arvioida tien rakennekerrosten sekä pohjamaan plastiset eli pysyvät muodonmuutokset liikennekuormien vaikutuksesta. Mallinnukseen sisällytetään tärkeimpien muuttujien (jännitystila, tiiviys, vesipitoisuus mm.) vaikutukset muodonmuutoksiin.

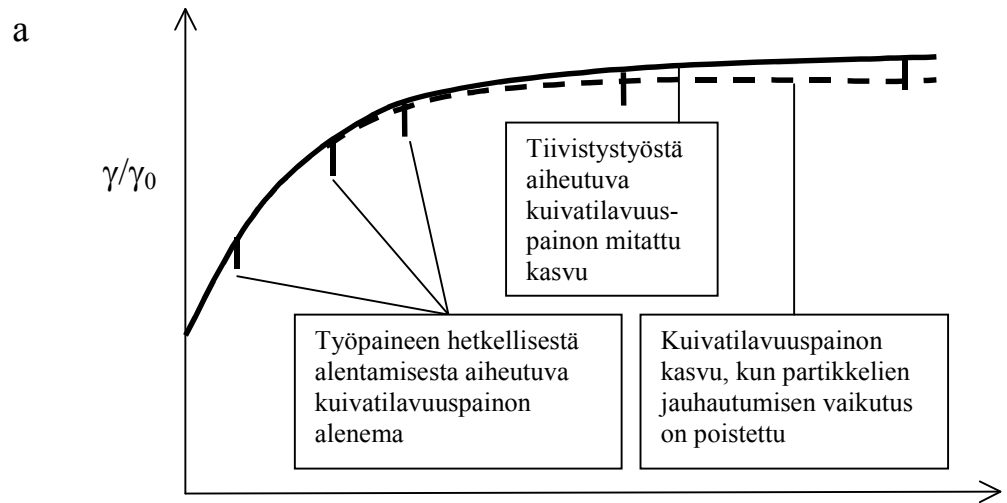
### 1.3 Osatutkimuksen hypoteesi

Tässä tutkimuksessa selvitetään ICT-kiertotiivistimen käyttömahdollisuuksia kevytpäällystetien sitomattomien materiaalien indeksoimiseksi. Lähtöhypoteesina ICT-laitteen valinnalle on ollut se, että koetapahtuma itsessään pitkälti vastaa niitä rasiustiloja, joita myös kohdistuu kantavan kerroksen materiaaliin. Kantavassa kerroksessa deformaatio tapahtuu tiivistymällä, leikkautumalla ja leikkautumista seuraavalla materiaalin syrjäytymisellä. ICT-kiertotiivistin taas saa materiaalit 'pakkautumaan' sekä pystysuoran paineen vaikutuksesta että laitteen näytteeseen aiheuttaman leikkausmuodonmuutoksen johdosta. Lisäksi muodonmuutoksiin vaikuttaa kokeen lopussa materiaalin jauhautuminen. Se missä suhteessa puhdasta puristustiivistymistä (hydrostaattisen jännityksen aiheuttama kontrataatio) esiintyy suhteessa leikkaustiivistymiseen (deviatorisen jännityksen aiheuttama kontrataatio) riippuu epäilemättä materiaalin rakeisuusominaisuuksista, vesipitoisuudesta jne. Samoin materiaalista riippunee se, missä kokeen vaiheessa tiivistymisen eri syyt ovat merkittävimmin vaikuttamassa. ICT-kiertotiivistimen toimintaperiaate on esitelty tarkemmin kappaleessa 2.1.

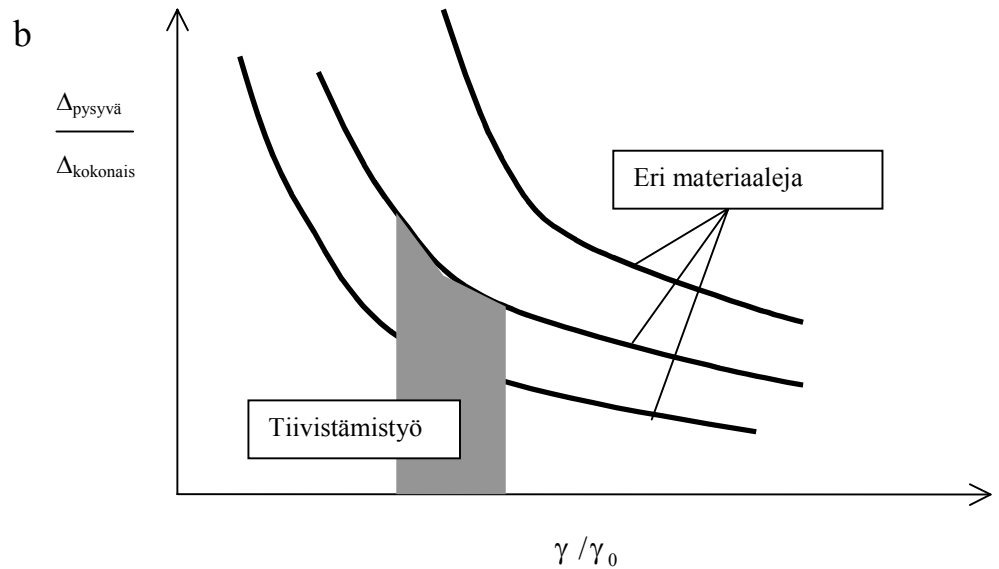
Kuvassa 1 on esitetty tämän tutkimuksen alkuperäinen hypoteesi. Ylemmässä a-kuvassa on esitetty, se miten materiaali tiivistyy työkierrosten funktiona. Ylemmässä käyrässä on esitetty se, miten materiaalin tilavuuspaino muuttuu työkierrosten suhteen ja alempi käyrä esittää tilannetta, jossa jauhautumisen vaikutus on poistettu. Jos jauhautumisen ja rakeiden rikkoutumisen vaikutus voitaisiin koetuloksista täysin eliminoida, päättyisi tiivistymisen tietylle vakiotasolle.

Lisäksi kuvasta näkyy hypoteesille olennainen tekijä eli pysyvien muodonmuutosten analysointi. Laite mittaa työpaineen alaisen kuivatilavuuspainon. Pystysuorat viivat kuvaavat sitä palautumaa, joka laitteessa käytetyn työpaineen laskemisesta aiheutuu.

Alemmassa b-kuvassa on esitetty varsinainen hypoteesi. Saadut tulokset normalisoidaan siten, että tiiviysasteen funktiona esitetään pysyvien muodonmuutosten suhde työkierroksen aiheuttamaan kokonaismuodonmuutokseen. Näin deformaatio-ominaisuuksia kuvaamaan saadaan tiiviysasteen muutos työmäärän suhteen. Näin voidaan verrata myös hienoainespitoisuuden, vesipitoisuuden ja muiden materiaali-kohtaisten parametrien merkitystä materiaalin deformaatioherkkyyden määrittelemiseksi.



Työkierrosten lukumäärä N (työpainne ja kiertokulma vakioita)



Materiaalien tiivistyminen on normalisoitu kuvassa materiaalin lopputilavuuspainon ( $\gamma_0$ ) mukaan ( $\gamma/\gamma_0$ ). Tiivistämistyö lasketaan tiiviuden muutoksen ( $\Delta\gamma/\gamma_0$ ) ja pysyvän-/ kokonaismuodonmuutossuhteen ( $\Delta_{pysyvä}/\Delta_{kokonais}$ ) pinta-alasta.

Kuva 1. Työhypoteesi.

## 2 KOEMENETELMÄ

### 2.1 ICT-laite eli kiertotiivistin

ICT-laite (Intensive Compaction Tester) on suomalainen kiertotiivistinlaite (gyratory compactor). Tällaisilla laitteilla mitataan tavallisesti maamassojen ja niistä side- tai lisäaineiden avulla eri tarkoituksiin valmistettujen rakeisten massojen tiivistymistä.

Kiertotiivistyksen periaatetta kuvaa oheinen piirros (kuva 2). Tutkittava massa pannaan pyöreään näytesylinteriin. Sen pohja- ja kansilevyt (päätylevyt) puristavat näytettä kokoon tasaisella paineella ( $p$ ). Levyt ovat aina keskenään samansuuntaiset, mutta niiden suunta sylinterin seinämään nähden poikkeaa hiukan kohtisuorasta. Tätä poikkeamaa havainnollistaa levyn keskinormaalien ja sylinterin keskiviivan välinen kulma ( $\alpha$ ).

Tiivistyksessä kulmapoikkeaman (sylinterin keskiakselin) suunta pyörii tasaisesti pohjalevyn keskinormaalien ympäri (työkierrokset  $N$ ). Päätylevyt ja sylinteri yhdessä saavat näytteessä aikaan melko tasaisen muodonmuutosliukuman, jonka suunta kiertää työkierrosten tahdissa. Liukuma ja paine ( $p$ ) tiivistävät näytettä.

Kiertotiivistyksessä tiivistämiseen vaikuttavat parametrit:

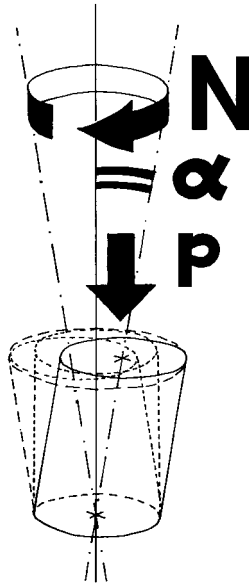
- liikekulma ( $\alpha$ , mrad),
- keskimääräinen aksiaalipaine näytteen päissä ( $p$ , kPa),
- työkierrosten lukumäärä ( $N$ ),
- pyörintänopeus (kierroksia/min, r/min).

Kaikkia parametreja voidaan mittauksissa varioida. Tavanomaisessa tiivistyksessä käytetään esimerkiksi arvoja 40 mrad (2,29 kulma-astetta), 160 kPa ja 80 kierrosta tai vaihtoehtoisesti 17,5 mrad (CEN) / 21,8 (SHRP) mrad, 600 kPa ja yli 100 kierrosta.

Tiivistymisestä mitattavat parametrit:

- Työkierrokset. Jokainen kierros lisää näytteeseen tehtyä tiivistystyötä. Kokeen mittaustulokset rekisteröidään työkierrosten mukaan.
- Näytteen korkeudesta lasketaan näytteen tilavuus ja tiiveystila.
- Näytteen kansilevyn liikettä vastustava momentti (Nm). Siitä lasketaan keskimääräinen näytteen muodonmuutoksen leikkausvastus ( $\text{kN/m}^2$ ).

Mittaukset ja laskelmat on selostettu tarkemmin laitteen käyttöohjeissa.



Kuva 2. ICT-laitteen toimintaperiaate ja muuttujien esittely.

## 2.2 Materiaalien vesipitoisuuden ja laitteessa käytettyjen parametrien määrittäminen

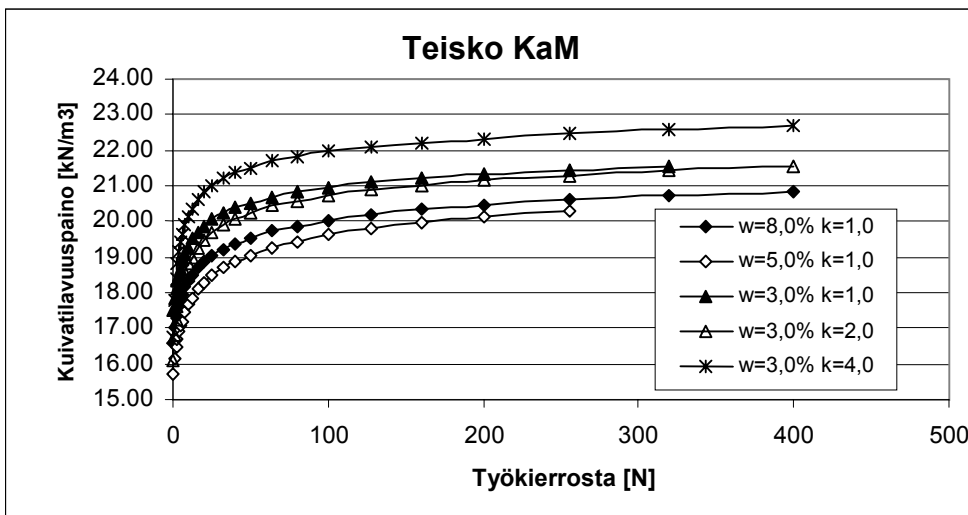
Laitteessa käytettyjen parametrien määrittämisen lähtökohdaksi otettiin kevytpäällystetien kantavassa kerroksessa vaikuttavan yksikköpyöräkuorman vaikutus rakenteeseen siten, että käytettävä paine vastaisi mahdollisimman hyvin pystysuoraa jännitystä ja levyjen kulmasta johtuva leikkausvoima vastaisi rakenteessa vaikuttavaa leikkausvoimaa. ICT-laite itsessään asettaa rajoitukset kevytpäällystetien leikkausvoimien simuloinnissa, sillä kulmaa ei voi asettaa niin pieneksi, että saataisiin aikaiseksi riittävän pieni leikkausmuodonmuutos. Toisaalta pienillä leikkausvoimilla olisi tehtyjen ICT-laitteen työkierrosten määrä kasvanut kohtuuttoman suureksi. Siksi leikkausvoimalle jouduttiin asettamaan kokeilemalla raja-arvo, jonka mukaisesti ICT-laitteella saatavat tulokset olisivat toistettavissa.

Boussinesq'in teorian mukaista jäykän ympyrälaatan alapuolella vaikuttavan paineen kaavaa (2-1) käytettiin arvioidessa painetta. Kaavan avulla saatiin lopulliseksi työpaineeksi 4,0 bar:ia.

$$\sigma_z = \frac{pr_0^2(r_0^2 + 3z^2)}{2(r_0^2 + z^2)^2} \quad (2-1)$$

Käytettävän vesipitoisuuden ja kiertokulman määrittämiseksi tehtiin esiko-keita Teiskosta peräisin olevalla kalliomurskeella eri vesipitoisuuksissa ja eri kiertokulmilla. Käytetyt vesipitoisuudet olivat 3, 5 ja 8 %. Käytetyt kiertokulmat olivat 1°, 2° ja 4°. Saadut tulokset on esitetty kuvassa 3.

Kuvasta 3 on nähtävissä, että vesipitoisuuden noustessa myös tiivistyminen lisääntyy. Myöskin liikekulman lisääminen kasvattaa tiivistystulosta. Ainoastaan koekappale, jonka vesipitoisuus oli 3,0 % ja käytetty liikekulma 1,0°, ei ole loogisessa järjestyksessä muihin nähden. Tässä hienoainesmäärän suuruus oli muihin kokeisiin nähden huomattavasti suurempi. Saatujen kuvaajien perusteella todettiin, että pienin käytetty kulma (1,0 °) on riittävä aikaansaamaan tutkimukselle resoluutioltaan riittävän, mutta edelleen toistettavan kuvaajan eri materiaaleista.



Kuva 3. Teisko KaM:sta tehdyt kokeet sopivan vesipitoisuuden ja liikekulman määrittämiseksi.  $k$  on liikekulma asteina.

Näytteestä hävisi 8 % vesipitoisuudella 220 g:aa vettä ja osin myös hienoainesta. Siten n. 40 % vedestä hävisi kokeen aikana. Vastaavat määrät 5 %:n vesipitoisuudella oli 31 g:aa eli n. 10 % vedestä. 3 %:n vesipitoisuudella näyte pysyi saman painoisena. Kokeessa käytettäviksi vesipitoisuuksiksi valittiin tämän perusteella 3,0 % ja 5,0 %, jotka ovat vertailukelpoiset myös Oulun Yliopiston tekemän tutkimuksen kanssa [3].

### 2.3 ICT -laitteella tehdyt kokeet

ICT -kokeissa käytettiin VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkimuslaitetta, jonka työsylinterin sisähalkaisija on 150 mm. Käytetyn sellikoon takia suurimmat sallitut rakeet sellissä olivat #32 mm. Näytteistä poistettiin sitä suuremmat rakeet. Saadut näytteet homogenisoitiin laakeassa astiassa käsin sekoittamalla. Hiekkamaita punnittiin sekoitusastiaan 5000 g ja muita 5700 g. Valittua vesipitoisuutta vastaava vesimäärä punnittiin astiaan. Vettä ja näytemassaa sekoitettiin 90 sek. SRC-sekoitinlaitteella.

ICT-laitteessa asetettiin aksiaalipainetta vastaava työpaine painesäätimellä. Kiertokulma aseteltiin kokeen alussa 17,5 mrad (kuormituslevyn kaltevuus  $1.00^\circ \cong 1.3 \text{ mm} / 75 \text{ mm}$ ) asentoon. Koesuoritusta ohjasi tietokoneohjelma, joka magneettiventtiin ohjauksella painoi ylämännän massan päälle ja vakioviiveen jälkeen käynnisti kiertotiivistyksen. Kiertonopeus oli kaikissa kokeissa 15 sykliä minuutissa.

Näytteitä koestettiin 4 bar:n paineessa kaikkiaan 400 kierrosta. Palautuvien muodonmuutosten selvittämiseksi myös kokeen välillä pyöritettiin 2 kierrosta alhaisella paineella (0,4 bar). Nämä alhaisen paineen koestuskierrokset tehtiin 10, 20, 40, 80, 160 ja 400 kierroksen kohdalla. Lopullinen ICT-laitteessa tehtyjen työkierrosten lopputuloksena saatiin n. 150 mm korkea näyte.

Näytteen massa sylinterissä punnittiin etu- ja jälkikäteen sylinteristä poistuvan veden ja hienoaineksen määrän arvioimiseksi. Näytteen lopullinen vesipitoisuus määritettiin kuivaamalla näyte uunissa ja punnitsemalla etu- ja jälkikäteen kuivauksen. Tuloksia ei ole tässä raportissa käsitelty. Näytteistä ICT-tiivistyksen aikana poistuva vesi ja hienoaines todettiin niin vähäiseksi, että jatkotarkasteluissa pitäydettiin suunnitelmien mukaisissa lukuarvoissa.

Tiivistyksen aikana ICT-laitteen tietokoneohjelma tallettaa näytteen korkeuden ja laser-etäisyysanturista saatavan muodonmuutostiedon. Tulokset talletetaan raakadatan debug-tiedostoon kovalevyille. Varsinainen tulosten käsittely tehtiin Excel-ohjelmalla.

### 3 MATERIAALIT

Testattavat materiaalit valittiin toisaalta siten, että materiaalit edustavat kevytpäällystettyjen teiden materiaalivalintoja oikeassa painosuhteessa. Tätä varten arvioitiin eri vuosikymmeninä rakennettujen teiden materiaaleja pienessä työryhmässä. Toisaalta haluttiin, että materiaalityypit jakautuisivat edustamaan myös nykyisiä materiaaleja, jolloin päädyttiin siihen, että testattavien materiaalien joukossa tulee olla hiekkoja, soria, soramurskeita ja kalliomurskeita. Määräpainotukset valittiin kevytpäällystettyjen edustavuuden suhteen siten, että kokeissa materiaaleina olisi kaksi hiekkaa, kolme soraa, neljä soramursketta ja neljä kalliomursketta.

Materiaalivalinnoissa pyrittiin myös siihen, että mahdollisimman monella materiaalilla on vertailukohta muissa mallikokeiden deformaatiotuloksissa. Tämän pohjalta koestettavaksi valittiin Oulunsalosta hiekka, Ketunmaasta kalliomurske ja Vittakankaalta kalliomurske, joita oli käytetty kevytpäällystetutkimuksen materiaaleina TKT-kokeessa Oulussa. HVS-kokeista otettiin ns. Reflex tutkimushankeen hiekka, sora ja kalliomurske. Reflex tutkimushankeen oli Teiskosta. Kahdesta kevytpäällystettyjen seurantakoekohteesta valittiin Posiosta soramurske ja Noormarkusta soramurske.

Loput materiaalit on hankittu tiepiireiltä siten, että edellä mainittu maalajiryhmittely saatiin aikaiseksi. ICT-kokeita varten leikattiin materiaaleista yli #32 mm rakeet pois, koska halkaisijaltaan 150 mm oleva selli asettaa tämän rajan käytettäville materiaaleille. Taulukoissa 1-4 on esitetty materiaaliparametrit ja kokeessa käytetyt tunnuksat.

Taulukossa 1 on esitetty ensiksi se hienoainespitoisuus, joka on materiaalissa luontaisena. Hienoainespitoisuuksien kasvattamiseen käytettiin sora- ja hiekkamaiden yhteydessä Reflex hiekan hienoainesta (<#0,063 mm). Kalliomurskeiden hienoaines oli pääasiallisesti Ketunmaa KaM:een hienoainesta. Soramurskeiden yhteydessä lisättävänä hienoaineksena oli 50 % Reflex Hk:a ja 50 % Ketunmaan KaM:een hienoainesta.

Taulukossa 4 on esitetty materiaalien eroosioindeksi. Indeksit on laskettu soveltamalla Sherardin eroosio-kriteeriä /1/. Liitteessä 1 on esitetty eroosio-kriteerin sovellustapa.



*Taulukko 1. Käytetyt materiaalit, niiden vesipitoisuudet, hienoaines-pitoisuudet ja testeissä käytetyt tunnuksset. Tunnuksen perässä on muissa yhte-yksissä ilmoitettu w-kirjaimen jälkeen vesipitoisuus ja h-kirjaimen jälkeen hieno-aines-pitoisuus.*

Materiaali	Hienoaines- pitoisuus (h)	w	Hienoaines- pitoisuus (h)	w	Tunnus
	[%]	[%]	[%]	[%]	
Reflex Hk	15	5 / 8	2	3 / 5	RHk w#h#
Oulunsalo Hk	1	3 / 5	8	3 / 5	Ohk w#h#
Rauhamaa Sr	2	3 / 5	8	3 / 5	RaSr w#h#
Reflex Sr	3	3 / 5	8	3 / 5	ReSr w#h#
Korsmalm Sr	1	3 / 5	8	3 / 5	KoSr w#h#
Posio SrM	8	3 / 5	2	3 / 5	PSrM w#h#
Noormarkku SrM	2	3 / 5	8	3 / 5	NSrM w#h#
Viiskivi SrM	2	3 / 5	8	3 / 5	VSrM w#h#
Sagersby SrM	2	3 / 5	8	3 / 5	SSrM w#h#
Vittakangas KaM	4	3 / 5	8	3 / 5	VkaM w#h#
Teisko KaM	3	3 / 5	8	3 / 5	TkaM w#h#
Koskenkylä KaM	3	3 / 5	8	3 / 5	KoKaM w#h#
Ketunmaa KaM	6	3 / 5	0	3 / 5	KeKaM w#h#

*Taulukko 2. Materiaalien raekäyrän muotoa kuvaavat tunnusluvut ja ominais-pinta-ala. Raekäyrän muotoa kuvaavat parametrit on määritetty käyrästä, josta on poistettu yli 32 mm rakeet.*

Materiaali	Raekäyrän muoto		$K_r$	Ominaispinta-ala
	$[d_{50}]$	$[d_{60} / d_{10}]$	$[d_{30}^2 / (d_{60}d_{10})]$	$[m^2/g]$
Reflex Hk	0,2	7,5	0,83	1,82
Oulunsalo Hk	0,8	4,4	1,10	-
Rauhamaa Sr	6,8	11,3	1,09	9,00
Reflex Sr	1,7	18,2	0,68	9,40
Korsmalm Sr	4,3	8,0	1,08	22,00
Posio SrM	0,6	2,9	0,82	3,16
Noormarkku SrM	2,7	40,0	0,58	2,85
Viiskivi SrM	8,0	14,1	1,27	9,00
Sagersby SrM	8,0	20,8	0,97	6,82
Vittakangas KaM	7,8	57,5	4,45	1,21
Teisko KaM	9,5	37,1	3,52	3,22
Koskenkylä KaM	7,0	20,0	1,92	3,56
Ketunmaa KaM	8,0	85,2	1,55	3,23

Taulukko 3. Materiaalien liuskeisuus, sepeli-% ja kiillepitoisuus. Kiillepitoisuus on arvioitu silmämääräisen tarkastelun perusteella.

Materiaali	Liuskeisuus	Sepeli-%	Kiillepitoisuus-% lajitteittain	
	[%]	[%]	[<0,063]	[0,063-0,5]
Reflex Hk	-	0	20	10
Oulunsalo Hk	-	0	0	0
Rauhamaa Sr	3,84	0	5	10
Reflex Sr	-	0	25	5
Korsmalm Sr	3,21	0	5	5
Posio SrM	8,33	17	10	5
Noormarkku SrM	12,21	-	15	10
Viiskivi SrM	12,36	43	15	15
Sagersby SrM	5,80	48	10	5
Vittakangas KaM	-	100	40	20
Teisko KaM	26,50	100	20	15
Koskenkylä KaM	28,92	100	0	0
Ketunmaa KaM	-	100	10	15

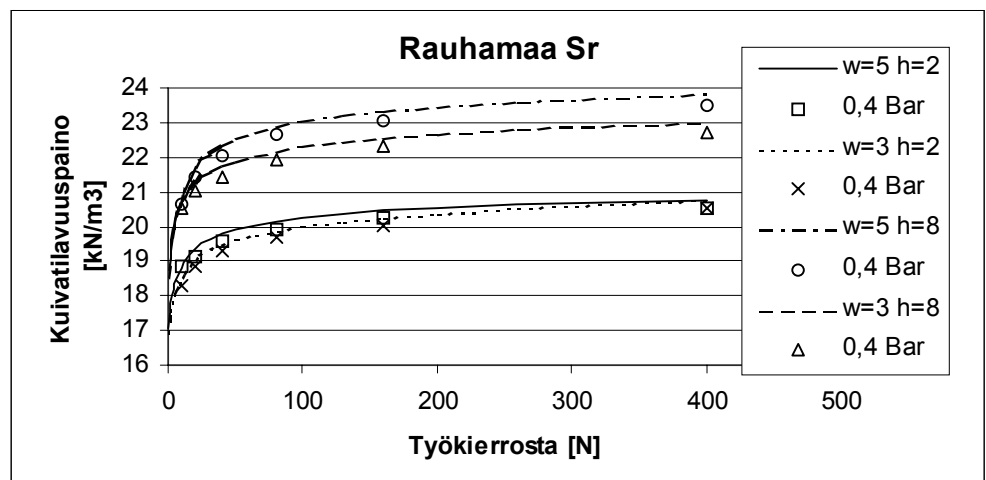
Taulukko 4. Materiaalien eroosioindeksi hienoainespitoisuuden mukaan.

Materiaali	Hienoaines- pitoisuus	Eroosio- indeksi	Hienoaines- pitoisuus	Eroosio- indeksi
	[%]		[%]	
Reflex Hk	15	0	2	0
Oulunsalo Hk	1	0,08	8	0,12
Rauhamaa Sr	2	0,24	8	0,34
Reflex Sr	3	0,02	8	0,02
Korsmalm Sr	1	0,21	8	0,32
Posio SrM	8	0,23	2	0,2
Noormarkku SrM	2	0,03	8	0,03
Viiskivi SrM	2	0,25	8	0,34
Sagersby SrM	2	0,23	8	0,29
Vittakangas KaM	4	0,37	8	0,41
Teisko KaM	3	0,3	8	0,36
Koskenkylä KaM	3	0,29	8	0,34
Ketunmaa KaM	6	0,34	0	0,17

## 4 KOETULOKSET

### 4.1 Tiivistymistulokset

Kuvassa 4 on esitetty Rauhamaa Sr maa-aineksen kuivatilavuuspainon kehitys työkerrosten funktiona. Kuvasta 4 on havaittavissa vesipitoisuuden (w) ja hienoaineksen (h) määrän vaikutus tilavuuspainon muutokseen kokeen aikana. Sekä hienoaineksen että vesipitoisuuden kasvattaminen lisää tiivistymistä. Siten voidaan olettaa, että on mahdollista löytää ICT-kokeella vertailtavissa oleva maa-ainesten luokittelu.



Kuva 4. Kuivatilavuuspaino työkerrosten funktiona.

Jotta voitaisiin arvioida eri materiaaleja keskenään, niin materiaalit normalisoitiin Parannetun Proctor-kokeen kuivatilavuuspainon maksimin perusteella. ICT-laitteen valmistaja on esittänyt, että Parannettu Proctor-kokeella saatava maksimikuivatilavuuspaino on saavutettavissa ICT-laitteella, kun laitteen liikekulma on 40 mrad, paine 4 bar ja materiaalia koestetaan 80 työkerrosta. Kokeissa käytetyn pienennetyin liikekulman takia materiaalit tiivistyivät vähemmän kuin laitevalmistajan asetuksilla tehtäessä. Teisko KaM:lla tehtyjen kokeiden perusteella 17,5 mrad kulmalla ja 4 barin paineella koestettaessa 400 työkerrosta vastaa tiiviydeltään annettua laitevalmistajan arviota Parannetun Proctor-kokeen maksimikuivatilavuuspainosta (Kuva 3). Tämän takia tutkimuksen tiiviyssastevertailuihin valittiin maksimikuivatilavuuspainoiksi 80- ja 400-työkerroksella saavutetut kuivatilavuuspainot. Tiiviyssaste laskettiin kaavalla (4-1)

$$D = \gamma_d / \gamma_{\max} \cdot 100 \quad (4-1)$$

D	tiiviyssaste [%]
$\gamma_d$	kuivatilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_{\max}$	kuivatilavuuspainon maksimiarvo [kN/m <sup>3</sup> ]

Eri teillä rakentamisen jälkeiset sitomattomien materiaalien tiiviystilat luonnollisesti vaihtelevat. Tässä tutkimuksessa on lähdetty – normalisointimielessä – siitä että tiivistäminen olisi tehty ennen päällystämistä 92 %:iin Parannetun Proctor-kokeen arvosta. Jotta saataisiin selville montako työkierrosta 92 % tiiviyssaste ICT-koestamisessa keskimäärin vastaa, laskettiin kaikkien materiaalien tiiviyssasteiden keskiarvot. Tulokset on esitetty taulukossa 5 vastaten sekä 80 työkierrosta että 400 työkierrosta. Jos Parannetun Proctor-kokeen tulos saavutetaan 400-työkierroksen jälkeen (17 mrad/4,0 bar), niin taulukon 5 mukaan 92 % tiiviyssastetta vastaa keskimäärin 20 työkierrosta. Vastaavasti käytettäessä 80 työkierrosta suhteellisen tiiviyn maksimi-arvon mittarina, niin 8 työkierrosta vastaa 92 %:n tiiviyssastetta.

*Taulukko 5. Tiiviyssaste työkierrosten funktiona. Taulukossa on esitetty lasketut arvot sekä laskettujen arvojen perusteella valitut arvot.*

Kierr.	Tiiviyssaste / Vertailuarvona				Kierr.	Tiiviyssaste / Vertailuarvona			
	80 kierrosta		400 kierrosta			80 kierrosta		400 kierrosta	
[N]	[%]	[%]	[%]	[%]	[N]	[%]	[%]	[%]	[%]
0	83.8		80.7		25	96.4	96	92.9	93
1	85.9		82.8		32	97.2	97	93.6	
2	87.4		84.2		40	97.9		94.3	94
3	88.5		85.3		50	98.7	99	95.0	95
4	89.4		86.1		65	99.4		95.8	96
5	90.1	90	86.8		80	100.0	100	96.3	
6	90.7	91	87.4		100	100.7		97.0	97
8	91.8	92	88.4		130	101.3		97.6	
10	92.6		89.2		160	101.8		98.1	98
12	93.3	93	89.9	90	200	102.4		98.6	
16	94.5	94	91.0	91	260	102.9		99.2	99
20	95.6		92.1	92	400	103.8		100.0	100

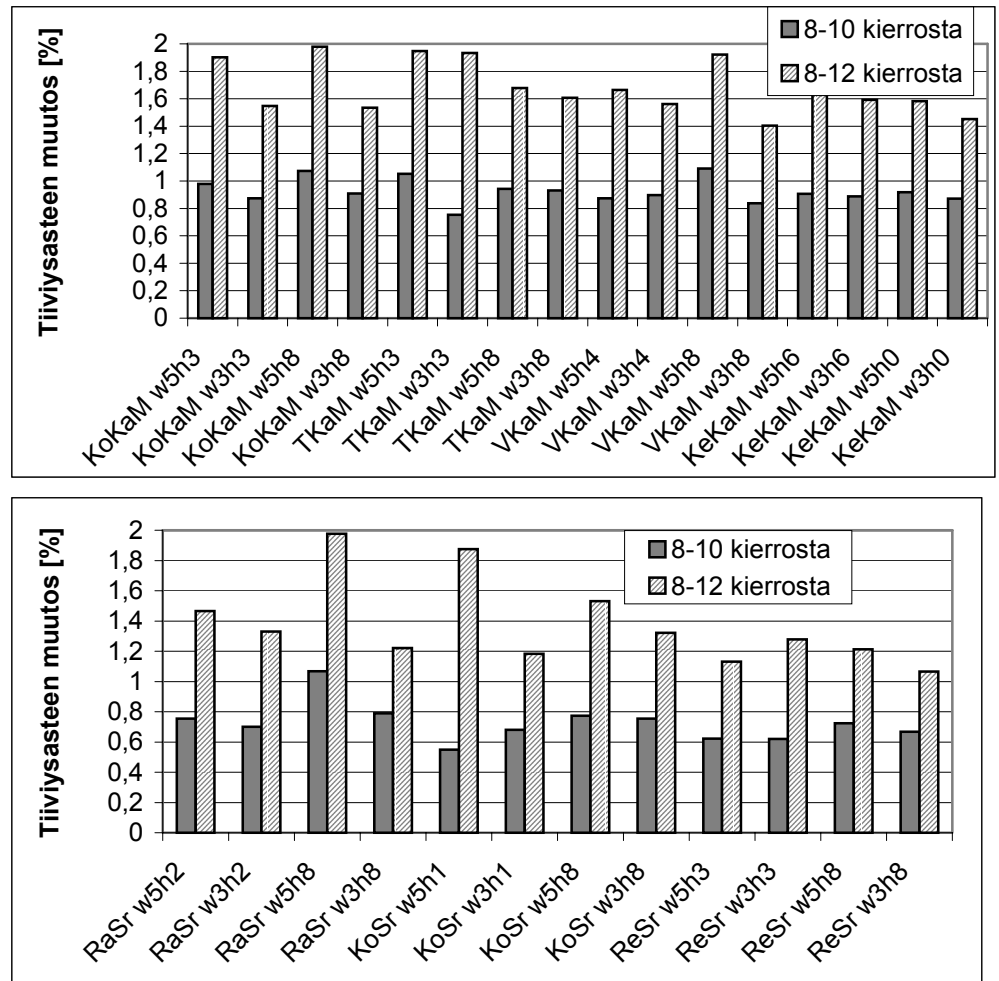
Deformaatioindeksi 92 %:n tiiviyssasteen kohdalla laskettiin kaavalla (4-2). Kun tarkastellaan 80 työkierroksen koejärjestelmässä tiiviyssasteen muutosta, niin muutosta tarkastellaan 8 ja 12 työkierroksen välisenä muutoksena. Vastaavasti 400 työkierroksen koejärjestelmässä muutosta tarkastellaan 20 ja 25 työkierroksen välillä. Saadut tulokset 80 työkierroksen koejärjestelmässä on esitetty kuvissa 5 ja 6. Lisäksi kuvissa on esitetty tiiviyn muutokset työkierrosvälillä 8...10 kierrosta.

$$\Delta D = (\gamma_l - \gamma_a) / \gamma_{\max} \cdot 100 \cdot N / 4 \quad (4-2)$$

$\Delta D$  deformaatioindeksi [%]

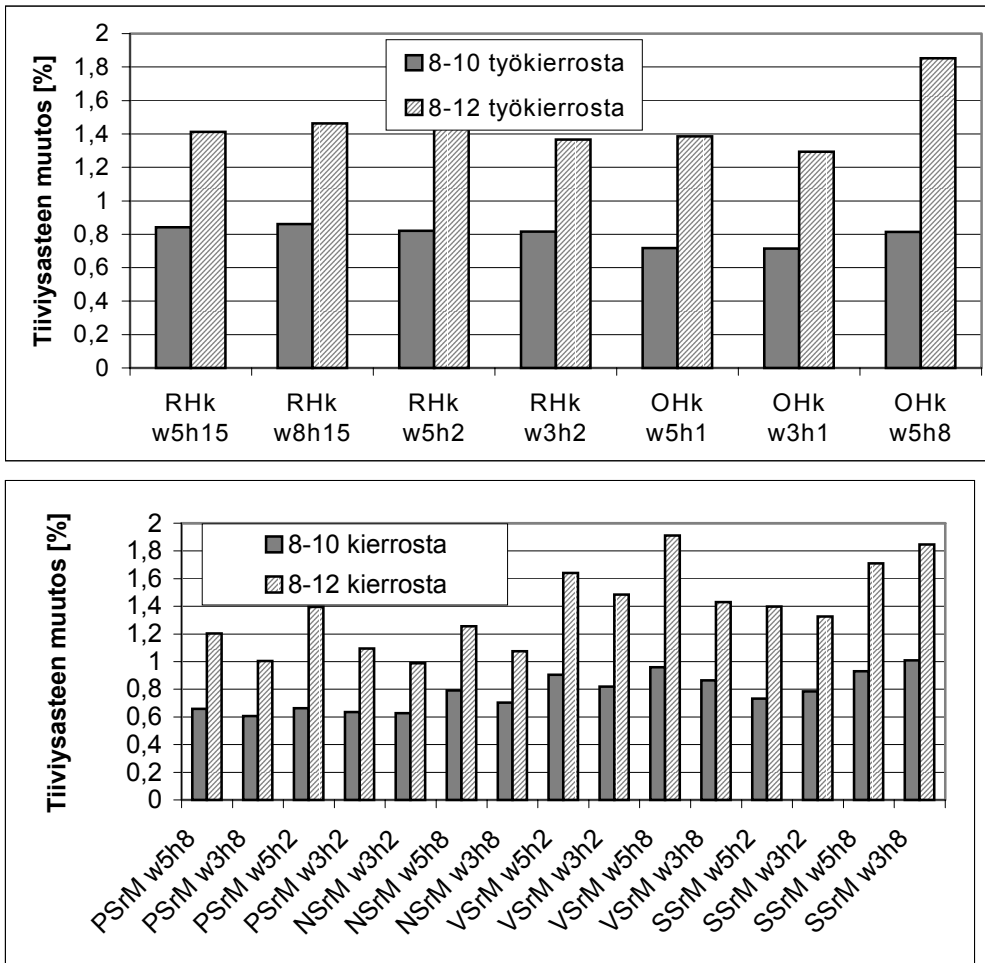
$\gamma$  kuivatilavuuspainot (l = lopussa, a = alussa ja max = maksimi-arvo)

N kierrosten lukumäärä vertailujaksolla



Kuva 5. Tiivysasteen muutos 8-10 ja 8-12 työkiirroksilla kalliomurskeilla ja so-rilla.

Taulukossa 6 on esitetty maalajeittain tiivysasteiden muutoksen vaihteluväli ja keskiarvot. Niistä on havaittavissa, että kalliomurskeiden tiiviydenmuutos on muihin maalajeihin nähden huomattavasti suurempi. Syyksi voidaan arvioida kalliomurskeiden tiivistymisen kannalta epäedullinen raekäyrämuoto. Kuvista 5 ja 6 voidaan päätellä, että vesipitoisuudella on suora vaikutus tiivistymiseen siten, että vesipitoisuuden kasvaessa myös tiivistyminen kasvaa työmäärän suhteen. Hienoainesmäärän vaikutusta tiivistymiseen ei kuvien perusteella voida arvioida. Hienoaineksen lisäys on saattanut, sekä lisätä että vähentää tiivistymisen vaikutusta. Nämä samat vaikutukset, mitä on edellä mainittu, havaittiin myös monimuuttuja-analyysissä.



Kuva 6. Tiivysasteen muutos 8-10 ja 8-12 työkierroksilla soramurskeilla ja hiekoilla.

Taulukko 6. Tutkimuksessa saatujen tiivysasteiden muutokset työkierroksilla 8-12 eli deformaatioindeksi eri materiaaleille.

Materiaali	Vaihteluväli [%]	Keskiarvo [%]
Hiekka	1,294 – 1,853	1,458
Sora	1,132 – 1,875	1,383
Soramurske	0,988 – 1,846	1,402
Kalliomurske	1,405 – 1,979	1,690

## 4.2 Monimuuttuja-analyysi

Monimuuttuja-analyysiä ei alunperin sisällytetty varsinaiseen deformaatioindeksin muodostamistyöhön. Monimuuttuja-analyysi haluttiin kuitenkin tehdä, jotta eri materiaaliominaisuuksien merkityksestä indeksin muodostumi-

seen saataisiin yleispiirteinen kuva sekä voitaisiin arvioida indeksin käyttökelpoisuutta.

Monimuuttuja-analyysissä käytettiin työkierrosten 8-12 tiivyyden muutosta (80 työkierrosta vastaa tiiviydestä 100 %) ja työkierrosten 20-25 välistä tiivyyden muutosta (400 työkierrosta 100 %). Muina parametreinä käytettiin taulukkojen 1-4 tietoja. Monimuuttuja-analyysi tehtiin SPSS-ohjelmalla lineaarisena regressioanalyysinä stepwise-menetelmällä, jossa menetelmä asettaa paremmuusjärjestykseen eri parametrit ja muodostaa lineaarisen mallin valittujen parametrien avulla. Tässä raportissa on käsitelty ainoastaan monimuuttuja-analyysin tuloksia työkierroksille 8-12.

Koko aineistoa käsiteltäessä havaittiin, että liuskeisuus on deformaatioindeksin selittäjänä huono, joten se voitiin jättää tarkastelusta pois. Kovin-kaan monesta materiaalista ei liuskeisuudelle ollut lukuarvoa, joten se olisi ollut rajoittavana tekijänä regressioanalyysiä tehtäessä.

Eri materiaaliominaisuuksista sepeli-% on paras mallin selittäjä. Samassa mallissa vesipitoisuus, eroosioherkkyys, kiillemäärä,  $K_r$ , ominaispinta-ala ja  $d_{60}/d_{10}$  ovat tässä nimenomaisessa järjestyksessä parhaat selittäjät. Koe oli kuitenkin lyhytaikainen ja siten pitkällä aikavälillä - rapautumista ajatellen - mm. kiillepitoisuus voi nousta merkittävämmäksi tekijäksi. Taulukossa 7 on esitetty mallien regressioanalyysin yhteenveto. Taulukosta on nähtävissä, että viidellä muuttujalla saavutetaan tulos, jolla adjusted  $R^2$  on suurin ja standardivirhe pienin. Siten voidaan havaita, että viidellä parametrilla saavutetaan sellainen tulos, jolla lisäparametrien käyttö voidaan kyseenalaistaa. Kaava (4-3) on SPSS:llä laskettu malli viidelle muuttujalle. Taulukossa 8 on esitetty parametrien suhteellinen vaikutus kaavassa (4-3) ja kuvassa 7 on esitetty kaavalla lasketut arvot mitattujen arvojen funktiona.

*Taulukko 7. Regressioanalyysin mallien yhteenveto*

Malli	R	$R^2$	Adjusted $R^2$	Standardivirhe
1	0,511	0,262	0,245	0,2309
2	0,646	0,417	0,390	0,2075
3	0,698	0,487	0,452	0,1968
4	0,717	0,514	0,468	0,1939
5	0,732	0,535	<b>0,479</b>	<b>0,1919</b>
6	0,739	0,545	0,477	0,1922
7	0,739	0,546	0,464	0,1945

1. Ennustavat muuttujat: Sepeli-%

2. Ennustavat muuttujat: Sepeli-%, vesipitoisuus

3. Ennustavat muuttujat: Sepeli-%, vesipitoisuus, eroosio

4. Ennustavat muuttujat: Sepeli-%, vesipitoisuus, eroosio, kiillemäärä

5. Ennustavat muuttujat: Sepeli-%, vesipitoisuus, eroosio, kiillemäärä,  $K_r$

6. Ennustavat muuttujat: Sepeli-%, vesipitoisuus, eroosio, kiillemäärä,  $K_r$ , ominaispinta-ala

7. Ennustavat muuttujat: Sepeli-%, vesipitoisuus, eroosio, kiillemäärä,  $K_r$ , ominaispinta-ala,  $d_{60}/d_{10}$

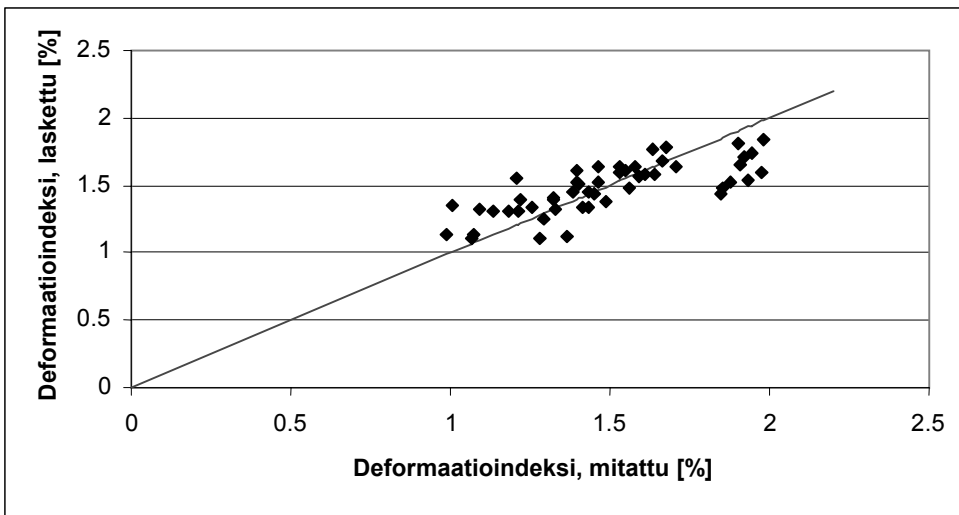
Deformaatioindeksin laskennassa kaavan 4-3 mukaan 95 %:n luotettavuudella tarkkuus on  $\pm 0,386$ . Luotettavuuden ollessa 80 %, tarkkuus on  $\pm$

0,249. Koska mitatut tulokset olivat kokonaisuudessaan välillä 1-2, niin saatu tarkkuus on pieni.

$$\Delta D = 0,895 + 0,00157 \cdot \text{Sepeli-\%} + 0,0991 \cdot w + 0,612 \cdot \text{Erosio} - 0,01 \cdot \text{Kiillemäärä} + 0,0658 \cdot K_r \quad (4-3)$$

Taulukko 8. Parametrien suhteellinen vaikutus kaavassa (4-3).

Parametri	Sepeli-%	w	Erosio	Kiillemäärä	$K_r$
Vaikutus malliin [%]	22,2	25,2	25,0	21,2	6,4



Kuva 7. Kaavalla (4-3) lasketut deformaatioindeksit mitattujen deformaatioindeksien funktiona.

Edellä kuvattu regressio-analyysi oli lineaarinen eli siis kaikki parametrit vaikuttavat kaavaan (4-3) lineaarisesti. Siksi tästä eteenpäin tutkittiin myös sitä miten vaikuttaisi, jos yksittäiselle parametrille haettaisiin yhtälön (4-4) muotoa oleva käyrä. Parametreille funktiota sovitettiin siten, että tarkasteltavaa parametriä tutkittaessa poistettiin mitatuista deformaatioindeksin arvoista kaavan (4-3) kertoimilla muiden parametrien vaikutus ja verrattiin jäänyttä erotusta materiaaliikohtaisiin parametrien arvoihin ja sovitettiin funktio (4-4). Kokeissa oli käytetty ainoastaan kahta vesipitoisuutta (lukuunottamatta yhtä koetta) ja siten sille ei voinut sovittaa käyrää. Muille neljälle parametrille funktiota sovitettiin. Havaittiin, ettei ole löydettävissä mallia voimakkaasti parantavaa funktionmuotoa parametreille.

$$y = ax^b + cx + d \quad (4-4)$$

Koska sepeli-% korreloi myös muiden materiaaliominaisuuksien suhteen, niin SPSS:llä mallinnettiin myös ilman sepeli-%:ia. Taulukon 9 perusteella



voidaan päätellä, että tarkempi malli saadaan jättämällä sepeli-% mallista pois. Taulukosta on nähtävissä, että neljällä muuttujalla saavutetaan tulos, jolla Adjusted R<sup>2</sup> on suurin ja standardivirhe pienin. Siten voidaan havaita, että neljällä parametrilla saavutetaan sellainen tulos, jolla lisäparametrien käyttö voidaan kyseenalaistaa. Neljän parametrin malli on esitetty kaavassa (4-5), parametrien suhteellinen vaikutus malliin on esitetty taulukossa 10 ja lasketut pisteet mitatun tuloksen funktiona on esitetty kuvassa 8.

Taulukko 9. Regressioanalyysin mallien yhteenveto

Malli	R	R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	Standardivirhe
1	0,547	0,300	0,285	0,2341
2	0,699	0,489	0,467	0,2021
3	0,715	0,512	0,480	0,1997
4	0,756	0,571	<b>0,533</b>	<b>0,1893</b>
5	0,761	0,579	0,531	0,1897
6	0,762	0,580	0,522	0,1915
7	0,762	0,581	0,511	0,1936

1. Ennustavat muuttujat: Eroosio

2. Ennustavat muuttujat: Eroosio, vesipitoisuus

3. Ennustavat muuttujat: Eroosio, vesipitoisuus, K<sub>r</sub>

4. Ennustavat muuttujat: Eroosio, vesipitoisuus, K<sub>r</sub>, kiillemäärä

5. Ennustavat muuttujat: Eroosio, vesipitoisuus, K<sub>r</sub>, kiillemäärä, d<sub>60</sub>/d<sub>10</sub>

6. Ennustavat muuttujat: Eroosio, vesipitoisuus, K<sub>r</sub>, kiillemäärä, d<sub>60</sub>/d<sub>10</sub>, ominaispinta-ala

7. Ennustavat muuttujat: Eroosio, vesipitoisuus, K<sub>r</sub>, kiillemäärä, d<sub>60</sub>/d<sub>10</sub>, ominaispinta-ala, hienoaines

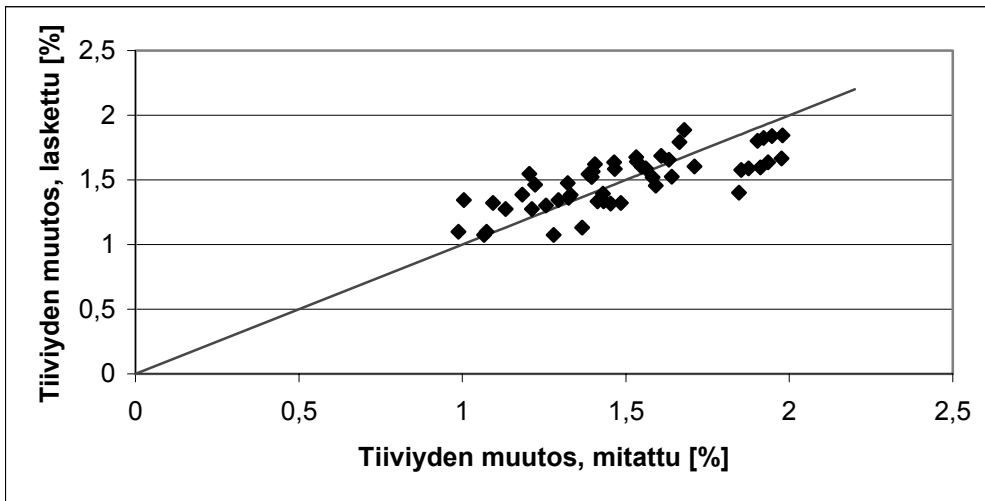
$$\Delta D = 0,856 + 0,803 \cdot \text{Eroosio} + 0,101 \cdot w + 0,109 \cdot K_r - 0,0117 \cdot \text{kiillemäärä} \quad (4-5)$$

Taulukko 10. Parametrien suhteellinen vaikutus kaavassa (4-5).

Parametri	Eroosio	w	K <sub>r</sub>	Kiillemäärä
Parametrin vaikutus [%]	24,3	26,8	28,7	20,2

Deformaatioindeksin laskennassa kaavan (4-3) mukaan 95 %:n luotettavuudella tarkkuus on ±0,380. Luotettavuuden ollessa 80 %, tarkkuus on ±0,246. Koska mitatut tulokset olivat kokonaisuudessaan välillä 1-2, niin saatu tarkkuus on pieni ollen kuitenkin kaavan (4-3) tarkkuutta hiukan suurempi. Kaava antaa suuntaa antavia tuloksia deformaatioindeksistä.

Lisäksi sovitettiin yhtälön (4-4) mukaista käyrää parametreille aivan kuten oli tehty mallinnettaessa sepeli-%:n kanssa. Huomattavaa parannusta ei funktiolle löytynyt.



Kuva 8. Kaavalla (4-5) lasketut deformaatioindeksit mitattujen deformaatioindeksien funktiona.

Lisäksi tehtiin mallinnus myös ilman eroosiokriteeriä. Regressioanalyysin perusteella parametrien vaikuttavuus järjestykseksi  $K_r$ , vesipitoisuus, ominaispinta-ala, liuskeisuus, kiillemäärä, hienoainesmäärä ja  $d_{60}/d_{10}$ . Taulukossa 11 on esitetty eri regressiomallien yhteenveto. Taulukosta on nähtävissä, että kolmella muuttujalla saavutetaan tulos, jolla tarkistettu  $R^2$  on suurin ja standardivirhe pienin. Siten voidaan havaita, että kolmella parametrilla saavutetaan sellainen tulos, jolla lisäparametrien käyttö voidaan kyseenalaistaa.

Taulukko 11. Regressioanalyysin mallien yhteenveto

Malli	R	$R^2$	Tarkistettu $R^2$	Standardivirhe
1	0,550	0,302	0,278	0,2165
2	0,715	0,512	0,477	0,2226
3	0,733	0,538	<b>0,486</b>	<b>0,2206</b>
4	0,744	0,553	0,484	0,2210
5	0,746	0,557	0,468	0,2244
6	0,748	0,559	0,449	0,2284
7	0,749	0,560	0,427	0,2331

1. Ennustavat muuttujat:  $K_r$

2. Ennustavat muuttujat:  $K_r$  ja vesipitoisuus

3. Ennustavat muuttujat:  $K_r$ , vesipitoisuus ja ominaispinta-ala

4. Ennustavat muuttujat:  $K_r$ , vesipitoisuus, ominaispinta-ala ja liuskeisuus

5. Ennustavat muuttujat:  $K_r$ , vesipitoisuus, ominaispinta-ala, liuskeisuus ja kiillemäärä

6. Ennustavat muuttujat:  $K_r$ , vesipitoisuus, ominaispinta-ala, liuskeisuus, kiillemäärä ja hienoaines

7. Ennustavat muuttujat:  $K_r$ , vesipitoisuus, ominaispinta-ala, liuskeisuus, kiillemäärä, hienoaines ja  $d_{60}/d_{10}$

Regressioanalyysi antoi deformaatioindeksiä kuvaavaksi yhtälöksi  $K_r$ , vesipitoisuuden ja ominaispinta-alan suhteen kaavan (4-6) mukaisen yhtälön. Eri parametrien vaikutus malliin on esitetty taulukossa 12. Kaavalla lasket-

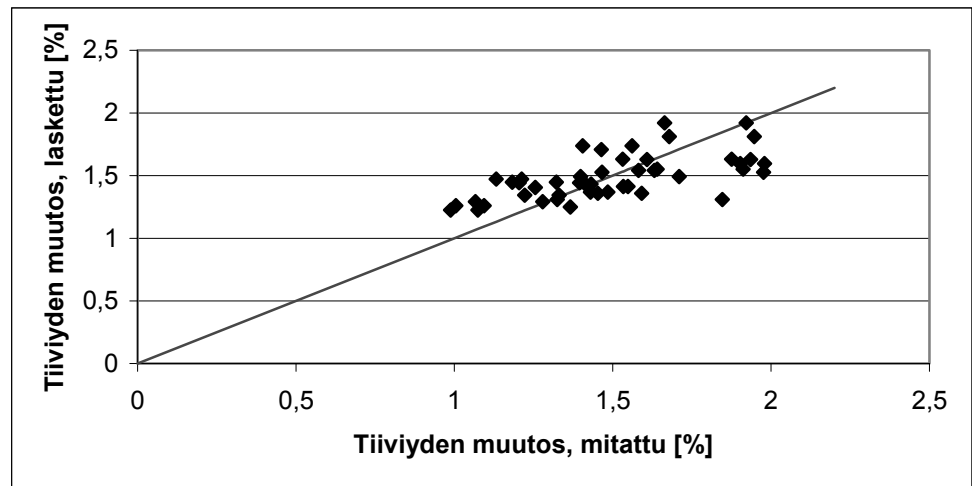
tujen deformaatioindeksille saadut tulokset mitattujen tulosten funktiona on esitetty kuvassa 9.

$$\Delta D = 0,8475 + 0,1363 \cdot K_r + 0,0914 \cdot w + 0,0081 \cdot \text{Ominaispinta-ala} \quad (4-6)$$

Taulukko 12. Parametrien suhteellinen vaikutus kaavassa (4-6).

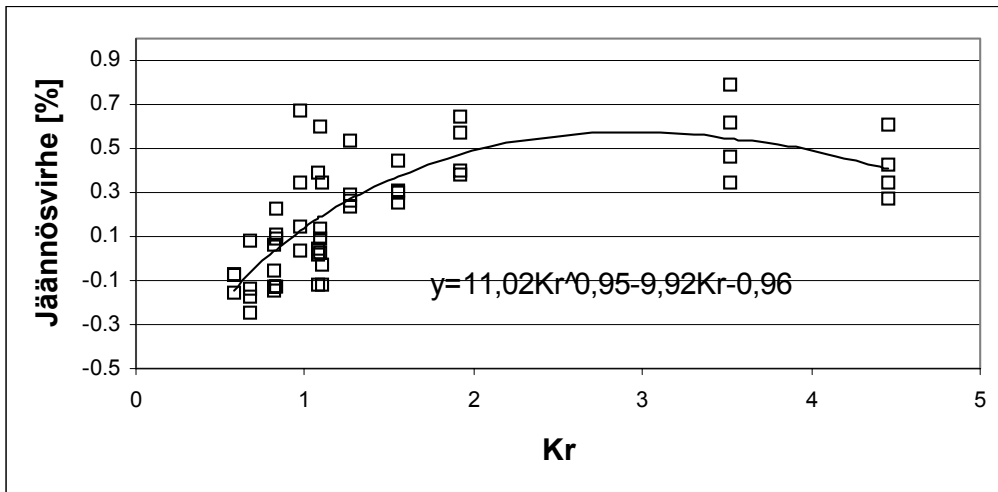
Parametri	$K_r$	w	Op-ala
Parametrin vaikutus [%]	48,3	37,7	14,0

Deformaatioindeksin laskennassa kaavan 4-6 avulla 95 %:n luotettavuudella tarkkuus on  $\pm 0,443$ . Luotettavuuden ollessa 80 %, tarkkuus on  $\pm 0,287$ . Lasketuista kaavoista tämän kaavan tarkkuus on selkeästi heikoin.



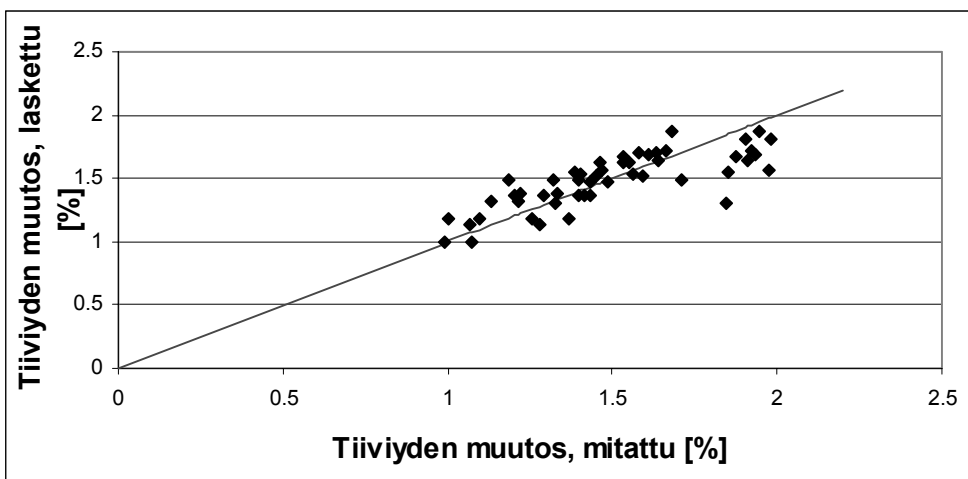
Kuva 9. Kaavalla (4-6) lasketut deformaatioindeksit mitattujen deformaatioindeksien funktiona.

Lisäksi sovitettiin yhtälön (4-4) mukaista käyrää parametreille aivan kuten oli tehty mallinnettaessa sepeli-%:n kanssa.  $K_r$ :n arvoille virheeseen nähden löytyi mallia hyvin korjaava yhtälö, joka on esitetty kuvassa 10. Siten uudeksi funktioksi kolmelle parametrille tuli tiiviyden muutokselle kaavan (4-7) mukainen funktio. Kaavalla saatujen tulosten vastaavuus todellisiin tuloksiin on esitetty kuvassa 11. Saadun yhtälön virheet on esitetty taulukossa 13 ja parametrien suhteellinen vaikutus saatuun kaavaan on esitetty taulukossa 14.



Kuva 10.  $K_r$ -funktiolle jääneet jäännösvirheet ja sille sovitettu funktio.

$$\Delta D = -0,11 + 11 * K_r^{0,95} - 9,92 * K_r + 0,0914 * w + 0,0082 * \text{Ominaispinta-ala} \quad (4-7)$$



Kuva 11. Kaavalla (4-7) lasketut deformaatioindeksit mitattujen deformaatioindeksien funktiona.

Taulukko 13. Regressioanalyysin yhteenveto

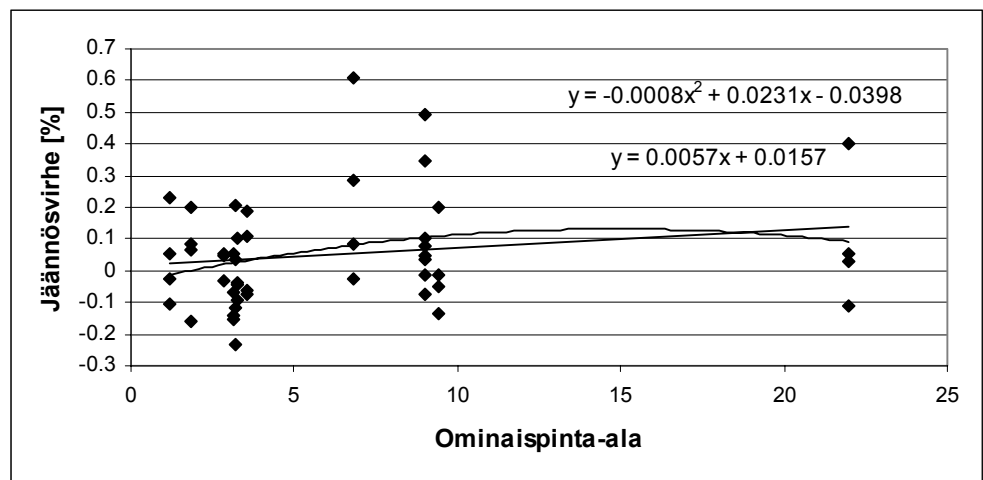
R	$R^2$	Adjusted $R^2$	Arvion standardivirhe
0,761	0,579	0,578	0,1785

Taulukko 14. Parametrien suhteellinen vaikutus kaavassa (4-7).

Parametri	$K_r$	w %	Op-ala
Parametrin vaikutus [%]	58,0	33,9	8,1

Deformaatioindeksin laskennassa kaavalla (4-7) laskettaessa deformaatioindeksiä 95 %:n luotettavuudella tarkkuus on  $\pm 0,359$ . Luotettavuuden ollessa 80 %, tarkkuus on  $\pm 0,232$ . Kaava antaa tarkimman tuloksen ollen kuitenkin vain suuntaa antava deformaatioindeksin suhteen. Selkeä etu muihin kaavoihin nähden on se, että kaavan parametrit ovat yleisimmin käytettyjä parametrejä ja helpoimmin määriteltävissä.

Lisäksi koetettiin  $K_r$ -funktiolle jääneen jäännösvirheen korjaamisen jälkeen myös ominaispinta-alalle jäännösvirhekorjausta. Kuvasta 12 on nähtävissä, ettei funktiomuodon korjauksella saavuteta huomattavaa etua.

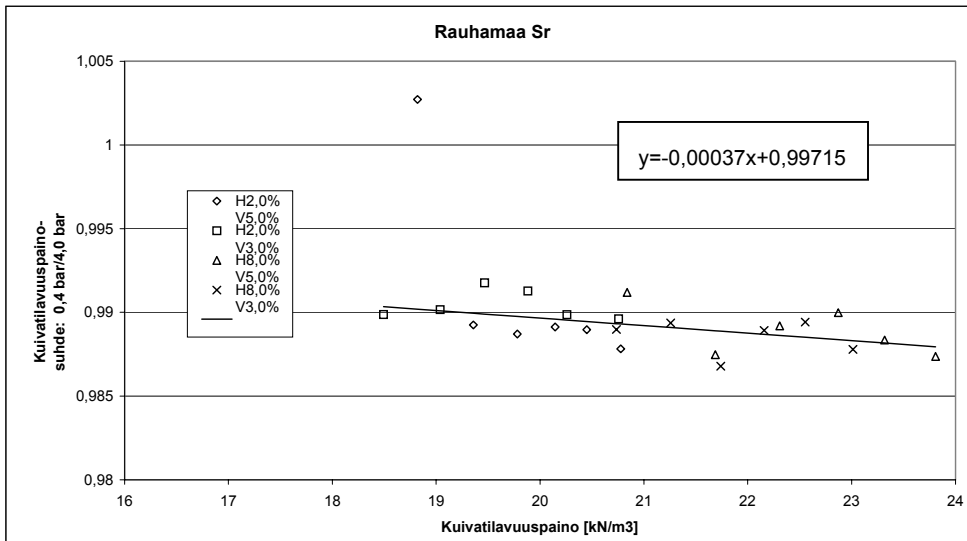


Kuva 12. Sovitusfunktio ominaispinta-alalle  $K_r$ -funktion jäännösvirheen korjaamisen jälkeen.

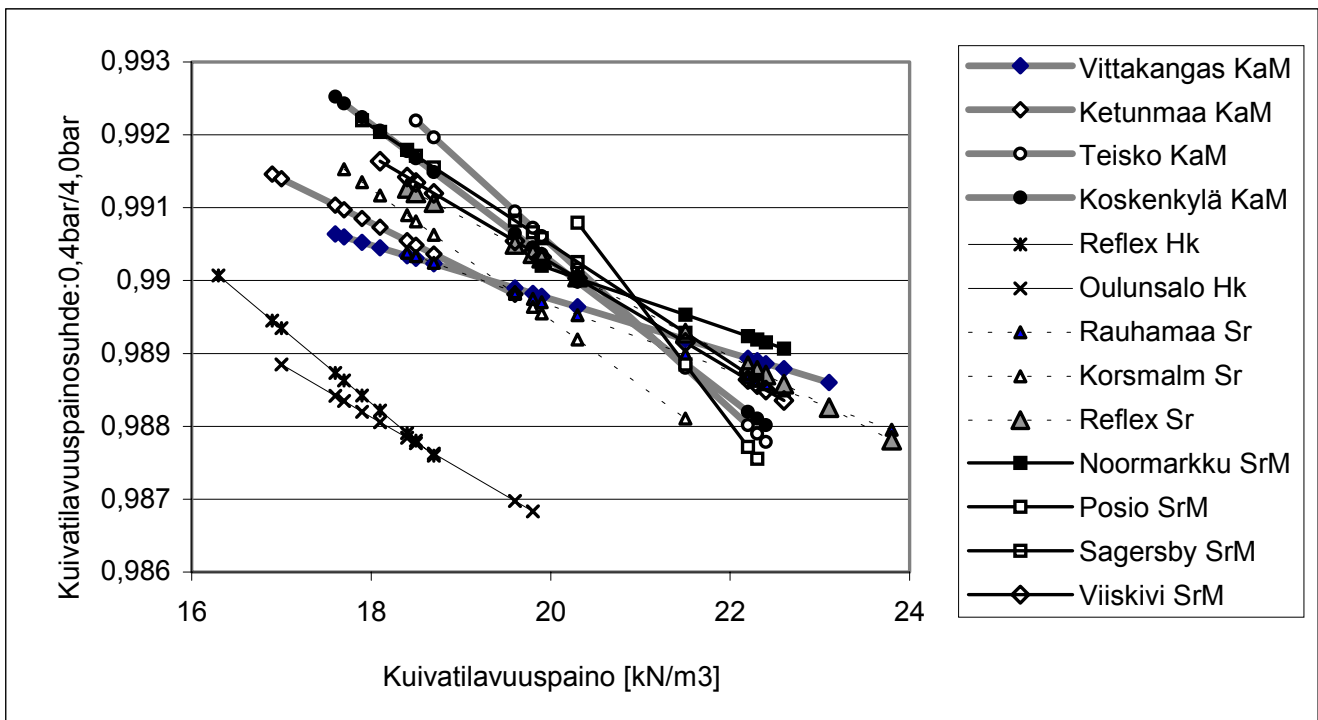
### 4.3 Pysyvät muodonmuutokset palautumiskokeella

Pysyvien muodonmuutosten selvittämiseksi tehtiin ICT-koe tavallisuudesta poiketen vaiheittain siten, että jokaisen vaiheen lopussa laskettiin työpaine 0,4 bar:iin. Lasketun paineen ja työpaineen kuivatilavuuspainojen suhde laskettiin. Näin saaduille kuivatilavuuspainosuhteille sovitettiin suorat (kuva 13).

Kaikille materiaaleille sovitettujen suorien parametrit on esitetty taulukossa 15. Suorat ovat kuvassa 14. Kuvasta ja taulukosta voidaan havaita, että tämän tutkimuksen hiekkamaalajit ovat poikkeuksellisen kimmoisia. Näiden kuivatilavuuspaino muuttuu voimakkaasti, kun päästetään työpaine.



Kuva 13. Alennetun paineen ja työpaineen alaisen näytteen kuivatilavuuspainosuhteet ja suoran sovitus Rauhamaa Sr:lle.



Kuva 14. Alennetun paineen ja työpaineen alaisen näytteen kuivatilavuuspainosuhteet.

Toisaalta voidaan havaita Posio SrM:n kulmakertoimen kuivatilavuuspainosuhteen olevan voimakas muihin vastaaviin suoriin nähden. Suorista kokonaisuutena on nähtävissä se, että kuivatilavuuspainon kasvaessa kimmoisuus lisääntyy. Kuitenkin siten, että kimmoisuuden kasvu vähitellen laantuu, eikä ole tiivistymisen lisääntyessä enää niin voimakasta. Sellin ja maainesten välinen kitka voi selittää palautuman kasvun kuivatilavuuspainon kasvaessa. Palauttava voima kasvaa kuivatilavuuspainon kasvaessa ja sa-

malla kitkan ylittävä voima kasvaa. Siten on loogista, että sellissä oleva maa-aines ei palaudu täysimääräisesti kuivatilavuuspainon ollessa alhainen.

*Taulukko 15. Kuivatilavuuspainosuhteille laskettujen sovitusfunktioiden parametrit.*

Materiaali	y=ax+b	
	a	b
Reflex Hk	-0,00103	1,00686
Oulunsalo Hk	-0,00072	1,00109
Rauhamaa Sr	-0,00045	0,99866
Reflex Sr	-0,00064	1,00304
Korsmalm Sr	-0,00090	1,00746
Posio SrM	-0,00162	1,02368
Noormarkku SrM	-0,00042	0,99856
Viiskivi SrM	-0,00073	1,00485
Sagersby SrM	-0,00082	1,00670
Vittakangas KaM	-0,00037	0,99715
Teisko KaM	-0,00113	1,01310
Koskenkylä KaM	-0,00094	1,00907
Ketunmaa KaM	-0,00061	1,00177

Johtopäätöksistä voidaan todeta, ettei edellä esitettyä, palautumiseen perustuvaa menettelyä eri materiaalien deformaatioindeksin luomiseksi, ole muodostettavissa. Kuvassa 1 esitetty työhypoteesi tulee siten hylätyksi.

## 5 DEFORMAATIOINDEKSI

### 5.1 Eri materiaalien luokitteluperusteet

Tehtyjen kokeiden perusteella deformaatioindeksi jaettiin neljään luokkaan: erinomainen, hyvä, tyydyttävä ja huono. Luokkia arvoitettiin alustavasti, niin että kahteen parhaimpaan kuuluisi 20 + 20 % tuloksista ja kahteen alempaan luokkaan 30 + 30 % tuloksista. Tällä perusteella erinomaiseen luokkaan kuuluisi kaikki materiaalit, joiden deformaatioindeksi oli alle 1,25 %, hyvään luokkaan materiaalit, joiden deformaatioindeksi oli 1,25 – 1,40 %. Tyydyttävään luokkaan kuuluvat materiaalit, joiden deformaatioindeksi oli 1,40 – 1,60 % ja huonoon luokkaan materiaalit, joiden deformaatioindeksi oli yli 1,60 %.

*Taulukko 16. Materiaalien luokittelu deformaatioindeksin suhteen.*

Materiaaliluokitus	Deformaatioindeksi
Erinomainen	alle 1,25
Hyvä	1,25 – 1,40
Tyydyttävä	1,40 – 1,60
Huono	yli 1,60

Arvostusasteikko erinomaisesta huonoon on rajallisen aineiston takia ainoastaan tämän aineiston sisäinen asteikko. Todellisiin tierakenteissa käytettyihin kantavan kerroksen materiaaleihin nähden tässä tutkimuksessa saattaa olla puutteita. Siten tässä tutkimuksessa esitettyä deformaatioindeksin arvottamista voidaan pitää enintään suuntaa-antavana.

### 5.2 Tiivistystyömäärän vaikutus deformaatioon

Tässä tutkimuksessa deformaatioindeksille laskettiin arvoja noin 92 %:n tiiviudessa. Luonnollisesti tiiviys vaikuttaa deformaatioherkkyyteen. Teknista-taloudellisessa tarkastelussa tehdyllä tiivistystyömäärällä tulokseen on merkitystä. Siksi ICT-laitteelle etsittiin myös tiivistystyömäärän funktiona deformaatioindeksi.

Työmääränä on käytetty ICT-laitteen työ kierroksia (taulukko 17). Deformaatioindeksi on laskettu kaavasta 4-2. Taulukon arvoista on nähtävissä, että työmäärän kymmenkertaistaminen vähentää deformaatioindeksiä 6,2 - 8,6 %:iin. Selvästi on nähtävissä ICT-laitteen sellin vaikutus indeksiin. Todellisessa maarakenteessa tietyn kohdan jatkuva tiivistäminen yleensä johtaa myös löyhtymiseen tiivistyskohdan vierellä dilataatioleikkauksesta johtuen, joten ICT-laitteella saatu tiivistystyömäärän vaikutus materiaalin deformaatioon ei täysin vastaa todellisuutta.

Taulukosta on myös havaittavissa, että sama deformaatioindeksi saavutetaan eri materiaaleilla eri työmäärillä. PSrM:ää täytyy tiivistää n. 11 työ kier-



rosta ja VSrM:ää n. 17 työkierrosta saman deformaatioindeksin saavuttamiseksi.

Sellin seinien vaikutuksen arvioimiseksi deformaatioindeksiin, laskettiin normalisoitu suhdeluku työmäärän suhteen. Viiden työkierroksen suhteen laskettiin muille työkierrosmäärille suhdeluku, joka on kaavan (5-1) muotoa.

$$S = D_i / D_5 \cdot N / 5 \quad (5-1)$$

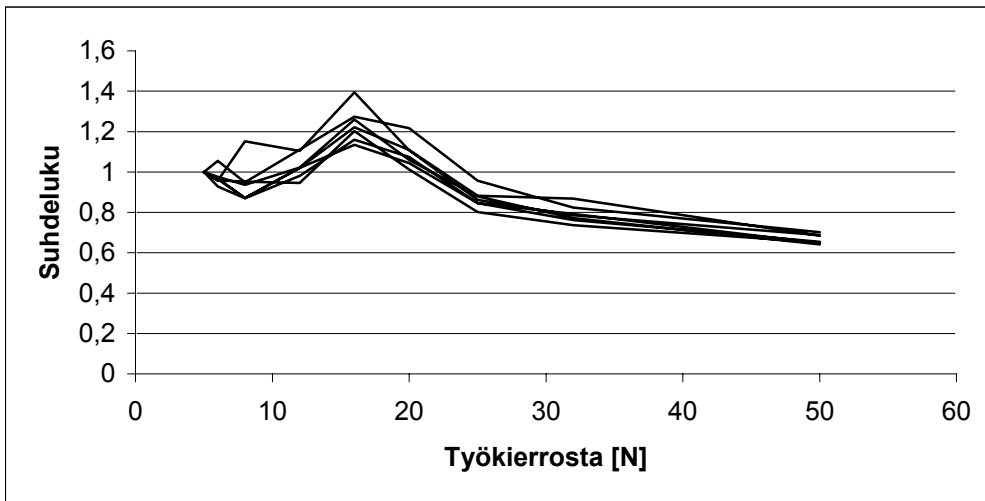
S	Suhdeluku sellin seinien vaikutuksen arvioimiseksi
$D_i$	Deformaatioindeksi työkierroksella i
$D_5$	Deformaatioindeksi työkierroksella 5
$N_i$	Työkierrosten lukumäärä työkierroksella i

Taulukko 17. Tiivistysmäärän vaikutus deformaatioindeksiin.

Työmäärä [N]	Materiaalikohtainen deformaatioindeksi						
	RHk w5h15	RaSr w5h2	OHk w5h1	PSrM w5h8	VSrM w5h2	KoKaM w5h3	TKaM w5h3
5	2.07	1.99	1.86	1.67	1.91	2.23	2.44
6	1.67	1.58	1.49	1.37	1.70	1.88	1.99
8	1.13	1.17	1.11	0.96	1.31	1.52	1.56
12	0.88	0.86	0.73	0.69	1.08	1.01	1.09
16	0.74	0.71	0.70	0.63	1.04	1.01	0.84
20	0.54	0.50	0.47	0.47	0.65	0.64	0.67
25	0.35	0.34	0.30	0.30	0.45	0.45	0.50
32	0.26	0.22	0.21	0.22	0.33	0.33	0.32
50	0.13	0.12	0.12	0.12	0.17	0.17	0.21

Saatu suhdeluku työmäärän suhteen (Kuva 15) osoittaa, että sellin seinien vaikutus on vähäinen 20 työkierrokseen asti. Tämän työmäärän jälkeen on havaittavissa loivaa suhdeluvun vähenemistä, joka siis indikoi sellin seinien vaikutusta tiivistykseen. Vastaava huippu on havaittavissa myös muilla materiaaleilla kuin hiekoilla.

Suhdeluvun lasku voi merkitä sitä, että saadut deformaatioindeksin tulokset 20 työkierroksen jälkeen ovat liian pieniä. Siten todellinen deformaatioindeksi maarakenteessa, ilman jäykkää teräsvaippaa ympärillä, olisikin deformaatioindeksi jaettuna suhdeluvulla. Tähän ei kuitenkaan ole varmuutta koska tarkkaa käyttäytymismallia maamateriaalille sellissä ei ole ICT-työkierrosten vaikutuksesta.



Kuva 15. Deformaatioindeksin kehitys hiekoilla normalisoituna työmäärän suhteen.

## 6 DEFORMAATIOINDEKSIN VASTAAVUUS

### 6.1 TKT-laitteella tehdyt kokeet

Oulussa tehdyissä TKT-kokeissa olivat kantavan kerroksen materiaaleina Vittakankaan ja Ketunmaan kalliomurskeet. Vertailua varten laskettiin taulukkoon 18 hienoainesmäärältään ja kosteudeltaan samanlaisten materiaalien suhteellisten kokoonpuristumien suhteet ja verrattiin saatuja tuloksia ICT-kokeen tuloksiin. Vastaavat ICT-kokeen suhdeluvut on laskettu taulukkoon 19.

Taulukko 18. TKT-koetuloksista laskettu suhdeluku.

Materiaali	Läpäisy # 0,063 [%]	Kosteus [%]	Suhteellinen kokoonpuristuma Kuormitusten lkm		Kokoonpuristusta laskettu vastaavien näytteiden suhdeluku	
			2000 [µm/m]	6000 [µm/m]		
Ketunmaa	4,5	4,5	4262	4175		
Vittakangas	4,5	4,5	5303	5707	0,804	0,732
Ketunmaa	5,4	5,25	3772	3599		
Vittakangas	5,4	5,25	5406		0,698	
Ketunmaa	6,4	6,0	4408			
Vittakangas	6,4	6,0	4957		0,889	
Ketunmaa	4,5	3,0	4209	4195		
Vittakangas	4,5	3,0	5281	4965	0,797	0,845
					ka	0,794

Taulukko 19. ICT-kokeista laskettu suhdeluku.

Materiaali	Läpäisy #0,063 [%]	Kosteus [%]	Muodonmuutos kierroksilla 8-12 [%]	Suhdeluku
Vittakangas	8	5	1,92	0,849
Ketunmaa	6	3	1,59	
Vittakangas	8	3	1,40 (?)	1,132*
Ketunmaa	0	5	1,58	
Vittakangas	4	5	1,66	0,950
Ketunmaa	0	3	1,45	
Vittakangas	4	3	1,56	0,873
			ka	0,891

\* ei ole käytetty keskiarvon laskentaan, koska poikkeaa huomattavasti muista ja aiheutuu ilmeisesti yksittäisen kokeen tuloksesta, joka ei ole sopusoinnussa muiden tulosten kanssa

TKT-laitteella tehtyjen kokeiden vertailuarvot vaihtelivat välillä 0,698 – 0,889 keskiarvon ollessa 0,794. Vastaavat lukemat ICT-laitteella ovat 0,849 – 0,950 ja keskiarvo 0,891. Tämän perusteella ICT-laite antaa samansuuntaisia tuloksia kuin TKT-laite mutta saadut erot ovat vähäisempiä.

## 6.2 Tierakenteessa olleet materiaalit

TPPT-tutkimuksessa ja myös tässä tutkimuksessa olivat näytteinä Posion ja Noormarkun soramurskeet. Posiolla sijainneen TPPT-tarkkailukohteen vuosittainen KKL oli 26430 ja siitä laskettu asfalttikerroksen iän perusteella (22 vuotta) laskettu kumulatiivinen kuormituskertaluku KKL-kum oli 581460. Ura syvyys oli 100 metrin matkalla keskimäärin 5,1 mm ja harjanteen korkeus keskimäärin 8,2 mm. Urasyvyydelle ja harjanteen korkeudelle laskettiin suhdeluku KKL-kum –luvun suhteen. Tämä suhdeluku oli urasyvyydelle 0,0088 ja harjanteen korkeudelle 0,0141 mm/1000\*KKL-kum. Noormarkun kohteen vastaavat lukemat olivat KKL 11424, KKL-kum 159936 (14 vuotta), urasyvyys 5,4 mm, harjanteen korkeus 8,4 ja suhdeluku urasyvyydelle 0,0337 ja harjanteen korkeudelle 0,0525 mm/1000\*KKL-kum. Noormarkun urasyvyyden kehittymisnopeus suhteutettuna kuormitukseen on lähes 3,8 kertainen ja harjanteen kehittymisnopeus 3,7 kertainen Posion kohteeseen verrattuna.

Vertailtaessa ICT-kokeen tuloksia Posiosta ja Noormarkusta otettujen näytteiden suhteen havaitaan, että Posiosta otettu näyte puristuu kasaan karkeasti sanottuna yhtä nopeasti kuin Noormarkusta otettu näyte. Suhdeluku vaihtelee näytteestä riippuen välillä 0,903 – 1,069 keskiarvon ollessa 1,004. Tämä tulos ei siis vahvista ICT-kokeen vertailukelpoisuutta. Erot kuitenkin voivat johtua erittäin monesta syystä. Ne voivat johtua esim. rakenne-eroista tai pohjamaan erilaisuudesta kohteissa. Tällä tuloksella ei ole suurta vaikutusta arvioitaessa ICT-laitteen mahdollisuuksia materiaalitutkimuksessa.

## 6.3 Vertailua tierakennehavaintojen sekä TKT- ja HVS-laittehavaintojen kesken

ICT-kokeen vertailukelpoisuutta arvioitiin myös muuttamalla vertailuaineisto vuosittaiseksi urasyvyyden kehitykseksi. Aineiston lähtökohtana oli muuttaa urasyvyydet vastaamaan 22 000 KKL. Päällysteen jäykkyydestä aiheutuvat muutokset normalisoitiin muuttamalla tulokset vastaamaan PAB-V päällysteen jäykkyyksiä. Kevät- ja kesäkantavuuden sekä lämpötilaolosuhteet muutettiin vastaamaan Oulun seudun olosuhteita.

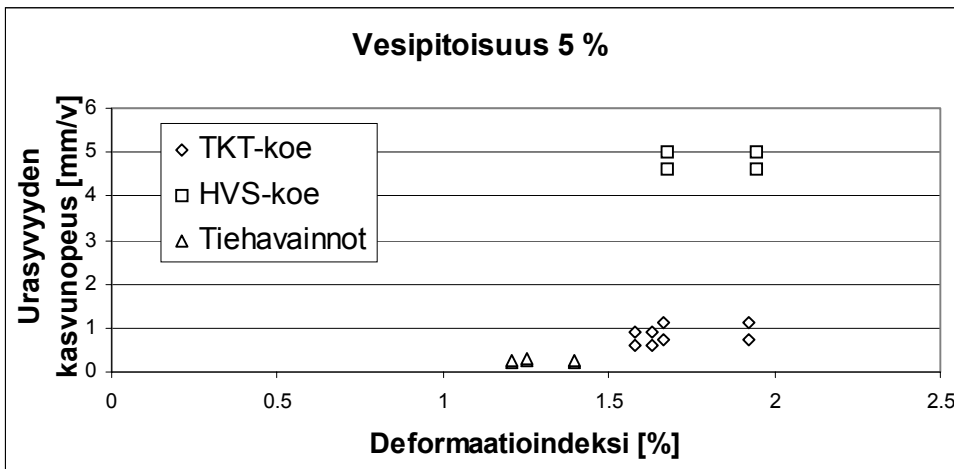
Vittakankaan ja Ketunmaan kalliomurskeista tehdyt tulokset muutettiin Oulun Yliopiston menetelmällä. Menetelmässä muutetaan TKT-laitteella saadut tulokset suoraan kertoimien avulla vastaamaan edellä kuvattua tilannetta. Vittakangas KaM urasyvyyskehitykseksi saatiin edellä mainituilla edellytyksillä 0,75 – 1,12 mm/v ja Ketunmaa KaM 0,59 – 0,89 mm/v.

Posiossa olevan tien olosuhteet vastaavat hyvin edellä mainittuja kriteerejä. Harjanteen korkeus oli 14 vuoden kuluessa lisääntynyt 8,2 mm. Kun tuloksesta vähennetään alkutiivistymisen ja päällysteen yleisestä harjanteesta johtuva muutos (yhteensä 5 mm), niin lopullinen vuosittainen muutosvauhti on 0,23 mm/v.

Noormarkussa sijaitsevan tien harjanteen kehitys 22 vuoden aikana oli ollut 8,4 mm. Tien päällyste on AB, joten siksi tien jäykkyudesta johtuen arvioitiin urasyvyyden kehitys 0,75 kertaiseksi PAB-V:hen nähden. KKL on Noormarkussa 11 400. Koska KKL:n vaikutus tierakenteeseen ei ole lineaarinen, niin vuosittaisen harjanteen kehityksen arvioitiin olevan 0,75 kertainen tällä KKL:n arvolla. Noormarkussa kevätkantavuusajanjakso on lyhyempi, mutta sulan ajan pituus on pidempi verrattuna Posion ja Oulun olosuhteisiin nähden. Näiden yhteisvaikutus arvioitiin ja todettiin, että harjanteen kehitys on 0,93 kertainen Oulun olosuhteisiin nähden. Siten lopulliseksi harjanteen kehitysnopeudeksi saatiin 0,30 mm/v.

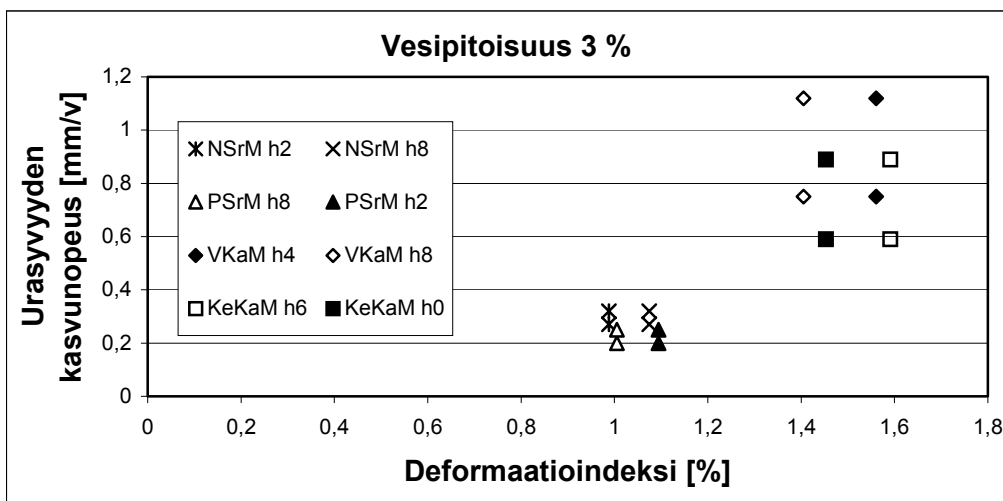
HVS-laitteen urasyvyyden kehitystä nk. Referenssi Reflex-rakenteessa arvioitiin neljännän potenssin säännöllä. Siten paripyörän 60 kN kuormalla 50 kN kuormaksi muutettuna yhden ylityskerran aiheuttama KKL oli  $(60/50)^4=2,07$ . Tästäkin kokeesta poistettiin alkutiivistymisen aiheuttama muutos urasyvyydessä. Siten kokonaisrakenteen, jossa kantavakerros on rakennettu Teisko KaM:sta, urasyvyyden kehitys on 4,80 mm/v.

Kuvassa 16 on esitetty edellä lasketut urasyvyyden kehitykset deformaatioindeksin funktiona. HVS-laitteella tehty tulos on selkeästi eri luokkaa kuin muut tulokset. HVS-laitteella saatuun erityisen isoon tulokseen ovat voineet vaikuttaa seuraavat tekijät. Paripyörä ylittää koerakenteen huomattavan alhaisella nopeudella. Rakenteeseen, jonka pintakerros on viskoelastinen, vaikuttaa hidas kuormitus voimakkaammin kuin nopea liikennekuormitus. Neljännän potenssin sääntö arvioi kuormituskertaluvun vaikutuksia uramuodostukseen hyvin silloin, kun rakenteen varmuus murtumista vastaan on kuormitukseen nähden suuri. HVS-laitteella tehtyihin kokeisiin oli valittu erityisen huonolaatuisia materiaaleja kantavaksi- ja jakavaksi kerrokseksi. Siten on mahdollista, että rakenne kokonaisuudessaan on käytetyillä kuormituksilla varmuuskertoimeltaan alhainen. Siten on myöskin selitettävissä urasyvyyden nopea kehittyminen.

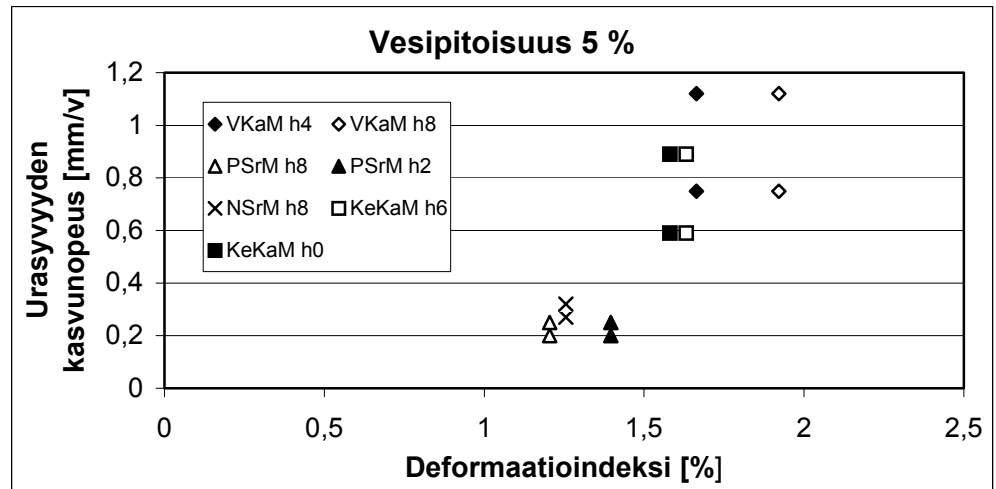


Kuva 16. Urasyvyyden kasvunopeus kappaleen 6.3 alussa määritellyissä olosuhteissa deformaatioindeksin funktiona

Kuvissa 17 ja 18 on esitetty urasyvyyden kehitys deformaatioindeksin funktiona ilman HVS-laitteella tehtyjä havaintoja. Yhteys deformaatioindeksin ja urasyvyyden kehityksen välillä on näillä materiaaleilla havaittavissa. Deformaatioherkkyys kasvaa tämän perusteella jopa kolminkertaiseksi deformaatioindeksin kasvaessa 1,5 kertaiseksi. Aineiston vähäisyyden ja urasyvyyden arvioinnista johtuvien karkeiden yleistysten takia deformaatioindeksin välinen yhteys urasyvyyden kasvuun nähden on kuitenkin varsin epätarkka. Laajemmalla aineistolla tutkittaessa deformaatioindeksin kasvaessa esim. 1,5 kertaiseksi saattaa kasvattaa urasyvyyden kehitystä vain esim. kaksinkertaiseksi.



Kuva 17. Urasyvyyden kasvunopeus kappaleen 6.3 alussa määritellyissä olosuhteissa deformaatioindeksin funktiona.



Kuva 18. Urasyvyyden kasvunopeus kappaleen 6.3 alussa määritellyissä olosuhteissa deformaatioindeksin funktiona.

## 6.4 Geologisten kuvausten vertailua ICT-kokeeseen nähden

### 6.4.1 Teiskon kalliomurske

#### Mineraalit:

Plagioklaasi	48 %	Sarvivälke	Yhteensä 2 %
Kvartsi	26 %	Serisiitti	
Kalimaasälpä	17 %	Kloriitti	
Biotiitti	7 %	Zirkoni	

#### Plagioklaasi:

Plagioklaasirakenteet ovat puolittain kidemuotoisia liistakkeita. Raekoko vaihtelee 0,4 - 6,0 mm ollen keskimäärin 2,5 mm. Plagioklaasin reunat ovat lahdelmaisia. Plagioklaasissa on lamellilaskostusta ja vyöhykkeellisyttä. Plagioklaasin koostumus on oligoklaasinen (anortiittipitoisuus n. 11 %). Plagioklaasikiteet ovat usein keskiosistaan serisiittiytyneet (5 - 15%), reunaosiltaan ne ovat terveempiä. Usein kuitenkin reunaosat ovat muuttuneet kalimaasälväksi. Satunnaisesti plagioklaasi on muuttunut epidootiksi.

#### Kvartsi:

Raekoko vaihtelee 0,4 – 5,0 mm. Rakeet ovat vierasmuotoisia ja sammuvat voimakkaasti unduloiden. Muodostaa paikoin myrmekiittistä rakennetta.

#### Kalimaasälpä:

Suurin osa kalimaasälvästä on plagioklaasin muuttumistulosta. Kalimaasälvässä on lamelli- ja ristikkokaksostusta. Paikoitellen on pertiittiliekejä.

### Biotiitti:

Biotiitti näyttäisi olevan suurimmaksi osaksi sarvivälkkeen muuttumistulosta. Biotiitti esiintyy sarvivälkkeen kanssa repaleisina raeryppäinä.

### Aksessorit:

Sarvivälke on osittain muuttunut biotiitiksi ja satunnaisesti kloriitiksi. Muskoviitti on plagioklaasin muuttumistuloksena serisiittinä. Zirkonirakeita ympäröi sarvivälkkeessä ja biotiitistä tumma kehä.

### Rakenne:

Rakenteeltaan kivi on hypidiomorfinen, heikosti suuntautunut. Kiteiden pinnat ovat pääasiassa lahdelmaisia. Kivessä on muutamia mikrorakoja. Osa mikroraoista on avonaisia, osassa on rakotäytteenä kiillettä. Raot noudattavat osittain mineraalien lohkorakosuuntia.

Los Angeles –luku 24,0  
Kuulamylyarvo 11,6  
Pistekuornitusindeksi 10,4  
Hioutuvuus 1,6 – 1,8  
⇒ lujuusluokka II - III

## **6.4.2 Ketunmaan kalliomurske**

Tielaitos käyttää materiaalia sekä sitomattomaan kantavaan kerrokseen että asfaltteihin. Muun muassa Temmeksen instrumentoidun koetien sitomaton kantava kerros on ko. materiaalia.

Geologi (lyhennetyn) lausunnon perusteella (ohuthieet kairasydännäytteistä) kalliialue muodostuu verrattain homogeenisestä biotiittigraniitista. Päämineraaleina esiintyvät albiittinen plagioklaasi, kalimaasälpä, ja kvartsi. Biotiitin määrä nousee korkeintaan 10%, ja se esiintyy vaihtelevasti kloriittiutuneena. Epidoottia esiintyy joskus biotiitin tilalla. Rautahydroksideja, ilmeisesti götiittiä tai hematiittia kivessä on korkeintaan 10%.

Plagioklaasi on osittain saussuniittiutunutta (serisiitti+epidootti+karbonaatti) ja kalimaasälpä serisiitiksi muuttunutta. Mineraalien kokonaistilavuudesta muuttumistulokset edustavat kuitenkin korkeintaan 5-10%.

Rakenteeltaan tutkitut näytteet ovat hypidiomorfisgranulaarisia ja raekooltaan keskirakeisia (rakeiden keskimääräinen läpimitta 1-2 mm). Suurehkoja, halkaisijaltaan muutaman mm:n kokoisia plagioklaasirakeita esiintyy satunnaisesti.

Läpikotaisesta deformaatiosta tai liuskeisuudesta ei näytteissä ole merkkejä. Epäedullista lohkeavuutta ei näin ollen esiintyne. Sekundäärisiä hematiitiksi-kloriitti-epidootti -juonia näytteissä on jonkin verran, mutta niin vähän, että niillä tuskin on suurta vaikutusta kiven ominaisuuksiin.

Mineralogisista piirteistä kiven rakennusteknisiin ominaisuuksiin vaikuttaa lähinnä raekoko sekä plagioklaasin ja kalimaasälvän muuttuminen. Tutkituissa näytteissä muuttuneisuusaste vaihtelee muutamasta prosentista kor-



keintaan 10 %:iin, joten kokonaisuutena kivet vaikuttavat varsin terveiltä - siis verrattain hyvälaatuiselta graniitilta.

Los Angeles -luku 25.6 - 26.4

Kuulamylyarvo 16.1 - 16.3

⇒ Lujuusluokka IV

### 6.4.3 Alakylän kalliomurske (Vittakangas)

Oulun kaupunki käyttää materiaalia sitomattomaan kantavaan kerrokseen. Materiaalia on käytetty TKT-testien perusmateriaalina.

#### Grauvakka

mineraalikoostumus:	kvartsi	40 %
	biotiiitti	25 %
	plagioklaasi	15 %
	muskoviitti	15 %
lisäksi	kloriitti, opaakki, serisiitti < 5 %	

Kvartsi: vierasmuotoisina, sileäpintaisina 0.2-1 mm rakeina, muuttumaton

Biotiitti: pääosin omamuotoisina liistakkeina, raekoko 0.2-2 mm, muuttumistuloksena hieman serisiittiä ja kloriittia

Plagioklaasi: osittain omamuotoisina 0.2-1 mm kiteinä, muuttumistuloksena hieman serisiittiä

Muskoviitti: biotiitin tavoin

Rakenne: suomuinen (lepidoklastinen), kohtalaisen selvästi suuntautunut, kiillemineraalit aiheuttavat suomuisen rakenteen, mineraalien kontaktipinnat valtaosin sileitä, mistä johtuen hienontuu kohtalaisen herkästi

Rapautuneisuus: kiviaines hyvin vähän muuttunutta

Kivilajityyppi: alkujaan mereen kerrostunutta kvartsi- ja kiillepitoista sedimenttiä, joka vuorijonopimuksessa kiteytyntynyt osittain uudelleen

Muotoarvo (c/a) 3.32, (b/a) 2.11

Hioutuvuus 2.83

Pistekuormitusindeksi 7.4

Kuulamyly 18.3

Lujuusluokka IV

Materiaalin hienonemista testattu ICT-laitteella ja jyräyskokeilla: hienonee varsin paljon. Samoin hienonee TKT-testissä.

### 6.4.4 Luokitus

Päähuomio kolmen tutkitun materiaalin geologisista kuvauksista kiinnittyy pinnan struktuuriin ja materiaalin kovuuteen. Mitä rosoisempi pinta, niin sitä suurempi kitka aiheutuu rakeiden välille. Kuitenkin, jos materiaali on haurasta, niin rakeet rikkoutuvat helposti rasituksessa.

Teisko KaM sisältää runsaasti kovia mutta hauraita mineraaleja. Vaikka näiden mineraalien vaikutuksesta pinnan struktuuri olisikin edullinen deformaation suhteen, niin silti runsaasti hauraita mineraaleja sisältävä Teisko KaM käyttäytyy epäedullisesti tiivistettäessä ja myös valmiina rakenteena. Tästä on runsaasti kokemusta VTT:llä tehdyistä laboratorio- sekä koerakennekokeista. Siten geologinen sekä kokemusperäinen tieto materiaalista tukee deformaatioindeksin antamaa kuvaa materiaalista. Deformaatioindeksin perusteella materiaali on arvoitettu huonoksi (indeksi 1,61 – 1,94 ka 1,79).

Ketunmaa KaM:lla on alhainen lujuusluokka. Kuitenkin etuna Teisko KaM:iin nähden on kiilteen edullinen esiintyminen. Kiillettä esiintyy materiaalissa sillä tavalla, että se antaa materiaalille kovista ja hauraista mineraaleista huolimatta sitkeyttä. Tämä näkyy myös indeksin suuruudessa (indeksi 1,45 – 1,63 ka 1,56), joka on arvotuksessa tyydyttävä mutta lähellä huonon rajaa.

Vittakangas KaM on kivimineraaleiltaan sitkeä mutta pinnaltaan tasainen. Tämä viittaa huonoon materiaaliin. Indeksiksi onkin saatu 1,40 – 1,92 ka 1,64, joka on keskiarvoltaan juuri arvotukseltaan huonon puolella.

## 6.5 SPSS-analyysi

Analyysi nosti neljä tekijää tärkeimmiksi mallin parametreiksi: sepeli-%, vesipitoisuus, eroosioindeksi ja  $K_r$ . Nämä kaikki ovat loogisesti selitettävissä eri materiaalien deformaatioindeksien eroihin nähden.

Mitä suurempi sepeli-%, niin sitä enemmän kiviaineksessa on särmiä. Siten särmiä hioutuvuus kokeen aikana ja rakenteessa lisääntyy. Luonnonmateriaalit ovat jo valmiiksi hioutuneet ja siksi niissä hioutumista ei enää runsaasti tapahdu. Alhaisilla vesipitoisuuksilla vesipitoisuuden kasvu kasvattaa 'voiteluaineen' määrää. Kun kyllästysaste alkaa nousta korkeaksi, niin vedellä on myös tiivistymistä estävä vaikutus. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan saavutettu tätä rajaa. Todellisessa rakenteessa runsas vesipitoisuus kylläkin aiheuttaa kitkan pienenemistä, huokosvedenpaineen kasvusta jne., jotka taas lisäävät deformaatioita. Eroosiokriteeri laskettiin soveltamalla Sherardin menetelmää (Liite 1). Jotta sisäistä eroosiota ei tapahtuisi, tulee raekäyrän muodon olla sellainen, etteivät pienempirakeiset maapartikkelit pääse liikkumaan isompirakeisten maapartikkelien lomitse. Jokaista maapartikkelia pitää olla siis tarpeeksi suhteessa hienompaan fraktioon, ettei sisäistä eroosiota tapahtuisi.  $K_r$ -funktio parametrinä on voimakkaasti samankaltainen kuin eroosiokriteerikin, koska molemmilla on pohjana raekäyrän muoto. Lisäksi on muissa tutkimuksissa todettu, että raekäyrän muodolla on voimakas vaikutus maalajin 'hyvyyteen' rakenne-materiaalina. Siten  $K_r$ -funktio on looginen selittäjä arvioitaessa deformaatioindeksiä.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

### 7.1 Suositus deformaatioindeksin määrittämiseksi

Deformaatioindeksikoe tehdään ICT-kiertotiivistinlaitteella 4 barin työpaineessa ja 17,5 mrad kiertokulmalla. Deformaatioindeksi  $\Delta D$  lasketaan kaavalla (4-2).

$$\Delta D = (\gamma_{12} - \gamma_8) / \gamma_{80} \cdot 100 \quad (4-2) \text{ bis}$$

$\gamma_8$ ,  $\gamma_{12}$  ja  $\gamma_{80}$  kuivatilavuuspaino 8, 12 ja 80 työkerroksen jälkeen

Tehtyjen kokeiden perusteella deformaatioindeksi jaettiin neljään luokkaan: erinomainen, hyvä, tyydyttävä ja huono. Taulukossa 20 on esitetty luokittelurajat deformaatioindeksin suhteen. Taulukon luokittelu on toistaiseksi viitteellinen.

*Taulukko 20. Materiaalien luokittelu deformaatioindeksin suhteen.*

Materiaaliluokitus	Deformaatioindeksi
Erinomainen	alle 1,25
Hyvä	1,25 – 1,40
Tyydyttävä	1,40 – 1,60
Huono	yli 1,60

Deformaatioindeksillä on mahdollista arvottaa eri materiaaleja keskenään. Deformaatioindeksikoe on kuitenkin luonteeltaan nopea. Tämä merkitsee sitä, että kokeella ei voida arvioida pitkällä aikavälillä tapahtuvan rapautumisen vaikutusta deformaatioon. ICT-kokeen rinnalle tarvitaan pitkäaikaisrapautumista arvioivia menetelmiä, jotta materiaalin pitkäaikaiskestävyyttä voidaan arvioida.

Materiaalivalintoja tehdessä suositellaan ennen varsinaisia deformaatioindeksikokeita arvioitavaksi materiaaleja kaavan (4-7) avulla. Kaavan tarkkuus ei kuitenkaan riitä arvottamaan materiaaleja, vaan deformaatioherkkyyden arvottamiseksi tarvitaan varsinainen deformaatioindeksikoe.

$$\Delta D = -0,11 + 11 \cdot K_r^{0,95} - 9,92 \cdot K_r + 0,0914 \cdot w + 0,0082 \cdot \text{Ominaispinta-ala} \quad (4-7) \text{ bis}$$

### 7.2 Jatkotutkimustarve tämän selvityksen perusteella

Tässä selvityksessä luotu deformaatioherkkyyden indeksointimenettely nähdään lupaavana käytettäväksi eri materiaalien vertailumenetelmänä, kun kyse on sitomattomiin rakennekerroksiin syntyvistä deformaatioista. Koska tutkimusaineisto on toistaiseksi ollut varsin rajattu, esitetään, että menetelmän luotettavuuden parantamiseksi tehdään lisäkokeita, joilla ICT-laitteen

deformaatioiden määrittelykykyä voidaan paremmin arvioida. Koska menetelmävertailu olemassa oleviin rakenteisiin on vähäinen, on suositeltavaa, että tutkimusta edelleen jatketaan rinnakkaiskokeilla TKT-laitteella tai -mieluiten - kenttämittauksin. Myös tulevilla HVS-kokeilla VTT:llä ja TKT -kokeilla tulisi rinnakkaiskokeina tehdä kokeita ICT-laitteella aineiston laajentamiseksi.

Laajemmalla verifiointiaineistolla lienee mahdollista muodostaa suoraan yhteys materiaalisen, ICT -laitteella määritetyn deformaatioindeksin ja rakenteessa tapahtuvan deformaation välille. Tällöin indeksiä voitaneen käyttää suoraan materiaalin 'deformaatiokelvollisuuden' mittana ja muodostaa materiaalille myös käyttökelpoinen hyväksymis- ja maksuperuste. Materiaalin pitkäaikaispysyvyys, eli lähinnä rapautumisalttius, tulisi olla skaalattavissa deformaatioiden syntymisen suhteen.

ICT-kokeiden rinnalle suositellaan materiaalien pysyvyyden arvioimiseksi pitkäaikaisrapautumiskokeita. Pitkäaikaisrapautuvuuden testimenetelmien soveltuvuutta ja luokitteluproseduurin muodostamista varten suositellaan lisätutkimuksia. Pohjaksi lisätutkimukselle voidaan ottaa mm.

- VTT:n Betonitekniikan laboratorion rakennuskivien rapautumiskestävyys proseduri
- EN 932-3 Kiviainesten yleisten ominaisuuksien testaus – Osa 3: Yksinkertaistetun petrografisen kuvauksen menettely ja terminologia
- EN 933-8 Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus – Osa 8: Hienoainesten määrittäminen - Hiekkaekvivalenttitesti
- EN 933-9 Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus – Osa 9: Hienoainesten määrittäminen – Metyleenisinitesti
- EN 1367-1 Kiviainesten lämpö- ja rapautuvuusominaisuuksien testaus – Osa 1: Jäädytys-sulatuskestävyyden määrittäminen
- EN 1367-2 Kiviainesten lämpö- ja rapautuvuusominaisuuksien testaus – Osa 2: Magnesiumsulfaattitesti

Rapautumisluokitus ei suoraan kerro, paljonko rapautumisalttiudesta syntyy lisää deformaatioita. Rapautumisalttiusluokitus tulee siksi muuntaa laskennalliseksi ICT -deformaatioindeksin lisäykseksi. ICT-deformaatioindeksin ja rapautumisluokituksesta johdetun lisäyksen yhteenlaskettua tulosta käytetään materiaalisen urautumisnopeuden mittarina. Rapautuminen vaikuttaa deformaatioiden syntyyn - pelkistetysti ajatellen - kahdesta suunnasta: 1) rapautumisen seurauksena materiaalin rakeisuus muuttuu - vrt. kaava (4-7) - ja 2) rapautumisen vaikutuksesta hienoaineksen mineraalikoostumus muuttuu - kiillepitoisissa materiaaleissa hienoaines rikastuu kiilleaineksella. Rapautuvilla materiaaleilla muutos ei tapahdu kerralla vaan pitkällä aikavälillä enemmän tai vähemmän jatkuvana prosessina ja se on otaksuttavissa lineaariseksi ajan suhteen. Hienoaineksen koostumuksen muuttuminen vaikuttaa enemmän kuin pelkästään hienoaineksen määrän lisääntyminen edellyttäisi.

Lisätutkimuksen hypoteesissa ratkaisevaa on se, paljonko hienoaineksen määrästä on kiillettä. Tällöin deformaatioherkkyys olisi tutkittavissa pyörärasituskokeissa, esimerkiksi TKT -kokeissa - syntyvänä deformaationa, kun varioitavana suureena on rakeisuuden hienon pään kiillepitoisuus ja vesipitoisuus. Ratkaistavaksi jää rapautumisen vaikutuksesta syntyvän hienoaineksen lisäys sekä hienoaineksen kiillepitoisuuden lisäys. Lopullinen deformaatioalttiuden määrittäminen olisi siis seuraavanlainen:

1. Määritä rapautumattoman materiaalin  $\#_1$  deformaatioindeksi A
2. Tee materiaalille rapautumiskestävyyskoe, jonka luokituksen perusteella määritä odotettavissa oleva rakeisuuden muutos N vuoden aikana, saat approksimaation rapautuneen materiaalin laskennalliseksi rakeisuudeksi  $\#_2$ . Määritä luokituksen perusteella hienoaineksen kiillepitoisuuden kasvu.
3. Luo näyte rakeisuudelle  $\#_2$ , jossa hienoainesta on korjattu kohdan 2 mukaan saadulla kiillepitoisuuden lisäyksellä. Lisäys tehdään esijauheella muskoviitilla. Määritä näin saadun näytteen deformaatioindeksi B.
4. Määritä lopullinen deformaatioindeksi:  
Deformaatioindeksi =  $A + ((B-A)/N) \cdot \text{käyttöikä}$   
Deformaatioindeksi  $\geq A$

Tutkimusta suositellaan jatkettavan esim. 'vikapuu'-/riskianalyysillä. Tavoitteena on tällöin löytää teknistaloudellinen yhteys tiivistystyömäärän ja rakennekestävyyden välille ICT-laitteella saatavista tuloksista. Tätä varten tulisi tehdä ICT-kokeiden suhteen rinnakkaiskokeita dynaamisella kolmiak-siaalikojeella eri materiaaleilla ja eri tiiviyksissä. Siten päästään tarkemmin käsiksi ICT-laitteen mahdollisuuksista eri materiaalien rakennekestävyyden määrittämiseksi. Lisäksi tarvitaan joko tiivistystyötä kuvaava malli ICT-kokeiden suhteen tai sitten vertailevia tiivistyskokeita todellisella tiivistyskalustolla vertailuna ICT-laitteen tiivistystyön määrittelemiseksi.

Tutkimusta voidaan edelleen laajentaa erilaisen tiivistyskaluston tiivistystyön tehokkuutta arvottavaksi. Eri paineilla ja kiertokulmilla suoritettu tiivistys voisi tuoda lisäselvitystä sille, miten ICT-laitteella voidaan ennustaa eri tiivistyskaluston käyttökelpoisuutta ja työtehoa materiaaliin nähden.

## 8 LÄHDELUETTELO

- /1/ Chapuis, Robert P. Similarity of internal stability criteria for granular soils. Canadian Geotechnical Journal. 29, p 711-713 (1992).
- /2/ Laaksonen, Rainer & Törnqvist, Jouko. ICT-koe maksimikuivatilavuuspainon mittauksessa. Proctorvertailu. VTT, Tutkimusselostus nro TGL 1880, 1991.
- /3/ Belt, Jouko et al. Sitomattoman kantavan kerroksen pysyvät muodonmuutokset / Tiehallinto ; Helsinki : Tielaitos, 2000. - 45 s. + liitel. (Tielaitoksen selvityksiä, ISSN 0788-3722; 60/2000) 3200646

## **9 LIITTEET**

Liite 1: Eroosiokriteerin laskenta

Liite 2: Rakeisuuskäyrät

Liite 3: ICT-koekäyrät

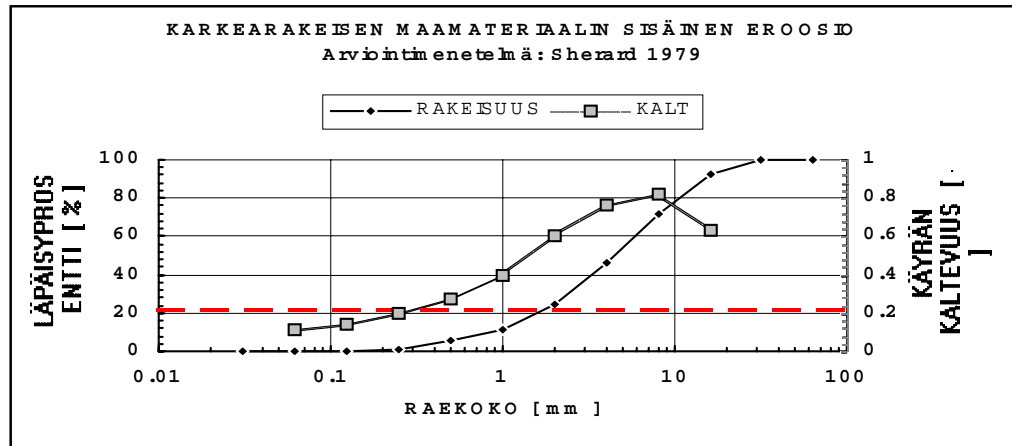
Liite 4: Materiaaliominaisuudet sekä tiiviys 80 kierroksen suhteen





### Liite 1. Eroosiokriteerin laskenta

Sherardin eroosiokriteerillä /1/ laskettiin seulasarjan #32, #16, #8, #4, #2, #1, #0,5, #0,25, #0,125 ja #0,063 perusteella seulottujen materiaalien kaltevuudet eri seulakoille. Kuvassa 1 on esitetty yhden rakeisuuskäyrän eroosiokriteerin laskentatulokset.



Kuva 1. Sherardin eroosiokriteerin laskentatulokset.

Erosioindeksi laskettiin saatujen kaltevuuksien perusteella. Jokainen kaltevuuden arvo, joka oli alle eroosiokriteerin, lisäsi eroosiointiin sen verran mitä kaltevuusravo oli vähemmän kuin Sherardin eroosiokriteeri. Siten kuvan 1 mukainen raekäyrä saa eroosiokriteerikseen arvon 0,202. Taulukossa 1 on laskettu kuvan 1 raekäyrälle eroosiointiin.

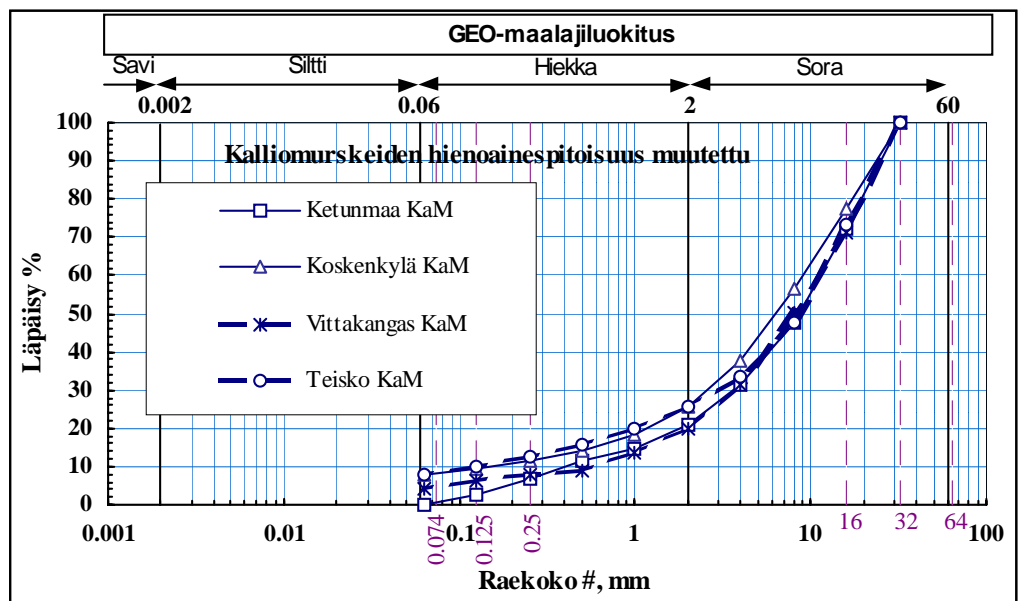
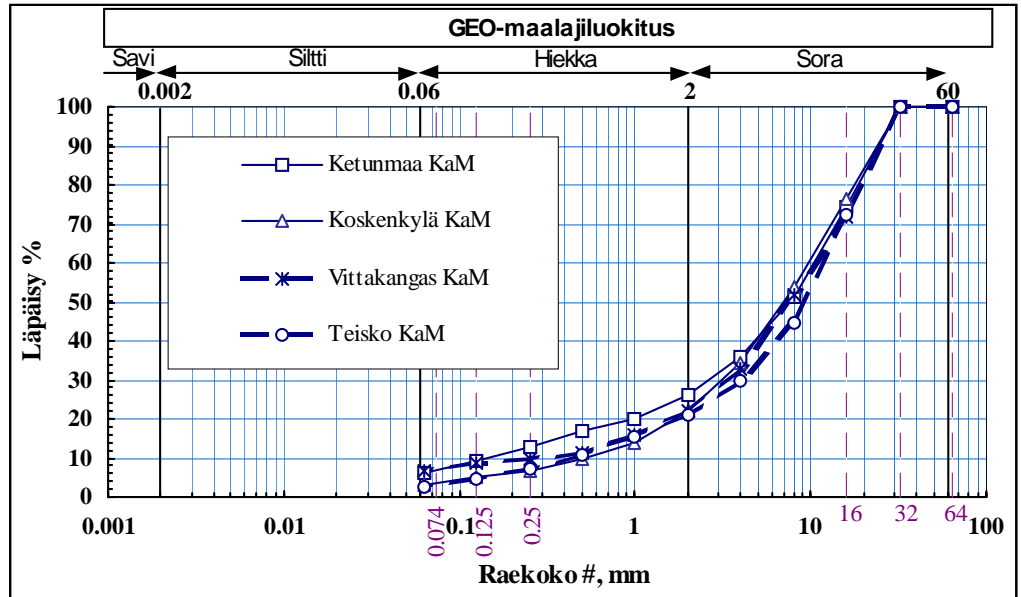
Taulukko 1. Eroosiointiin laskenta

Seula [mm]	Läpäisy [%]	Kaltevuus	Erosioindeksi [0.215-kalt]
32	100		
16	92.6	0.632	(-0.417)
8	71.8	0.817	(-0.602)
4	46.3	0.769	(-0.554)
2	24.7	0.601	(-0.386)
1	11.7	0.400	(-0.185)
0.5	5.6	0.270	(-0.055)
0.25	1.2	0.195	0.020
0.125	0.2	0.138	0.077
0.063	0.1	0.110	0.105
Yhteensä			0.202



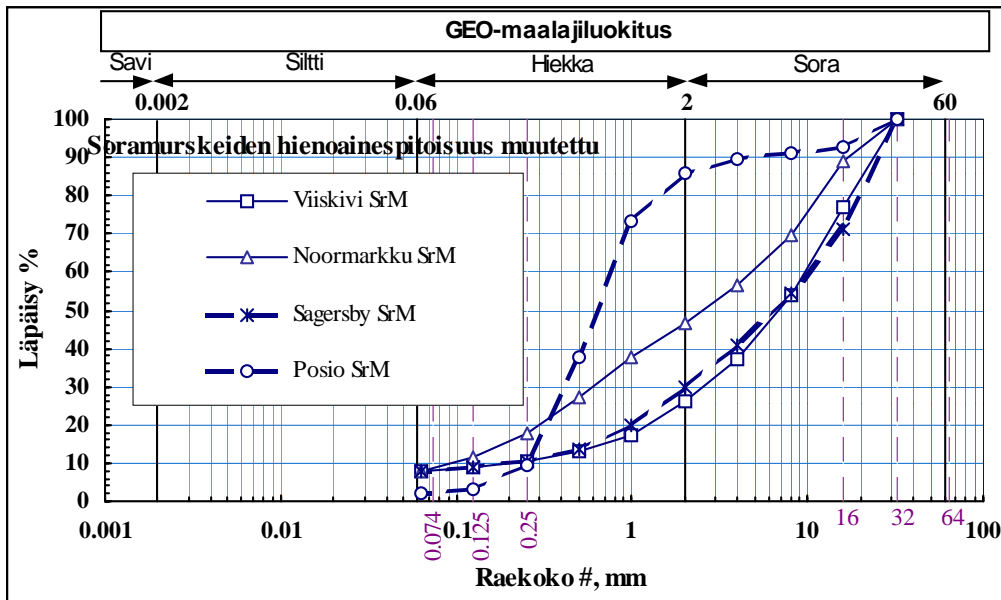
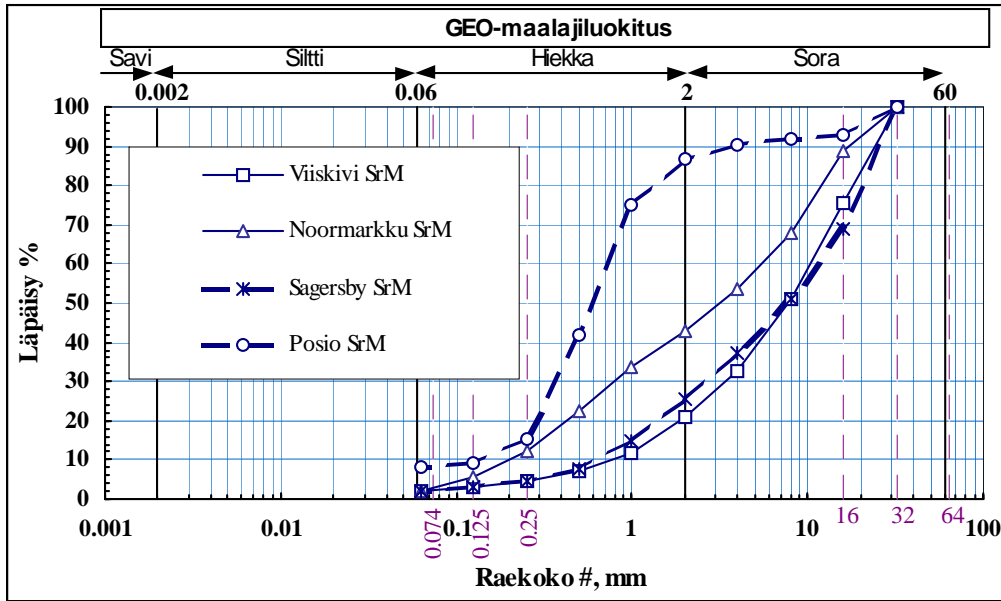
**Liite 2. Rakeisuuskäyrät**

Kalliomurskeet:



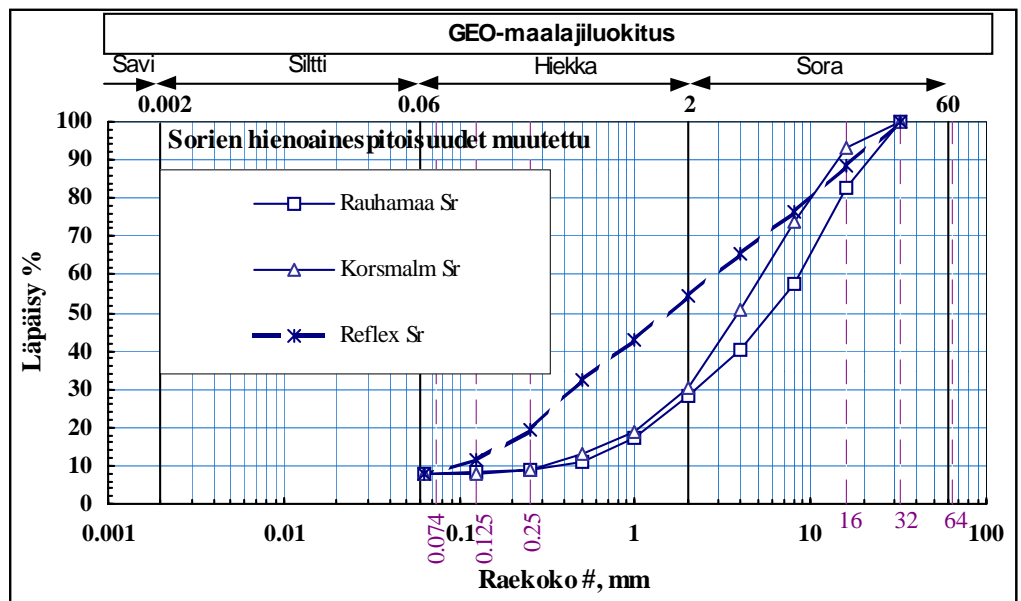
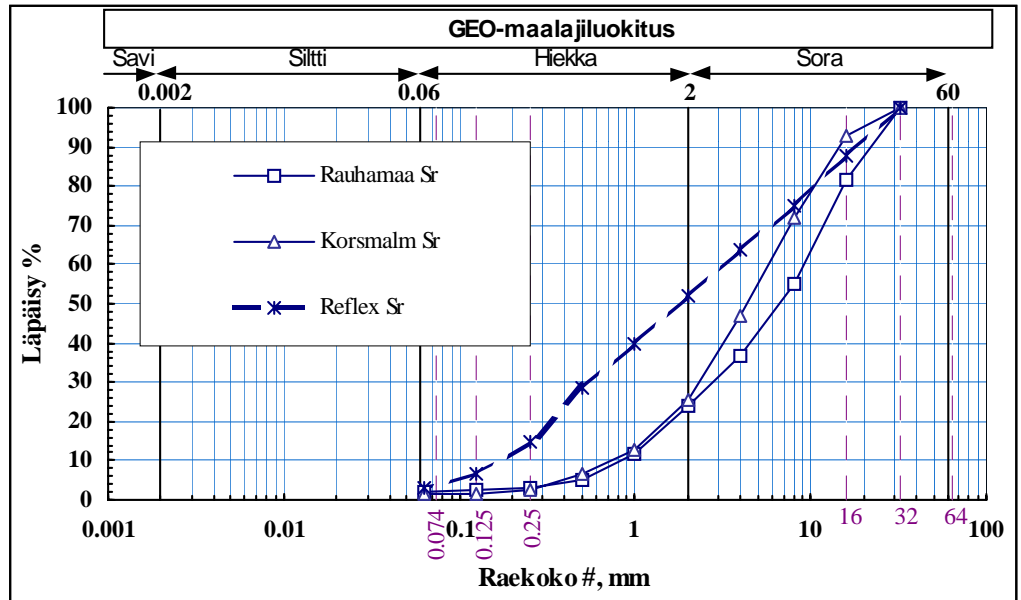
**Liite 2: Rakeisuuskäyrät**

Soramurskeet:



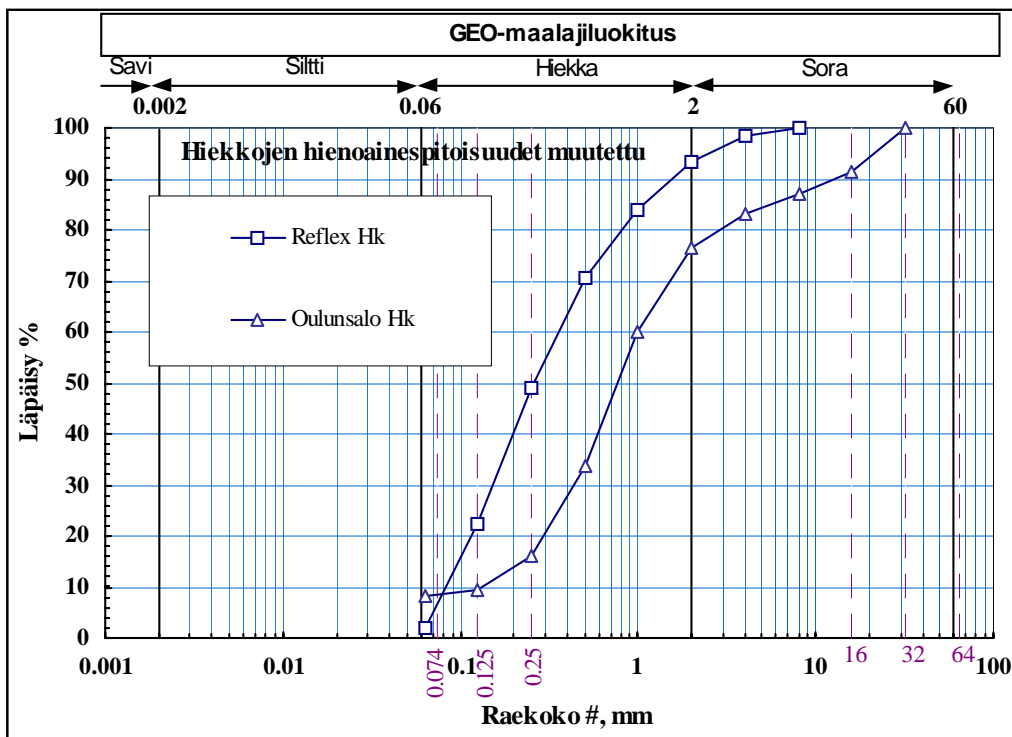
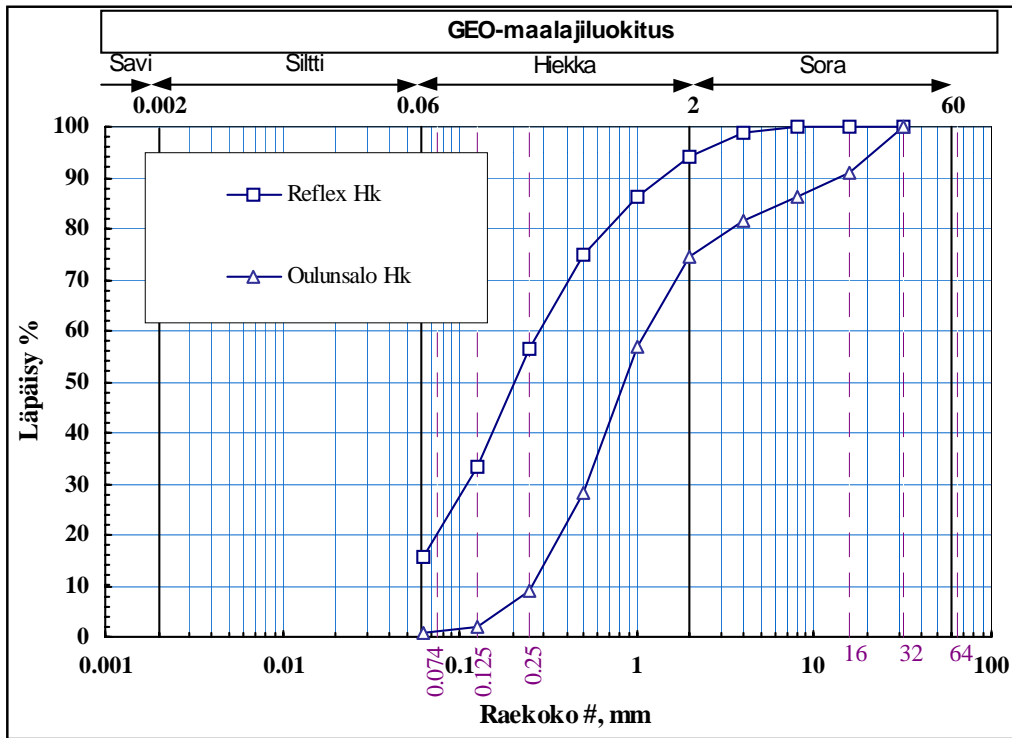
Liite 2. Rakeisuuskäyrät

Sorat:



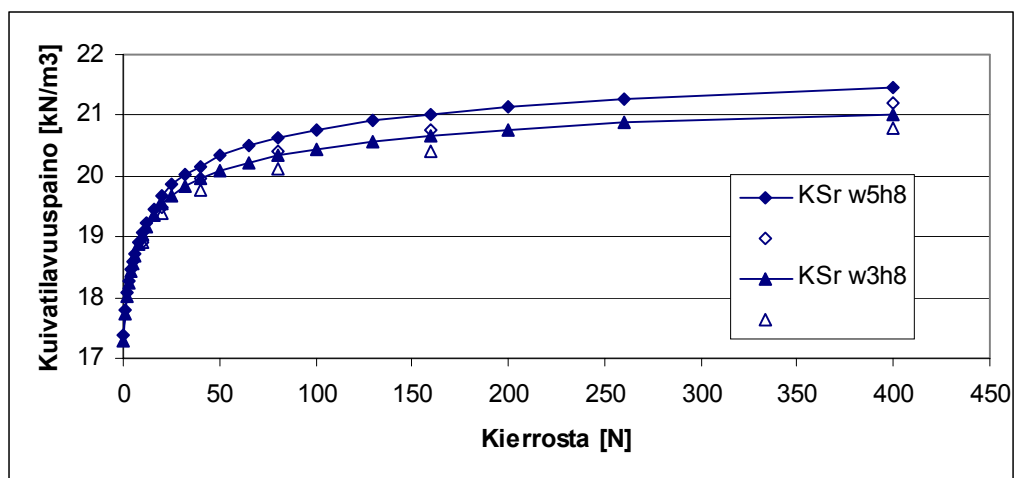
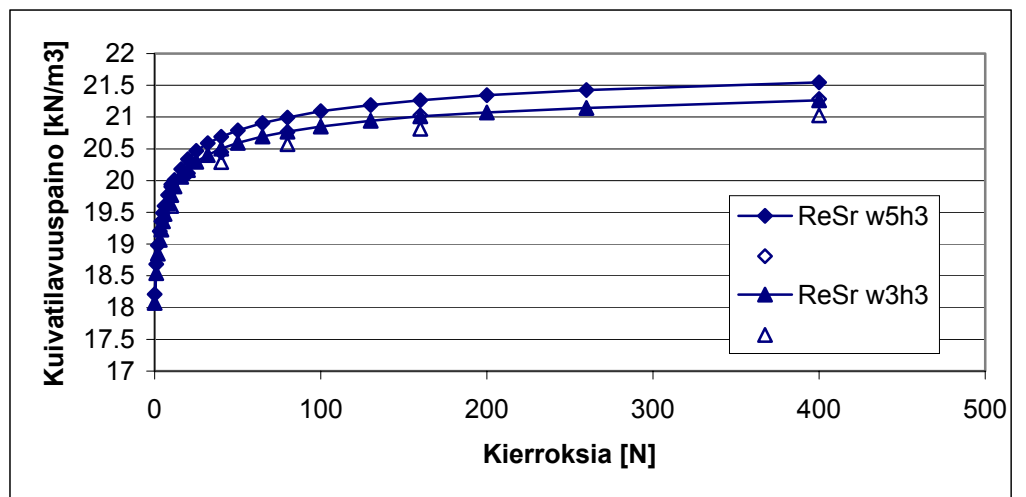
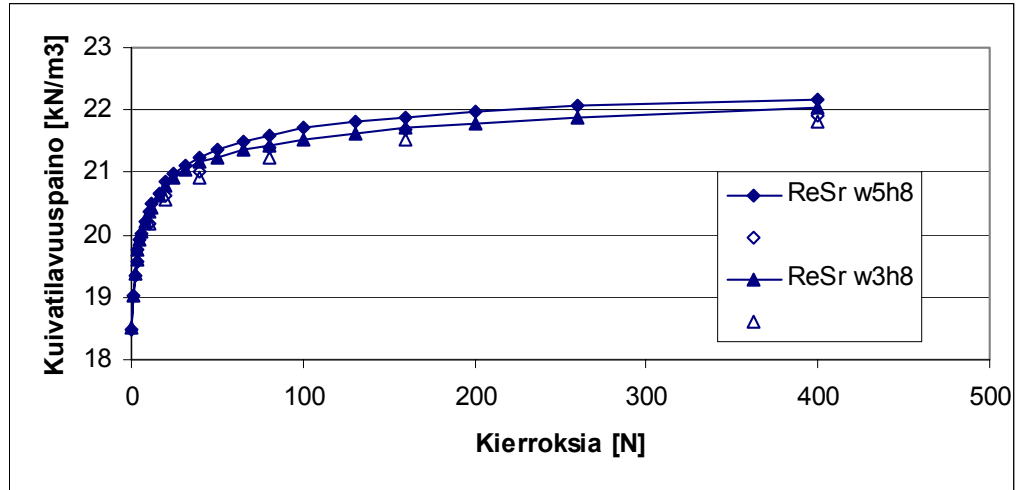
**Liite 2: Rakeisuuskäyrät**

Hiekat:

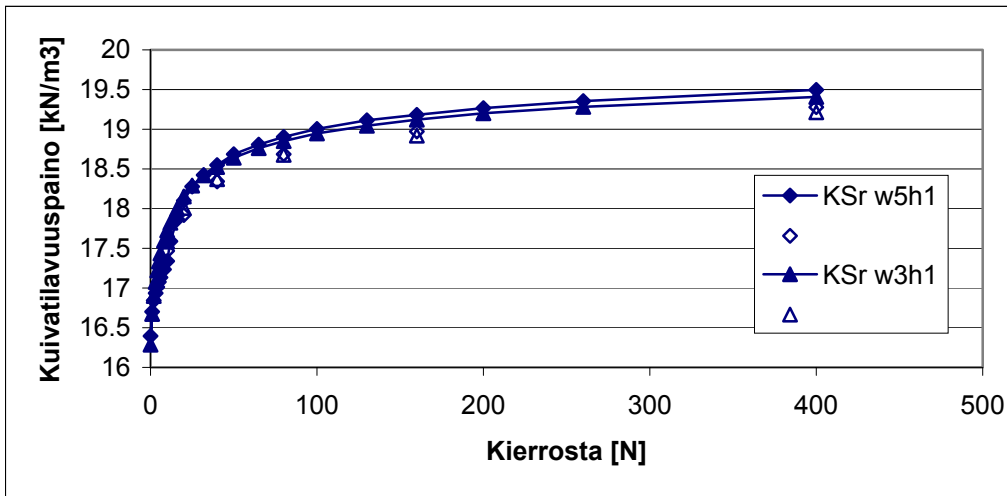


### Liite 3: ICT-koekäyrät

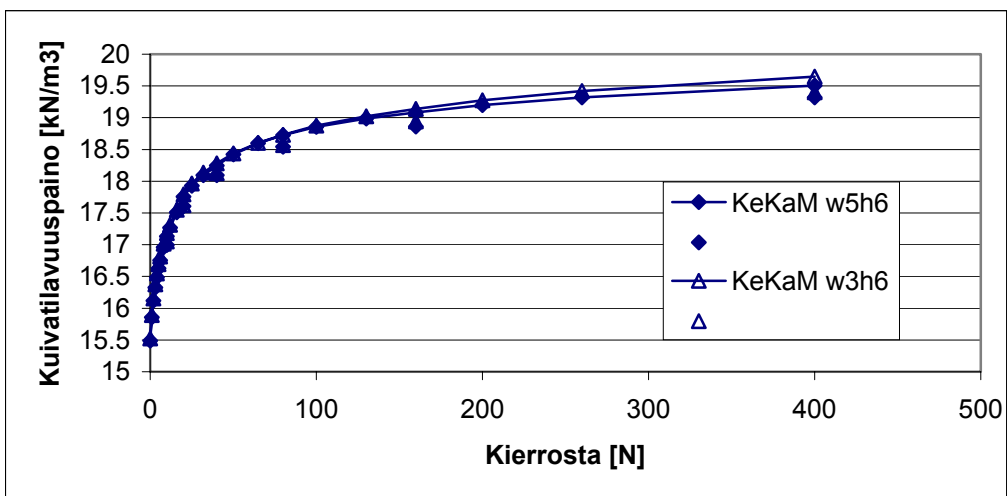
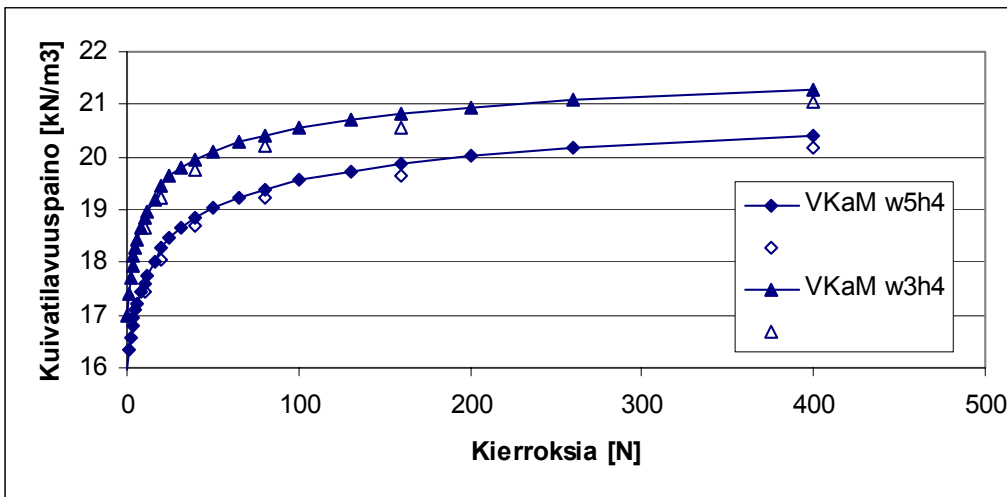
Sorat:



Sorat:



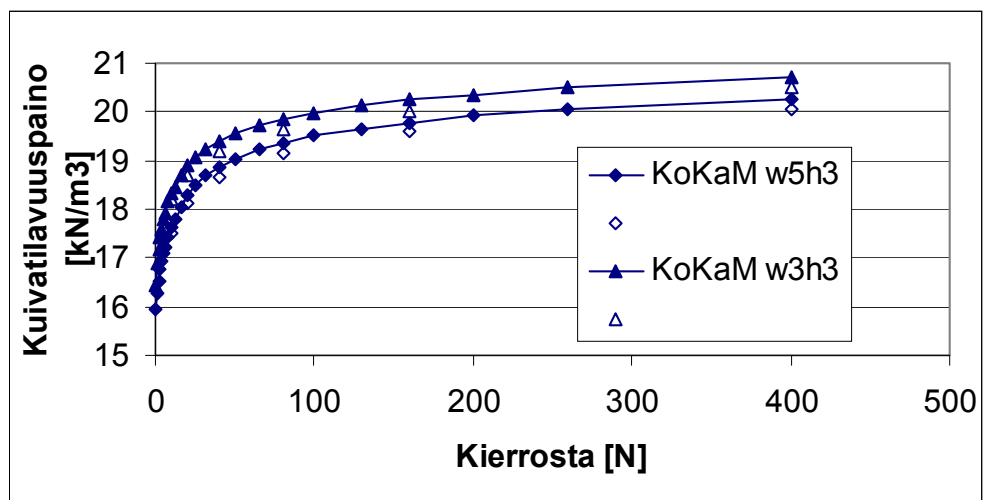
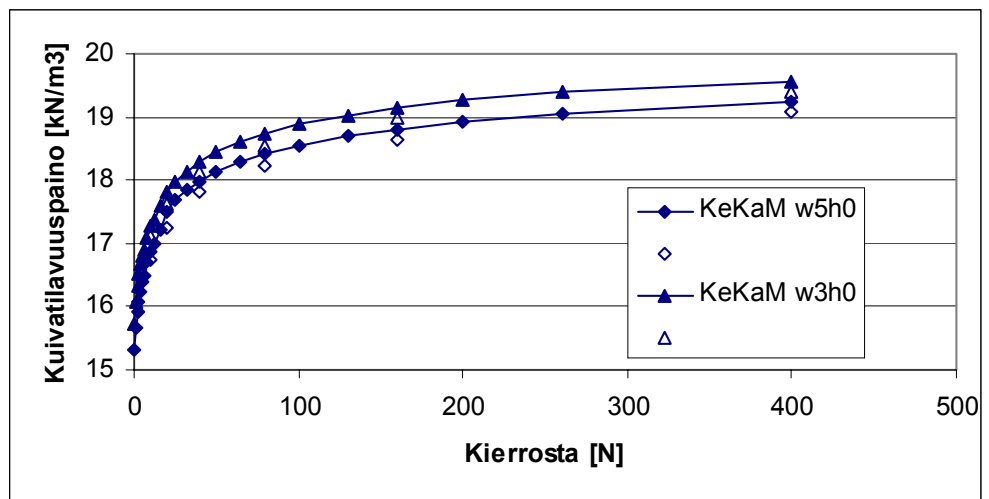
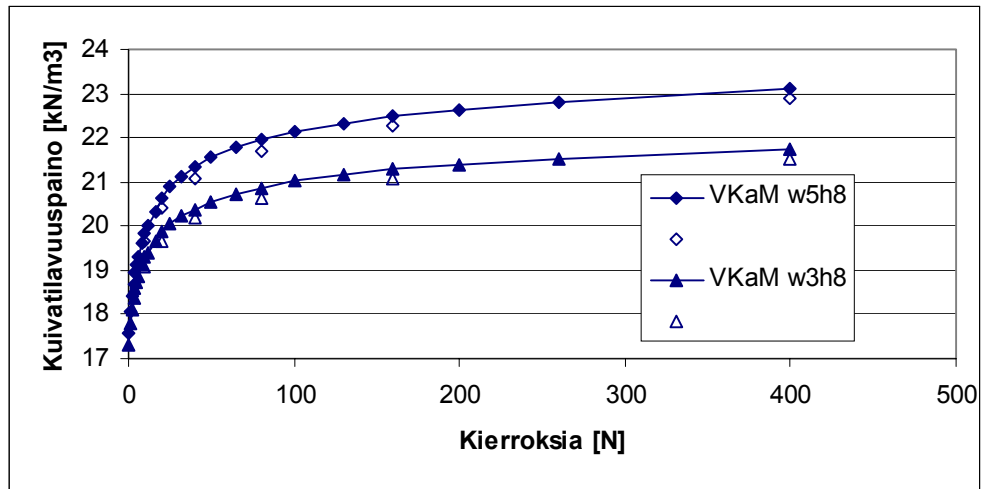
Kalliomurskeet:



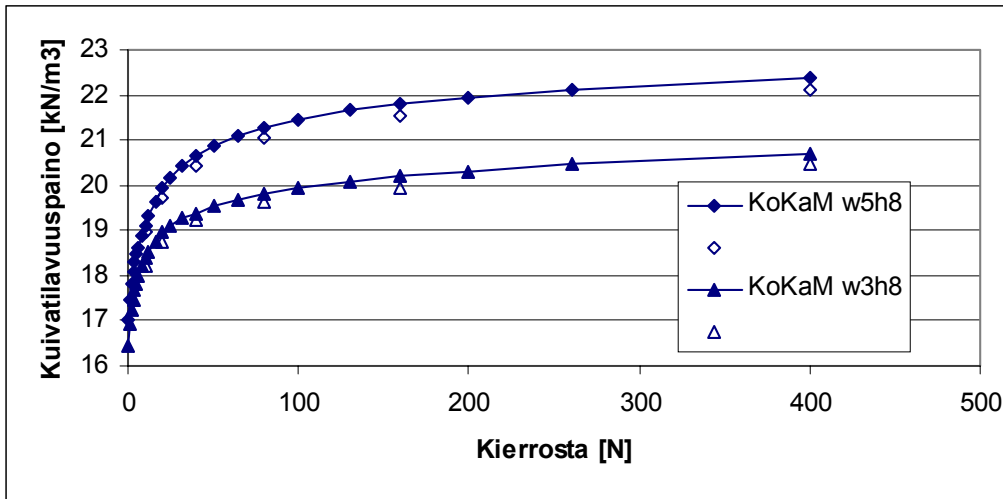


LIITTEET

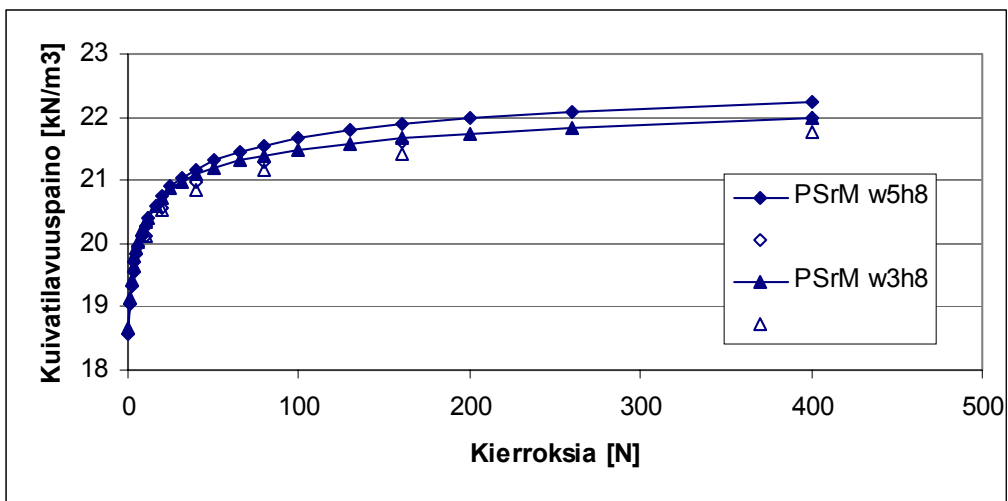
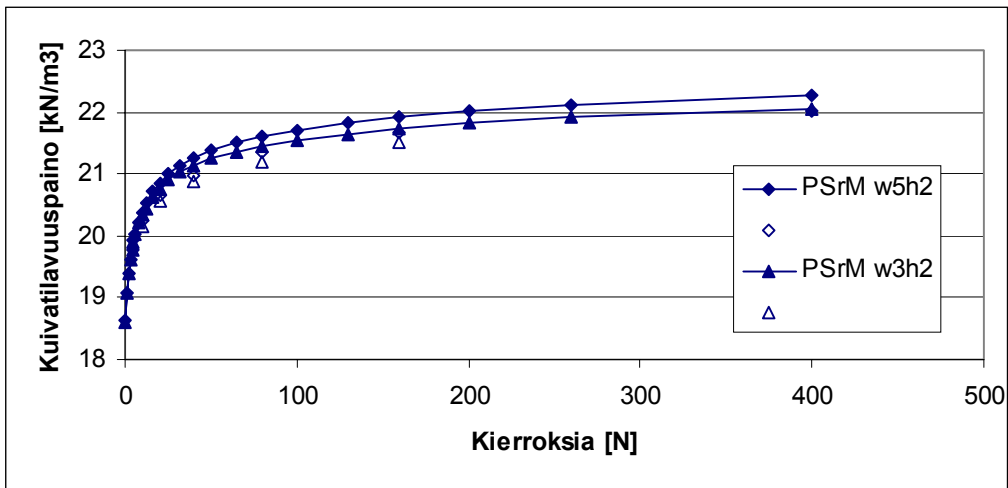
Kalliomurskeet:



Kalliomurskeet:

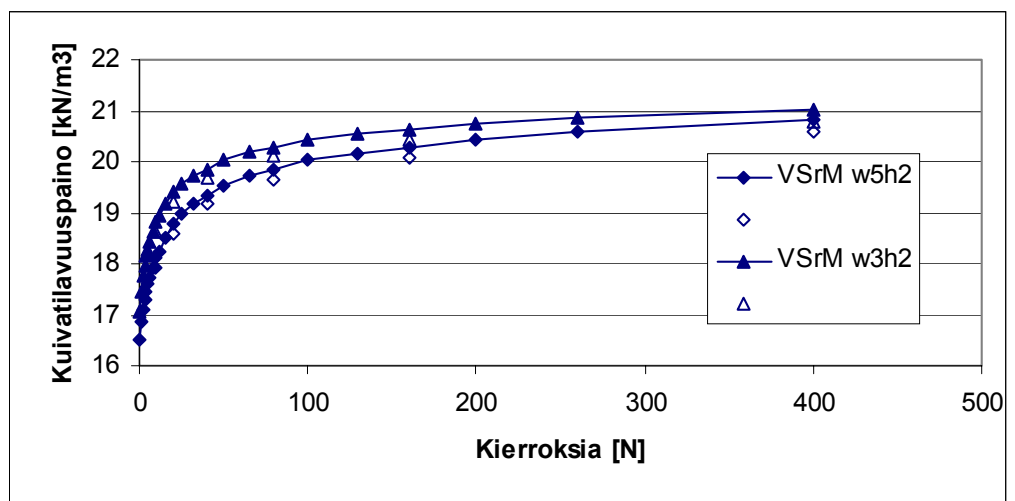
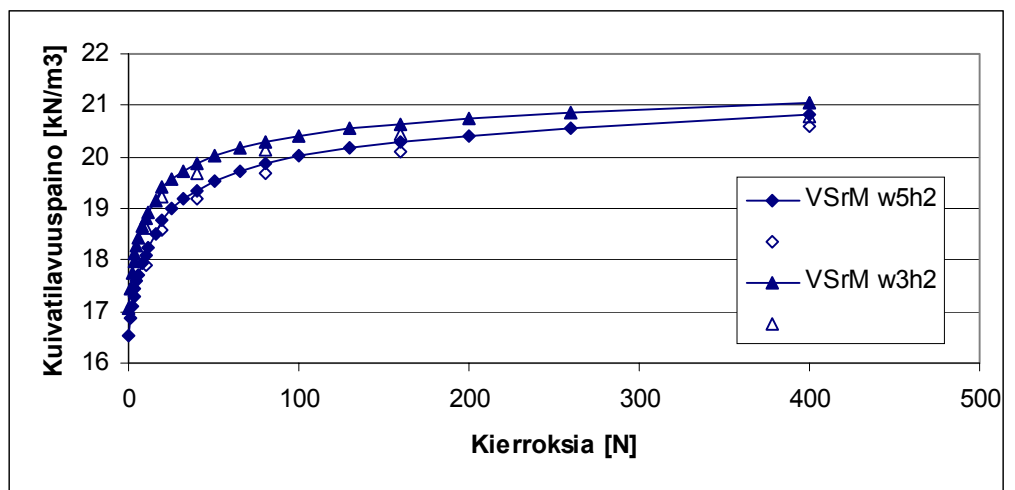
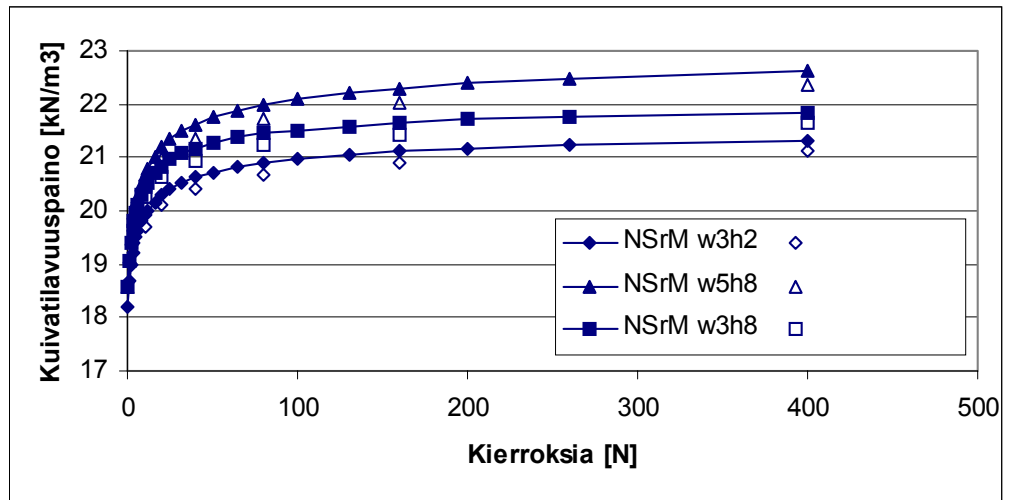


Soramurskeet:

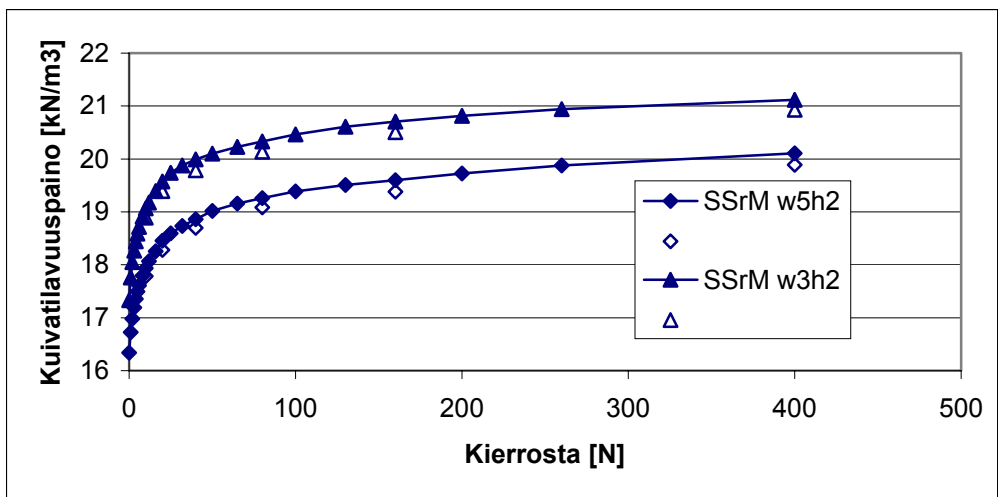
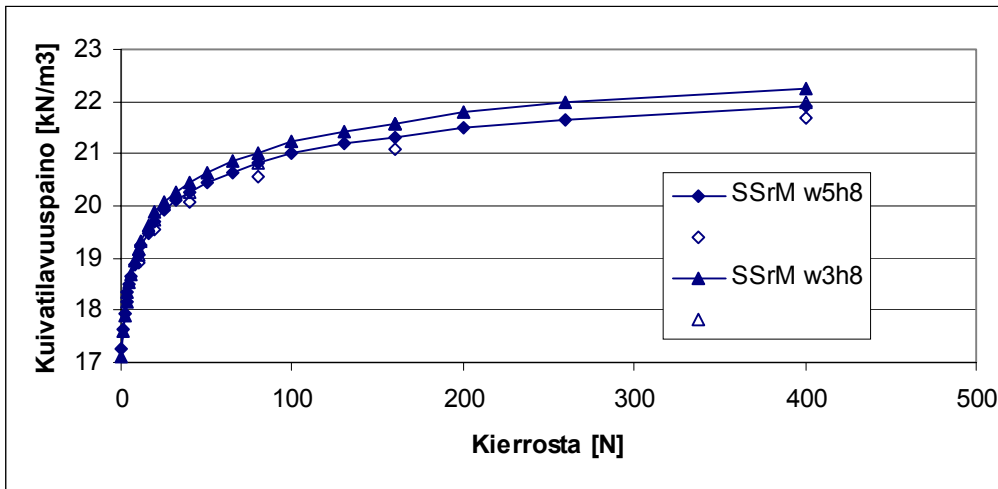


LIITTEET

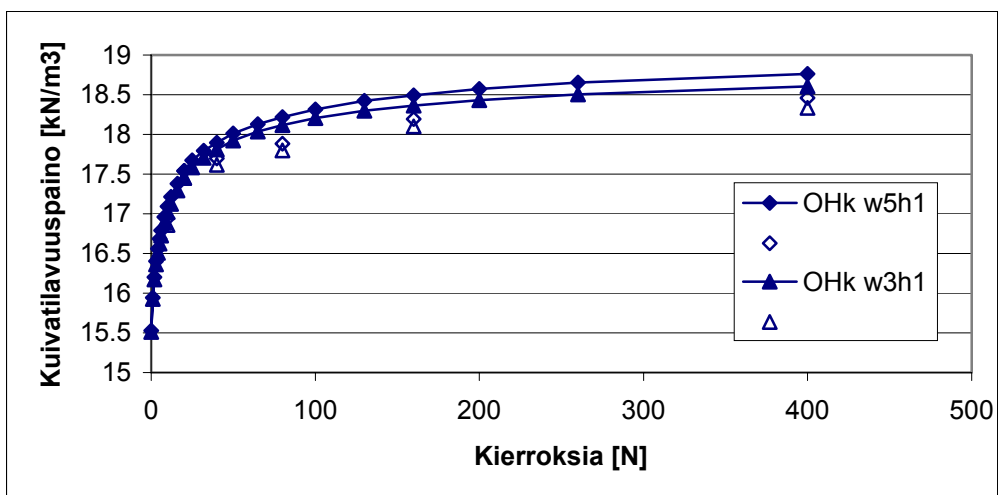
Soramurskeet:



Soramurskeet:



Hiekat:



LIITTEET

Hiekat:

